博士学位論文

変動天体の研究 - X 線観測による奇妙な変動中性子星 1E1207.4−5209 の包括的研究

Research of variable astronomical objects - A comprehensive study of a strange variable neutron star system 1E1207.4−5209 by X-ray observations

2013 年 3 月

青山学院大学大学院
理工学研究科
理工学専攻 基礎科学コース

高橋 一郎

概 要

恒星が核融合を進めその一生を終える時、その一部は中性子星という中性子の縮退圧で支えられた天体になる。電波パルサーが 1967 年に発見されて以来、千個以上の中性子星が発見され、その特性により様々なクラスに分類されてきた。その中でも近年特殊なクラスとして分類されるようになった Central Compact Object(CCO) という中性子星群が存在する。現在 7 天体程が分類されており、研究が盛んに進んでいるクラスの一つである。その中の内、本論文で取り上げるのは超新星残骸 G296.5+10 の中心付近に存在している 1E1207.4−5209 という天体である。

1E1207.4−5209 は CCO の中でも特に奇妙な特徴を持つ天体である。対応天体が X 線以外で見つかっておらず、約 0.424 秒のパルス周期が検出されているが、周期変化率がかなり小さく、回転駆動型パルサーと同様にこの値から 1E1207.4−5209 年齢を計算すると超新星残骸の年齢より 4 桁以上大きくなってしまうため、現在では周期が遅いまま生まれたのではないかと推測されている。そして最大の特徴が X 線スペクトルの吸収構造である。基本的な連続成分は 2 種類の黒体放射で説明できるが、約 0.7、1.4、2.1、(2.8)keV にハーモニックな吸収線構造が存在しているとされ、現在のところ CCO の中で吸収構造が見つかっているのはこの天体のみである。この構造の原因はサイクロトロン共鳴散乱によるものだと考えられているが、そうであれば中性子星の磁場を直接測ることができる。もし陽子によるサイクロトロン共鳴散乱であれば、表面磁場強度は $10^{1}4$ G という超強磁場となり、強磁場中性子星 (マグネター) の候補天体に挙げられる。他にも、高調波側の吸収構造の有意性の問題から実際にはハーモニックではなく、水素様重元素イオンによる構造であるという説もあり、その正体に完全な決着は付いていない。 この吸収構造の理論的に正しいパラメータの選定が急務となっていた。

1E1207.4−5209 の特徴の物理的解釈を確かにするために本論文では 2 つの X 線観測衛星による観測データの解析を行なった。まずは、日本の X 線観測衛星「すざく」を使い 2006 年と 2007 年に 1E1207.4−5209 の観測を行い、そのデータを解析した。「すざく」衛星での観測の狙いは大きく分けて 3 つあり、一つ目がタイミング解析を行い 1993 年から 2004 年までほぼ変化していなかった周期を調べてそれがこれまでと比べ大きく変化していないか調べる事。二つ目がスペクトルの吸収構造を「すざく」衛星でも確認できるか、またスペクトルパラメータに違いが無いか調べ、吸収構造の原因を調べる事。そして三つ目が「すざく」衛星の広いエネルギーバンドを生かして高エネルギー側 (10∼600keV) に放射が無いか確認する事である。まず、タイミング解析について、ライトカーブの畳み込みや Z test による周期探査により過去の論文で検出されたピークを確認し、畳み込んだライトカーブには変動率 10%程度の時間変動が確認された。また、X 線スペクトル解析の結果、そのスペクトルに吸収構造 (0.7、1.4、2.1keV) を確認した。この吸収構造のエネルギー比率から電子のサイクロトロン共鳴散乱で最も良く説明でき、陽子によるサイクロトロン共鳴散乱は棄却される。高エネルギー側の放射については有意な光子をを検出できなかった。そして本論文の重要な結果として、「すざく」衛星のスペクトル解析で得られたモデルパラメータが先行研究とは異なり、基本波である 0.7keV の吸収線の深さが浅く、他の吸収線の深さの方が深いもの (*Shallow1st*) となった。

この結果を受けて、本論文では別の時期に 1E1207.4−5209 を観測していた X 線観測衛星「XMM-Newton」のアーカイブデータを解析し、*Shallow1st* が XMM-Newton のスペクトルでも再現できるか調べた。その結果、*Shallow1st* でも XMM-Newton のスペクトルを良く説明できる事を確認した。またその統計的有意性はこれまでの基本波が深いもの (*Deep1st*) に比べ同等かそれ以上のものとなった。さらにパルス位相で分割した X 線スペクトルについても *Shallow1st* を適応した。その結果、位相が変わる毎に吸収成分の深さが大きく変わり、flux が最小時に吸収線が最も深い事を確認した。 また、連続成分は 2 温度黒体放射で良く表現できるが、この内、高温側成分に吸

収構造が存在するモデルが最も妥当である事も分かった。この場合の連続成分のパラメータから求めた黒体放射の放射領域半径は低温成分 (kT〜0.1keV) が 10km 程度、高温成分 (kT〜0.3keV) が 1km 程度となった。 これらの結果は *Shallow1st* で考えた場合、星全体が低温で輝き、磁極付近では高温成分の黒体放射が発生してそれが電子のサイクロトロン共鳴散乱により変形すると共に、天体の自転により高温成分の見える角度が変わる事で明るさが変動する、という 1E1207.4−5209 の幾何学的描像で解釈できる。

このように本論文では奇妙な中性子星 1E1207.4−5209 をX線で観測することにより、未だ謎に包まれているこの天体の物理的構造に新たな解釈を提起した。

目 次

第 1 章　変動天体観測の重要性と観測装置の開発及び変動 X 線源 1E1207.4−5209　4

1.1 変動天体観測の重要性 4
1.2 変動天体観測装置の開発 8
1.3 中性子星 10
1.3.1 中性子星からの X 線放射 13
1.3.2 中性子星の分類 14
1.3.3 CCO 15
1.4 1E1207.4−5209 16

第 2 章　「すざく」衛星による観測　19

2.1 すざく衛星 19
2.2 観測 21
2.3 解析ソフト 22
2.4 Normal mode データ解析 23
2.4.1 一時処理 23
2.4.2 解析領域の決定 23
2.5 XIS Normal モード ライトカーブ解析 25
2.6 XIS Normal モード スペクトル解析 28
2.6.1 スペクトル 28
2.6.2 フィッティングモデル 29
サイクロトロン共鳴散乱 (電子) 30
サイクロトロン共鳴散乱 (陽子) 31
2.6.3 スペクトルフィッティング 33
基本的なフィッティング 33
3 本目の吸収構造は有意か? 34
陽子サイクロトロン共鳴の吸収構造を入れた場合 39
吸収構造のパラメータ 39
Deep1st と *Shallow1st* 39
3 つ目の連続成分の可能性 41
Shallow1st で 2006 年すざくスペクトルをフィッティング 43
吸収成分は 2 温度黒体放射のどちらにかかっているか? 46
2.7 XIS Psum モード タイミング解析 I 56
2.7.1 Psum モードとは 56
2.7.2 リダクション方法 57
2.7.3 パワースペクトル 63
2.7.4 efsearch(畳み込みライトカーブの χ^2 検定) 64
2.7.5 efold(畳み込みライトカーブ) 69
2.7.6 Ztest 70
2.7.7 Ztest で見つかったピークでのライトカーブの畳み込み 72

2.8 Psum タイミング解析 II . . . 73
2.8.1 エネルギー分け . . . 73
2.8.2 efsearch(畳み込みライトカーブの χ^2 検定) . . . 76
2.8.3 Ztest . . . 77
2.8.4 タイミング解析 . . . 79
パワースペクトル . . . 79
efsearch(畳み込みライトカーブの χ^2 検定) . . . 81
efold(畳み込みライトカーブ) . . . 85
Ztest . . . 87
2.8.5 Ztest で見つかったピークの efold . . . 89
2.8.6 まとめ . . . 94
先行研究との比較 . . . 95
2.9 HXD データ解析 . . . 97
2.9.1 PIN データ . . . 97
ライトカーブ . . . 97
スペクトル . . . 98
2.9.2 GSO データ . . . 99
スペクトル . . . 99
2.9.3 まとめ . . . 99

第 3 章 XMM-Newton 衛星による観測とスペクトルの時間変化 100
3.1 XMM-Newton 衛星 . . . 100
3.1.1 検出器 . . . 101
3.1.2 EPIC カメラ . . . 101
3.1.3 XMM-Newton 衛星の特徴 . . . 103
3.2 観測データ . . . 105
3.3 解析用データの抽出 . . . 105
3.4 イメージ解析 . . . 106
3.5 タイミング解析 . . . 107
3.5.1 解析領域の決定 . . . 107
3.5.2 ライトカーブ . . . 108
3.5.3 パワースペクトル . . . 111
3.5.4 efsearch(畳み込みライトカーブの χ^2 検定) . . . 111
3.5.5 efold(畳み込みライトカーブ) . . . 112
3.5.6 Ztest . . . 112
3.6 時間平均スペクトル解析 . . . 114
3.6.1 MOS1 . . . 114
3.6.2 MOS2 . . . 116
3.6.3 pn . . . 118
3.6.4 pn(吸収線 4 本) . . . 120
3.6.5 *Shallow1st* パラメータに固定 . . . 122
3.6.6 第 3 の連続成分があるか確かめる . . . 129
3.6.7 高温側黒体放射成分のみに吸収構造がある場合 . . . 131
3.6.8 連続成分に NPEX を使用した場合 . . . 135
3.7 位相分割スペクトル解析 . . . 137
3.7.1 Phase 分割スペクトル解析まとめ . . . 152

第 4 章　議論 **156**
4.1 解析結果のまとめ 156
4.2 *Shallow1st* パラメータの妥当性 157
4.2.1 吸収構造の有意性 157
4.2.2 数値計算に基づく観測データの解釈 160
4.3 タイミング解析からの推察 161
4.4 1E1207.4−5209 の描像 162
4.4.1 時間平均スペクトルから考えられる描像 162
4.4.2 Phase 分割スペクトルから考えられる描像 164
吸収構造の理論計算を利用した θ の見積り 164
4.4.3 1E1207.4−5209 の最終的な描像 168
高温側黒体放射の源 170

第 5 章　総括と今後の変動天体観測の課題 **171**

付録 **173**
A Psum タイミング解析におけるエネルギー領域とソース領域の幅の検討 173
A.1 efsearch 173
A.2 Ztest 174
A.3 まとめ 175
B Psum タイミング解析におけるエネルギー領域とソース領域の幅の検討 2 176
B.1 efsearch 176
B.2 Ztest 178
B.3 まとめ 179
C $\dot{P}$ を考慮した場合の efsearch 180
D $\dot{P}$ の値と Ztest の結果について 195
D.1 2006 年 (1st) 195
D.2 2007 年 (2nd) 197
E スペクトル解析補足 202
E.1 すざくスペクトルの様々なモデルでのフィッティング 202
星間吸収と連続成分のみ 202
ガウス型吸収構造を 1 本入れた場合 214
ガウス型吸収構造を 2 本入れた場合 226
すざくスペクトルについて 4 本目の吸収構造は有意か? 238
E.2 すざくと Newton データのジョイントフィット 249

第1章　変動天体観測の重要性と観測装置の開発及び変動X線源1E1207.4−5209

1.1　変動天体観測の重要性

現代の宇宙物理学の観点から見れば宇宙は定常的なものではなく、種々の階層においてきわめて動的な存在である。まさに変動する現象の総体と言っても過言は無い。広い意味での変動天体には例えば次の様なものがある。

超新星

超新星とはその一部 (.Ia 型) を除いて恒星の一生の最期に起こる爆発現象である。この様な爆発では星が一生の間に放出していたエネルギーと同等のエネルギーを一瞬にして解き放ち、数週間から数ヶ月のタイムスケールで暗くなっていく。現在では、超新星はその観測されたスペクトルの形状で数種類 (Ia、Ib、Ic、II 等) に分けられる。それらの原因も異なっており、Ia 型は主に複数の天体が共通重心の周りを周り合う連星系中の白色矮星で核融合反応が暴走することによる爆発、Ib、Ic、II 型は大質量星の重力崩壊による爆発と考えられている。図 1.1 は各タイプごとの光度変動を示す。

我々の銀河系ではこの 1000 年間に 6 個 (可能性が高いもの) の超新星が観測されているが、他の銀河の観測ではそれ以上の頻度で観測されている事から、我々の銀河系でも観測されていないだけでより多くの超新星が出現していると考えられる。

1987 年、大マゼラン銀河内に超新星 1987A が出現した。近代の観測技術が確立されてから、初めて我々の近くで発生したこの超新星に対して世界中で観測が行われた。図 1.2 は超新星 1987A の発生前と後で、V 等級で 3 等級まで増光し、肉眼でも確認する事が出来た。この超新星爆発で初めて超新星爆発由来のニュートリノが検出され、その成果によって 2002 年に小柴昌俊氏がノーベル物理学賞を受賞した。

Ia 型は非常に明るく、絶対等級が一定である事から系外銀河までの距離指標として使われている。昨年 (2011 年) のノーベル賞はこの特徴を使用して宇宙の加速膨張の証拠を示した研究が受賞した。

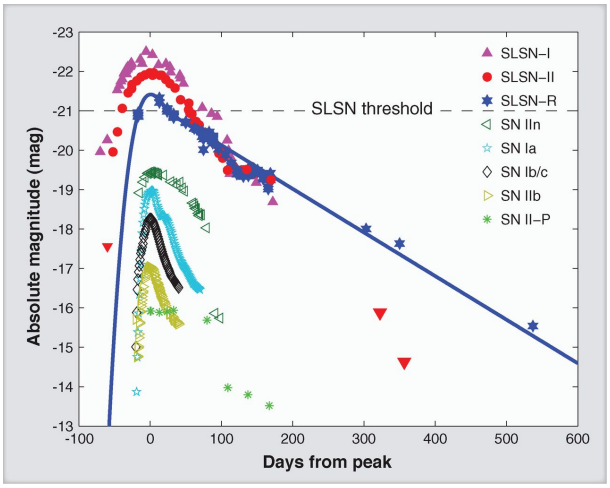

図 1.1: 各型の超新星の光度変化。横軸が極大からの日数で、縦軸が可視光における絶対等級。型により様々な光度変動を示す。

図 1.2: 1987 年 2 月 24 日に発見された超新星爆発 1987A。左が発見前、右が発見後。

ブラックホール新星

我々の銀河には、太陽の 3 倍から数十倍の質量を持つブラックホールが数多く存在している。その中でも、ブラックホールと恒星の連星系では、恒星の物質がブラックホールに落ち込むことで X 線で爆発的に輝く (アウトバースト)。これらのほとんどはそれまで X 線では明るくなかったものが突然明るくなる事からブラックホール新星と言われる。繰り返しアウトバーストを起こす天体もあれば，X 線観測の歴史上 1 度しか観測されたことのない天体も存在する。ブラックホール連星の放射スペクトルは大きく分けて二つの状態、ハード状態とソフト状態を持つ。波長が短いもの ($< 10^{-9}$m) を硬 X 線、長い (¿10^{-9}m)X 線を軟 X 線と呼び、ハード状態時はスペクトルが硬 X 線の寄与が大きく、ソフト状態時では軟 X 線の寄与が大きい事から、この様に呼ばれる。図 1.3 は最初に見つかったブラックホール候補天体はくちょう座 X-1 の X 線・ガンマ線スペクトルと理論的モデル。これらのスペクトルの説明として、ハード状態は重力エネルギーによって数十億度に加熱されたブラックホールを取り巻く希薄なコロナが、逆コンプトン散乱により低エネルギー光子にエネルギーを与えることで説明できる。ソフト状態の放射スペクトルはブラックホールの近傍まで伸びる降着円盤からの多温度黒体放射で説明できる。ブラックホールの直接観測は難しいため、この様なブラックホール新星の光度変化の観測はブラックホール近傍の情報を引き出す重要な研究手段である。最近では、2009 年 7 月に打ち上げられた国際宇宙ステーション搭載の全天 X 線監視装置 MAXI(Monitor of Allsky X-ray image) が XTE J1752−223 というブラックホール新星のアウトバーストを捉えた。その光度変動はこれまでのブラックホール新星とは異なり、2 度明るさが変動しない状態に留まりながら 3ヶ月という長い時間をかけて光度がピークとなった。この様な光度変化はこれまでの理論では説明がつかないため、XTE J1752-223 は新種のブラックホール新星だと判明した (Nakahira et al. 2010)。図 1.4 は代表的なブラックホール新星の光度変化と XTE J1752−223 の光度変化を比較したもの。

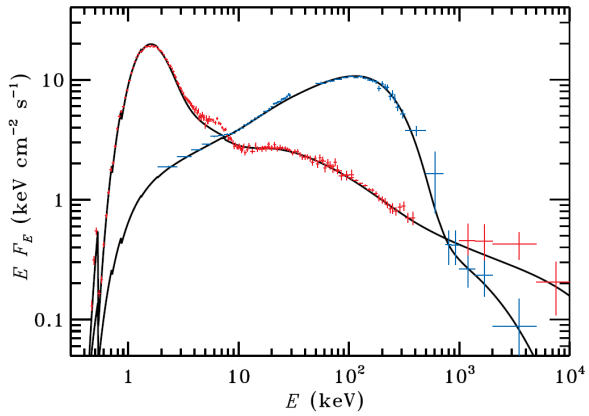

図 1.3: はくちょう座 X-1 の X 線・ガンマ線スペクトルと理論的モデル (Zdziarski & Gierlinski 2002)。赤いデータがソフト状態で青いデータがハード状態。

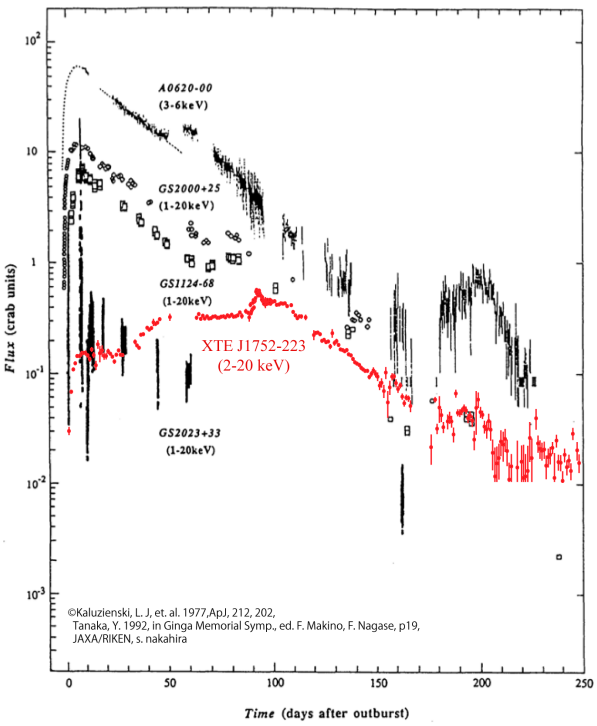

図 1.4: 代表的なブラックホール新星 (黒いデータ) 及び XTE J1752−223(赤いデータ) の光度変化。

ガンマ線バースト (GRB)

ガンマ線バーストとは、宇宙のある方向から数 keV から数 MeV(時には GeV) までの X 線や γ 線が短時間 (数 ms から数 100 秒) に降り注ぐ現象で、ビッグバンに次いで最も規模の大きい爆発現象とされている。

この現象は、1967 年、核実験監視衛星 VELA によって初めて観測され、1990 年代のコンプトン・ガンマ線天文衛星搭載の BATSE の観測によってガンマ線バーストは全天で約 1 回／1 日の割合で発生していることと、ガンマ線バーストの分布は等方的だということがわかった。しかし、どのようなメカニズムでこの現象が起こるのかは確実には分かっていない。現在最も有力な説は、太陽の数十倍以上の超巨大質量星が超新星爆発を起こしてブラックホールとなる時に、はぼ光速のジェットをを噴出し、そのジェットが地球の方向を向いたときにガンマ線バーストとして観測されるというものである。

ガンマ線バーストには残光と呼ばれる現象が存在する。バーストが終わったあとでも X 線から電波までの多波長で輝き続ける現象のことで、1997 年 2 月 28 日に発生した GRB970228 において、X 線天文衛星 BeppoSAX によって初めて観測され、同天体を可視光望遠鏡で観測したところ可視光でも残光が観測された。これらの残光の大きな特徴は、その強度が時間のべき乗で急速に減少していくことである。そのためにも迅速な観測が必要となる。残光を可視光や電波で観測することにより正確なバースト発生位置を決めることができる。GRB970228 の残光が暗くなってから、残光観測によって求められたバースト位置を可視光の大型望遠鏡で観測したところ、母銀河と思われる天体が発見された。

またこれらの残光や母銀河の可視光での分光観測も可能となり、赤方偏移からバースト発生源までの距離を測定することに成功した。その結果、ガンマ線バーストは数 10 億光年から数 100 億光年もの宇宙論的な距離で起こっていることがわかった。

そして、2003 年 3 月 29 日に発生したガンマ線バースト GRB030329 の残光の追観測から、そ

の残光のスペクトルが超新星と似たスペクトルを示していることが判明し、このことからある種のガンマ線バーストとある種の超新星爆発には関係があることが確実となった (Uemura et al. 2003、Sato et al. 2003)。

ガンマ線バーストはその規模から数十億光年先のものでも観測することが可能である。遠方であればあるほど昔に発生したものであることから、最近では GRB は太古の宇宙を研究するためのサーチライトとして使用されてきた。図 1.5 はこれまで可視光で観測された GRB の中で最も明るかった GRB080319B の光度変化のイメージである。

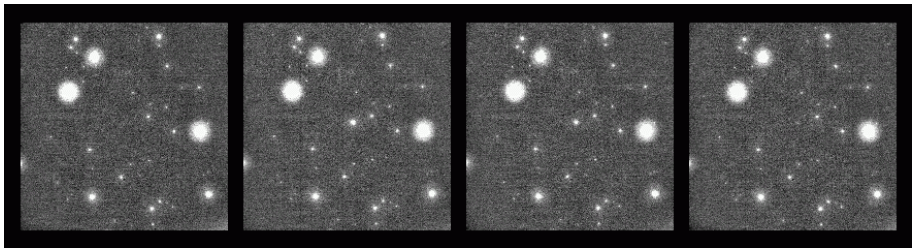

図 1.5: 2008 年 3 月 19 日に可視光広視野観測装置 Pi-of-the-Sky が観測した GRB080319B の光度変化のイメージ。時間経過は左から右に向けて。これまで可視光で観測された GRB の中で最も明るく、V 等級で 5.8 等級まで明るくなった (Racusin, J. L. et al. 2008)。

ここに挙げた天体以外にも突発天体は数多く存在しているとされる。また、周期的に変動する天体はそれ以上に存在し、現在も多くの研究者によって観測が続けられている。現在、この様の天体の時間変動を研究することでその天体の正体に迫るとする「時間領域天文学 (Time domain astronomy)」が次の十年の新たな研究分野として注目されている。

1.2 変動天体観測装置の開発

私はこれまで、時間的に変動する天体、突発天体を研究対象として様々な波長領域で観測装置の作成や観測データの解析など研究を行ってきた。以下にいくつか紹介する。

まず、可視光領域において私は、観測装置を開発しそれを運用して天体観測と解析を行ってきた。民生用の望遠鏡を使用したロボット望遠鏡 AGU Robotic Optical Monitor for Astronomical objects - Nallow (AROMA-N) を開発し、GRB の追観測を行った。また、デジタル一眼レフカメラ複数台を使用した広視野観測装置 AROMA-W を開発し、突発天体探査や変光星モニターを行っている (Takahashi et al. 2009)。図 1.6 と 1.7 に AROMA-W の外観図を示す。

図 1.6: 民生品の望遠鏡を使用した自律式のロボット望遠鏡 AROMA-N。GRB の追観測等を行った。

図 1.7: デジタル一眼レフカメラを複数台使用した広視野観測装置 AROMA-W。

例えば AROMA-W については次の様なシステムを構築した。12 台のデジタル一眼レフカメラを赤道儀に載せて各カメラの視野をモザイク状に配置することで図 1.8 にこのシステムの概要を示す。搭載された各カメラで観測を行いながら、得られた画像を解析して天体を検出する。20 秒露出する事で一度に全視野で数万の天体が検出できる。その後、検出した全ての天体一つ一つの光度を測定し、それらの時間変化を記録する。また、光度変動の検出等も同時に行い、その天体の位置をチェックできる様にしている。これが全てのカメラについて自動的に行われ、突発天体の探査や変動天体のモニターを行う。その例として、図 1.9 にこれまでモニターした変光星データの一部を示す。

また、私は X 線領域においても研究を行ってきた。GRB 観測衛星 HETE-2 や X 線天文衛星すざく、国際宇宙ステーションに搭載されている全天 X 線監視装置 MAXI など様々な衛星、装置の運用に携わると共に、それらによって得られた X 線データの解析を行ってきた。

本論文で全てを述べるのは難しいため、その中でも本論文では X 線観測による奇妙な変動中性子星の研究を中心に述べる。

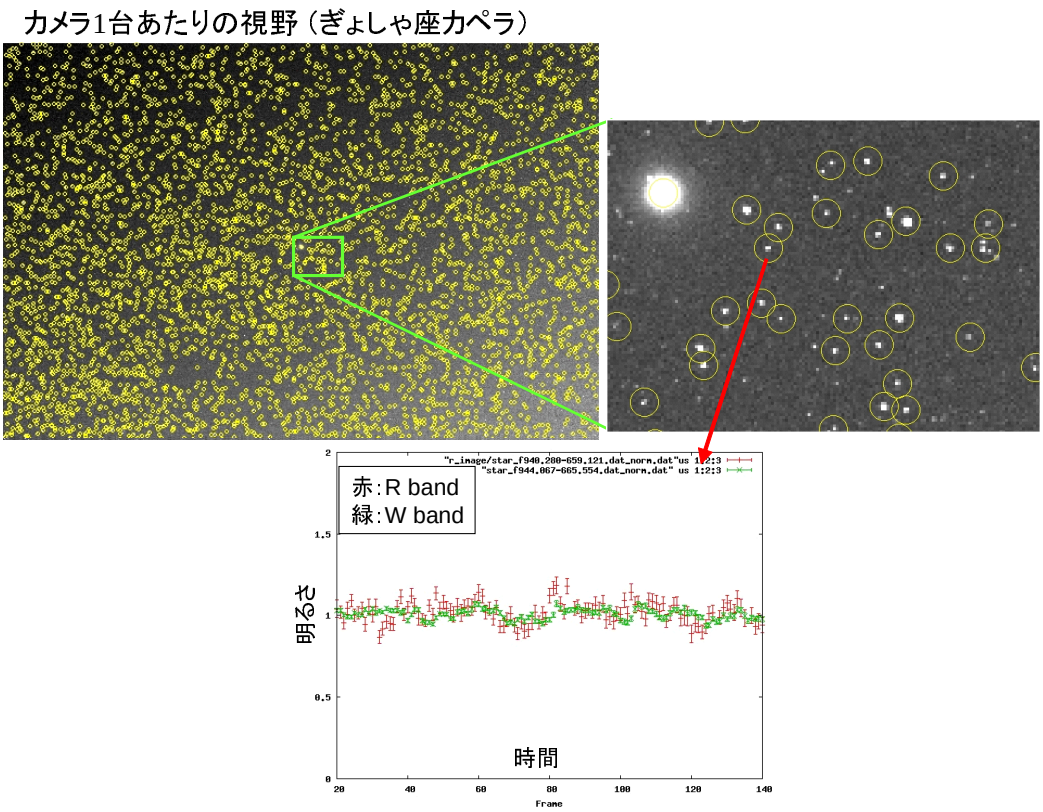

図 1.8: AROMA-W のシステム概要。黄色い円が検出された天体の位置。検出された全ての天体の光度の変化を記録する。

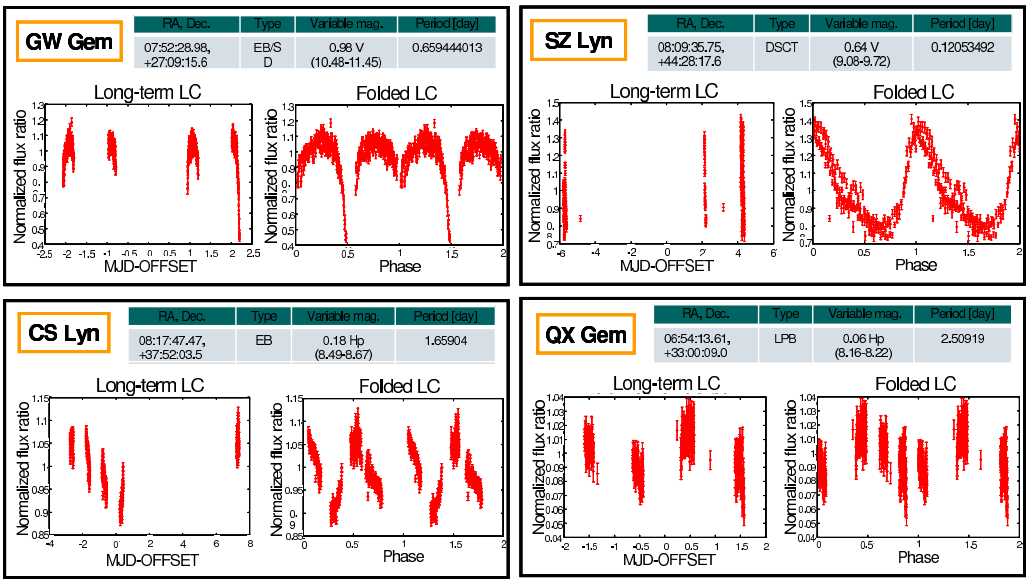

図 1.9: AROMA-W で検出された変光星の例。ある 4 つの変光天体の情報とライトカーブを示しており、各天体で左が長期のライトカーブ、右がそれを周期で畳み込み周期内での変動を示した畳み込みライトカーブ。

1.3 中性子星

本論文で研究対象となる中性子星はどのような天体かここでまとめる。図 1.10 は星の一生をまとめた図である。

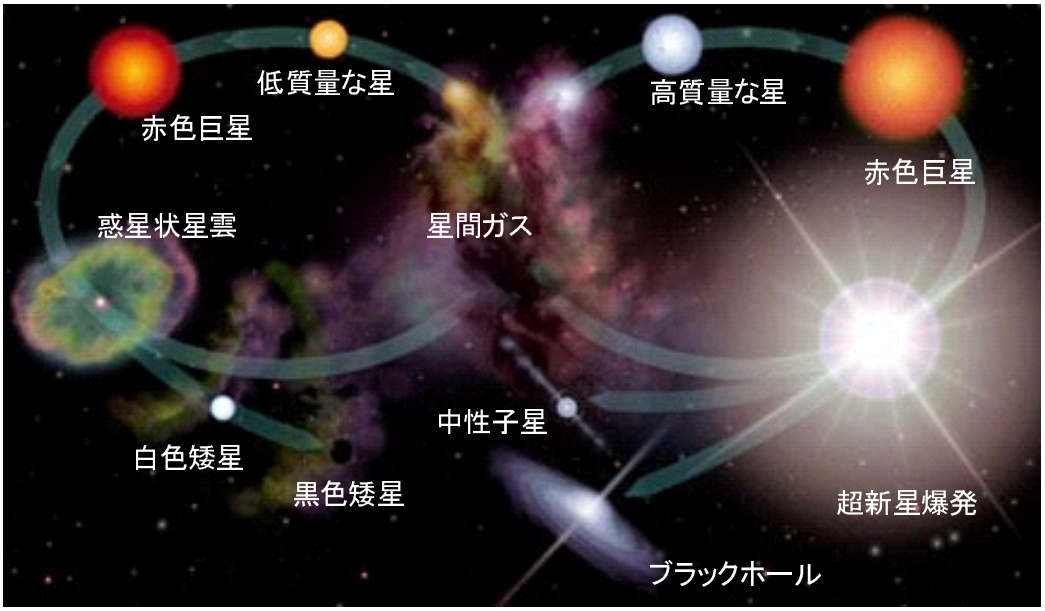

図 1.10: 恒星の一生を表した図。http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/teachers/lessons/xray_spectra/background-lifecycles.html より。

全ての星は星間ガスから生まれる。そのうち低質量の星は赤色巨星を経て最期に構成物質を少しずつ周りに広げ、それが惑星状星雲として観測される。そして中心に白色矮星が残り、時間が経つと冷えきって黒色矮星として光らなくなる。それが、高質量 (太陽の 8 倍以上) の星の場合は赤色巨星になった後、最期に超新星爆発を起こす。その中でもさらに質量があるものは超新星爆発後に中性子星やブラックホールができる。

1932 年に中性子が発見されてからわずか 2 年後の 1934 年には中性子星の予言が Zwicky と Baade によってなされていた。それから約 30 年後の 1967 年に電波領域で周期的な放射が観測されるパルサーとして Hewish と Bell によって中性子星が発見された。

中性子星とは端的に表現すると中性子の縮退圧で支えられた天体である。通常の星の場合は中心での核融合反応により発生した熱や光のエネルギーによる圧力が自身の重力に対抗することで形を保っているが、中性子星は核融合反応が収まった天体なのでそれで自身の重力を支えることができない。しかし、フェルミ粒子である中性子は一つの量子状態に一個しか入らないため中性子の密度が大きい中性子星では中性子のフェルミエネルギーは 100MeV まで達し、大きな圧力 (縮退圧) が発生して重力を支える。また、一般的に中性子は β 崩壊し電子、陽子、反ニュートリノに崩壊するが、中性子星の場合、電子も縮退し高いエネルギーまでつまっているため β 崩壊でできる新たな電子が入る場所が無く、β 崩壊は抑えられて中性子が集まった星として存在できる。

中性子星の組成は主に中性子であるが、内部には中性子以外の粒子も存在し層状の構造を成していると考えられている。表面は温度や磁場の強さにより、固体や液体の状態にあり、その下には鉄やニッケルの原子核が規則的に並んで固体となったものと縮退した電子の層がある。その下には縮退した電子と中性子過剰な原子核が固体で存在する他に、原子核中に束縛しきれない自由中性子が超流動状態で存在するとされる。さらに中心に進むとほぼ自由中性子で占められ、中心付近では π 中間子やクオーク等の素粒子が存在している可能性があるがまだはっきりしていない。

中性子星の内部構造は未だに謎であり上述の構造もモデルの一つである。現在では、宇宙物理と核物理など複数の分野が協力しての研究が始まっており、中性子星の内部構造の解明は最新の研究課題となっている。

観測や理論研究によってこれまでに分かっている中性子星の基本的な性質は次の様になっている。

大きさと質量

中性子星の大きさは半径 ~10km で、太陽の半径の約 10 万分の 1 程度と通常の恒星と比べるとはるかに小さい。その中に太陽程度の質量を持ち、その密度は 10 億トンにも達する。質量が太陽質量の 3 倍以上になると安定した中性子星で存在することができず、重力崩壊してブラックホールになってしまう。図 1.11 は理論計算による中性子星の質量と半径の関係で、中性子同士に働く核力のモデルによって異なる関係になる。

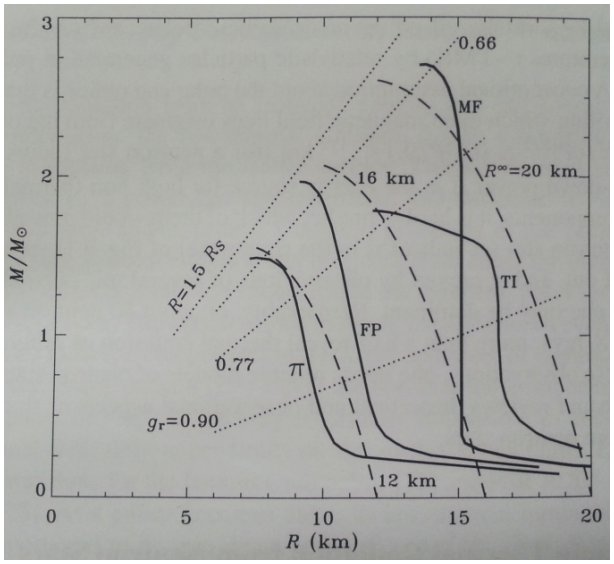

図 1.11: 理論計算による中性子星の質量と半径の関係 (Becker 2009)。各実線は核力のモデルによる違い。

磁場と周期

中性子星は強い磁場を持っており、高速回転していると考えられている。

この説明として、一般的な考え方としては以下の通りである。元の恒星が磁力線の数を一定に保ちながら収縮し中性子になったと仮定すると表面積は元の 100 億分の 1 程度となり磁場の強さは 100 億倍になる。つまり、元の磁場強度が 100G(ガウス) 程度であれば中性子の磁場強度は 10^{12}G になる。また、角運動量は保存されているため、その回転周期はとても早くなり数ミリ秒まで早くなり得る。ただし、強磁場の原因については磁束の保存では無く、新たな源の可能性も考えられ、中性子星の内部構造の研究と共に現在議論が盛んに行われている。

周期や磁場は観測からも決定できる。周期は主にパルサーとなっている中性子星の観測により求められる。磁場を持ち高速回転する中性子星は、基本的には単極発電機と考えることができ、誘導電場で加速された電子と陽電子が雪崩式に増殖し、磁力線に沿って加速度運動をする時に電磁波が放射され、磁極からのビームを作り出す。遠距離から灯台を見るときの様に、ビームが我々の視線方向を向いたときのみ天体は明るく見えるためパルスが確認される。このパルスの周期がそのまま中性子星の回転周期となる。

磁場に関しては中性子星の回転に対するブレーキの強さから見積もられる。中性子星は傾

いた磁石が回転しているものと仮定できるため磁気双極子放射によりエネルギーを失っている。その放射が回転エネルギーからまかなわれるとすると回転にブレーキがかかることになり、その周期はだんだん長くなっていく。実際に半径や質量、磁場の強度から計算した磁気双極子放射によるエネルギー損失と周期変化率は多くの中性子星で概ね合っている。つまり磁場双極子放射を仮定すると周期と周期変化率から磁場を見積もることができる。

図 1.12 はこれまで観測されたパルサーとなっている中性子星の周期と周期変化率をプロットした分布。

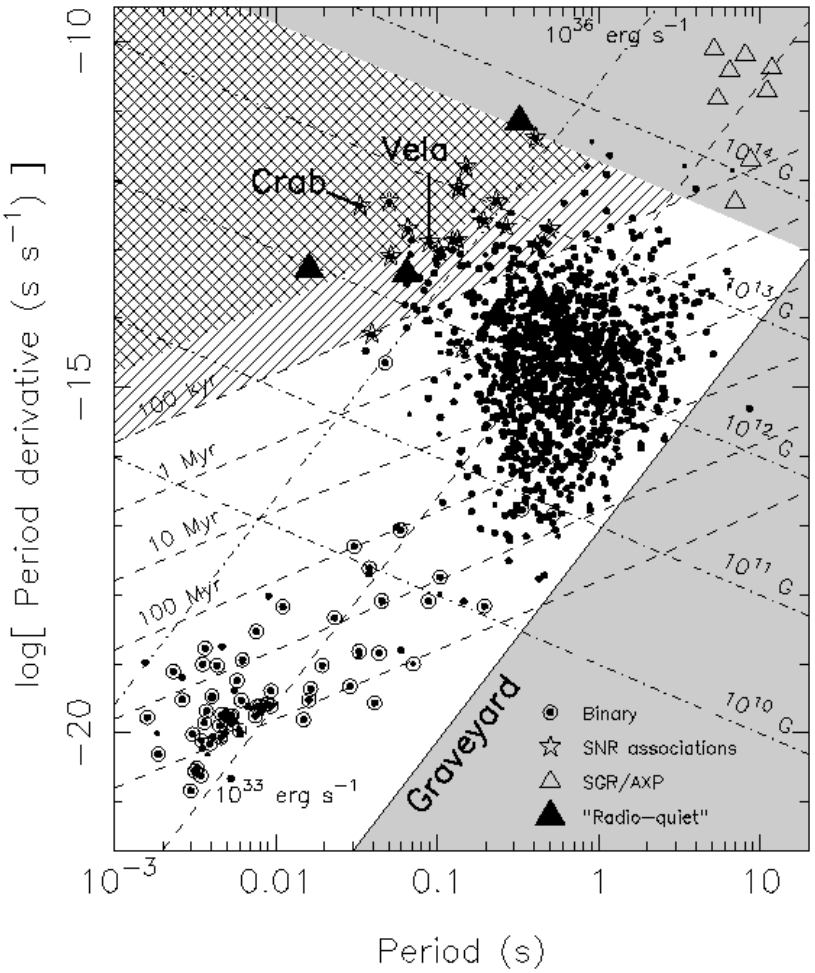

図 1.12: パルサーとなっている中性子星の周期と周期変化率の分布 (Lorimer and Kramer 2004)。磁場双極子放射を仮定して周期と周期変化率から見積もった磁場と年齢のラインが引いてある。Graveyard と書かれた右下の灰色の領域では中性子星の磁場双極子放射は暗くなり観測できない。

図 1.12 を見ると実際には磁場強度 10^8G 以下 ~ 10^{15}G と広い値を持ち、周期も様々な値を持つ (10^{-3} ~10^1 秒)。それらは異なるメカニズム、進化によってそれらの磁場、周期を持っていると考えられる。

1.3.1 中性子星からの X 線放射

殆どの中性子星は始めに電波で観測された。しかし、X 線での天体観測技術が進むにつれて、X 線で輝く中性子星が発見されてきた。その空間分布は銀河面に沿っていることからこれらの大部分は我々銀河系に属していると考えられる。これまでに発見されている X 線を出す中性子星の殆どは普通の恒星との連星系である。

恒星の外層が中性子星の重力圏に流れ込み中性子星のまわりに降着円盤と呼ばれるガス円盤を作る。円盤内では内側の物質ほど早い角速度で回転しているので内側と外側の物質の間には摩擦発生する。この摩擦で角運動量を失いながら中性子星に向かって落ち込んでいく。中性子星の磁場が強い場合 (10^{12}G 程度) は降着円盤は磁気圧によってせき止められ、磁力線にそって磁極付近に落ち込んでいく。落ち込んだ物質は中性子星の表面付近で重力エネルギーを開放し X 線を放射する。中性子星の磁場が弱い場合 (10^{8}G 以下) 降着円盤は中性子星の表面近くまで侵入し、中性子星表面の広い範囲に落ち込む。摩擦により高温になった降着円盤と中性子星表面の近傍から大量の X 線が放射される。

連星系にも 2 種類存在し、その一つが大質量星との連星系をもつもの (High Mass X-ray Binary, HMXB) で、中性子星に伴星の構成物質が落ちることで膨大な重力エネルギーを解放し、高温になって X 線を放射する。観測される X 線強度には周期的なパルス変動が見られ、この原因として、降着物質が中性子星の磁力線に沿って磁極付近に集中して落ち込む事により磁極付近が加熱され、それが中性子星の自転により見え隠れすることでパルスが見えると考えられている。ところで、中性子星の磁場は X 線を出す中性子星の観測からも決定できる。HMXB などでは X 線が磁力線のまわりを回る電子と共鳴散乱を起こすことで X 線スペクトルに吸収構造が見られる。これをサイクロトロン共鳴散乱線と呼ぶ。この吸収構造の中心エネルギーから中性子星の磁場を求める事ができる。これまでに分かっている HMXB の場合、その磁場は 10^{12} ~10^{13}G 程度に分布している。サイクロトロン共鳴散乱の詳細については 3 章で述べる。

もう一つの連星系が小質量連星系 (Low Mass X-ray Binary,LMXB) で、こちらでは伴星が暗くて小さく、その質量は太陽より小さい。この様な小質量星は年老いた古い星と考えられる。こちらは普段は定常な X 線を放出しているだけでパルスは検出されていない。これは磁場が小さいことを示唆している。その代わり LMXB の多くは、HMXB には見られない、X 線を爆発的に放出する X 線バーストを時々起こす。この原因は中性子星表面で降着物質が熱核融合反応の暴走を起こして不安定に燃えるためと考えれられている。

また、連星系以外の孤立した中性子星にも X 線で輝くものがいくつか存在する。一つ目が電波パルサーである。電波パルサーの一部は電波以外に X 線を放射するものも存在している。自身の回転エネルギーを磁場を通して X 線放射に変換することで輝いている。しかし、磁場双極子放射に対する実際の放射効率効率は低く、様々なモデルが提唱されており、物理的な詳細やその放射メカニズムが現在でも研究されている。

二つ目が Anomalous X-ray Pulsar (AXP) である。名前の通り通常の X 線パルサーとは異なる中性子星で現在までに 10 程度確認されている。ほとんどの AXP は 10keV 以下のソフト X 線で明るいパルサーとして見つかった。周期は狭い範囲に分布 (2 から 12 秒) で周期変化率 $\dot{P}$ 大きく、広い範囲に分布している (10^{-10}-$10^{-13}\,s\,s-1$) これらから計算される磁場は通常の中性子星よりとても大きい (6×10^{13}-8.1×10^{14} G)。周期と Pdot から考えると回転ではその X 線光度を説明できない。スペクトルは熱的かまたは熱的なものと非熱的なモデルで良く説明できる。定常なソフト X 線で輝き時々小さなバーストを起こす事が分かった。AXP のうちいくつかでは他の波長 (赤外線、可視光、電波) で対応天体が観測されている。

三つ目が Soft Gamma-ray Repeater (SGR) である。これまでに 10 天体ほど確認されている。定常な X 線放射をしており、ランダムなインターバルで起こる活動期にはソフト γ 線までの (<100keV) 短い (100ms) バーストを繰り返す。また、SGR は時々長い継続時間で、MeV を越える様な硬いス

ペクトルをもつジャイアントフレアを起こす。ジャイアントフレアの時間変化は中性子星の周期性で変動している。周期と周期変化率の分布は AXP と大体同じため磁場も大体同じ程度と考えられている。近赤外、可視光で見えたものもあり、定常的には電波を出していないが、ジャイアントフレア時には電波星雲が観測された。バースト及びジャイアントフレアはは強磁場による圧力が星震を起こすことで発生すると解釈されている。

現在では AXP と SGR 共にマグネター候補として取り上げられている。それらの X 線光度は回転駆動では説明できないが、周期と周期変化率から求められる磁場は大きいことから、自身の磁気エネルギーを解放して (磁場が崩壊して) 光ると考えられている。AXP と SGR は周期と周期変化率が似通っているだけでなく、その位置もどちらも銀河面に沿っている (それ以外は我々の銀河近傍の小さな銀河内)。若い SNR に付随しているものもあるので若い天体かもしれない。年齢は大体 1500 年と見積もられている。また、AXP、SGR 共に 100keV まで見えている Hard X-Ray Tail の存在があり、硬エネルギー放射の存在が確認されている。そしてそれらのべきや Hardness Ratio と特性年齢の間に相関があることが指摘されている (Enoto et al. 2010)。

他にも X-ray Dim Neutron Star (XDINSs)、Central Compact Object(CCO) という孤立中性子星からも X 線が観測されている。

1.3.2 中性子星の分類

前セクションで挙げた中性子星について、伴星の有無、輻射の種類に基づいて図 1.13 の様に分類した。

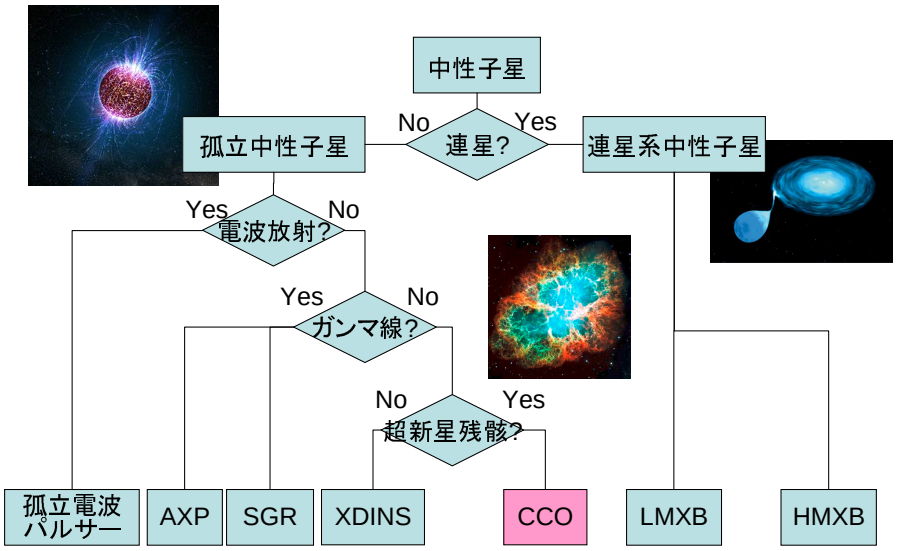

図 1.13: 観測的な性質から大別した中性子星の分類。

まず、伴星の存在の有無から、連星系か孤立中性子星に分けられる。連星系は前セクションでも述べた通り、伴星の質量から HMXB と LMXB に分かれる。孤立中性子星の場合は、それが電波を常に放出していれば電波パルサーに分類され、それ以外の内、γ 線が観測されているかで AXP や SGR とそれ以外に分類される。そして、それ以外の内、超新星残骸に付随していないものは X-Dim Isolated Neutron Star (XDINS) に分類され、付随しているものは CCO というクラスに分類される。この CCO について次のセクションでまとめる。

1.3.3 CCO

CCO とは Central Compact Object の略であり、年齢が 1 万年程度の超新星残骸の中心付近に存在している事からこう名付けられた。現在 8 天体程度が CCO と同定されており、現在も尚その数は増加している。すべて孤立中性子星と考えられており、これらの特徴としては以下の様にまとめられている。

- ほぼ定常な X 線を出している (X 線光度 Lx =10^{32} $\sim$ 10^{33} erg/s)。AXP,SGR とは異なり、突発的なバーストやフレアのようなものは確認されていない。
- 電波、赤外、可視光、γ 線では見えない。これが電波パルサーと違いで、X 線で輝くのみで他の波長域の放射は確認されていない。
- スペクトルは熱的で黒体放射等のモデルで良く説明できる。
- 周期 P や周期変化率 $\dot{P}$ は見つかっているものから考えると、周期は 0.1 秒程度、周期変化率は小さく、10^{-15} 以下である。
- 磁場強度が通常の中性子星に比べて小さく分かっているものは $B < 10^{10} \sim 10^{11}$G

各 CCO の情報を表 1.1 にまとめる。

表 1.1: 各 CCO の情報

CCO	超新星残骸	年齢 [kyr]	距離 [kpc♯]	周期 [s]	Flux $[10^{-12}\mathrm{erg\,cm^{-2}\,s^{-1}}]$
CXO J000256+62465	G117.9+0.6	?	3	—	0.1
RX J1713.7−3946	G347.3−0.5	10	6	—	2.8
CXO J185238.6+004020	Kes 79	9	10	105ms	0.2
1E1207.4−5209	G296.5+10.0	3-20	2	424ms	2.3
RX J0822−4300	Pup A	2	2	—	4.5
1E 1613−5055	RCW 103	2	3∼7	6.4hr	0.9∼60
CXO J085201.4−461753	G266.1−1.2	2	1∼2	—	1.4
CXO J232327.9+584843	Cas A	0.32	3.5	—	0.8

♯ 1pc=3.26 光年

1.4 1E1207.4−5209

本論文では前セクションで挙げた CCO の中でも、1E1207.4−5209 という天体に注目した。

1E1207.4−5209 は孤立中性子星で、X 線パルサーである。1984 年に発見され、X 線での位置は赤経:12 時 10 分 00.91 秒、赤緯:−52°26'28.8" (J2000) となり、地球から見てケンタウルス座方向、超新星残骸 G296.5+10.0 の中心付近に存在している。距離は約 6500 光年 (2kpc) で残骸の年齢は 7000 年と考えられている (Helfand & Becker 1984)。以下に観測的な特徴をまとめる。この天体からは長期的にはほぼ定常な X 線をが観測されており、その明るさは 2×10^{-12} erg cm^{-2} s^{-1}(0.4-10.0keV) である。距離を 2kpc とするとその光度は $\sim 1 \times 10^{34}$erg s^{-1} となる。長期的には変動は見られなかったが、詳細な解析の結果、周期的な変動が見つかっている。図 1.14 は 1E1207.4−5209 の光度変動 (ライトカーブ) をフーリエ変換したスペクトル (Zavlin et al. 2000) を示している。

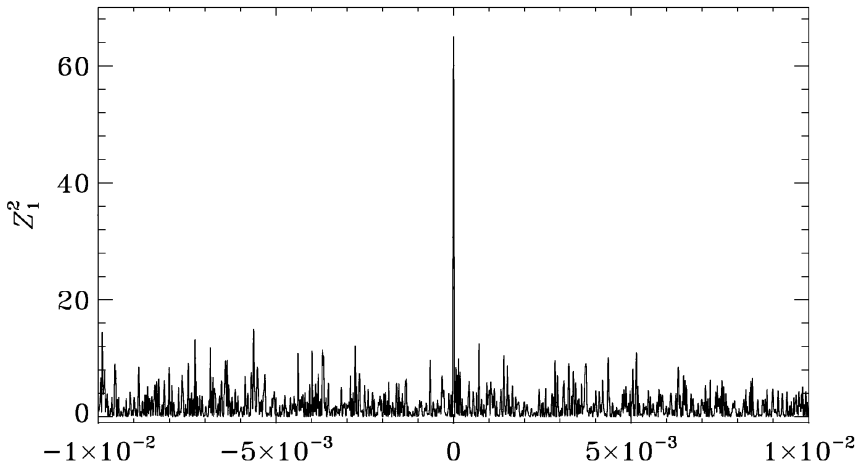

図 1.14: 1E1207.4−5209 の光度変動 (ライトカーブ) をフーリエ変換したスペクトル (Zavlin et al. 2000)。中央付近のピーク部分が周期に対応する。

そのパルス周期 P は ∼0.42413 秒 (Gotthelf et al. 2007) であるが、周期変化率 $\dot{P}$ がかなり小さく $< 2.5 \times 10^{-16}$ s s-1 (2σ) となりここ数十年の間殆ど周期が変化していない。通常の回転駆動型パルサーと同様にこの周期と周期変化率から 1E1207.4−5209 の年齢 $\tau_c \equiv P/2\dot{P}$ を計算してみると 300 Myrs となり超新星残骸 (∼7kyrs) より 4 桁も古くなってしまい、矛盾が生じてしまう。したがって中性子星の回転エネルギーが輻射のエネルギー源と考えることは困難である。この天体は X 線のみで輝き、電波、赤外、可視光、γ 線では対応天体が見つかっていない。ハッブル宇宙望遠鏡と地上の大型望遠鏡によって可視光と赤外領域で詳細な観測が行われたが、検出されず、I 等級は 28.1、R 等級は 27.1、V 等級は 28.0 の上限値が得られた (Luca et al. 2010)。図 1.15 はハッブル宇宙望遠鏡による可視光領域のイメージを示す。

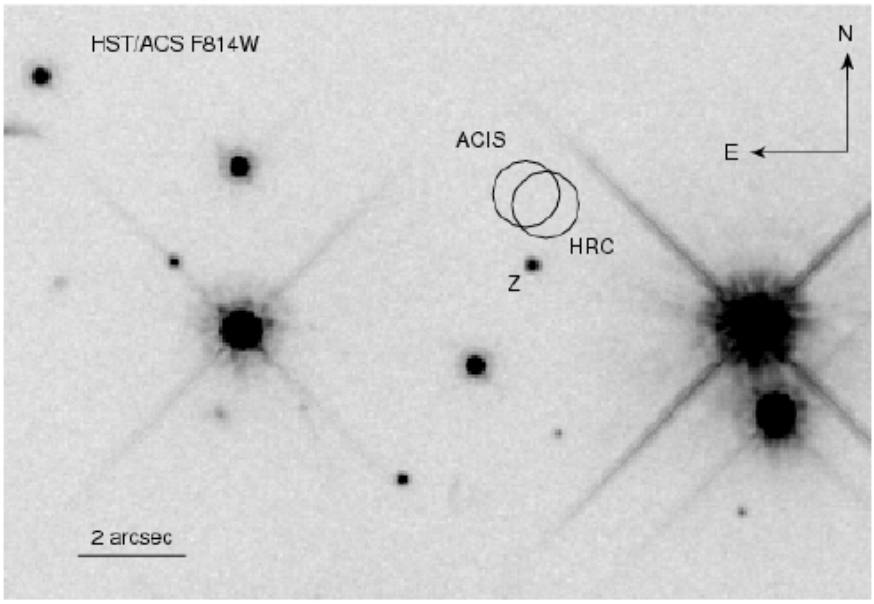

図 1.15: ハッブル宇宙望遠鏡による可視光領域のイメージ (Luca et al. 2010)。中心付近の黒い円が X 線観測衛星によって決められた位置の誤差円を示す。この中に対応する天体は確認出来なかった。

この天体の最も大きな特徴はその X 線スペクトルにある。スペクトルの連続成分は熱的で、2 成分の黒体放射でよく説明できるが、問題なのは 0.7、1.4、2.1、(2.8?)keV に吸収構造が確認されている事である。図 1.16 は XMM-Newton 衛星の X 線スペクトルを示す。0.7keV を始めとして約整数倍の位置に 4 本の吸収構造が確認できる。

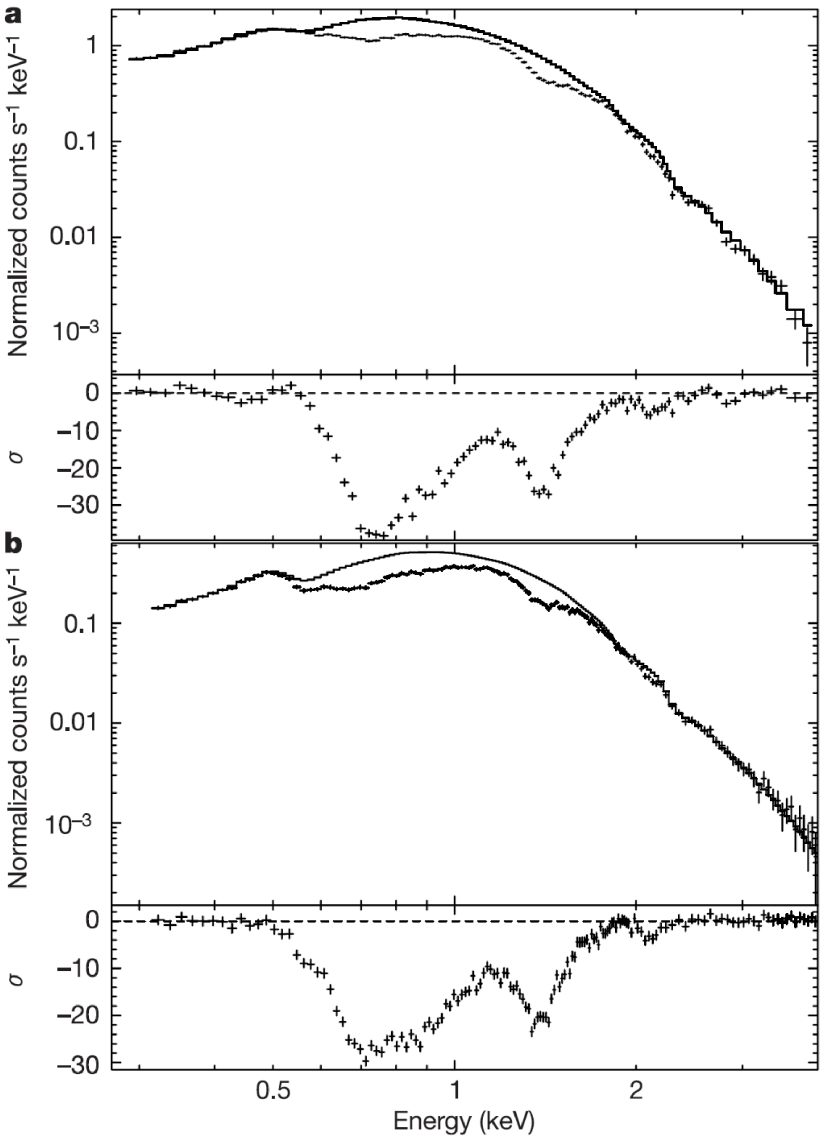

図 1.16: XMM-Newton 衛星の X 線スペクトル。2 つの検出器 (a:MOS、b:pn) のスペクトルが載せてあり、それぞれ上段がスペクトルと連続成分のみのモデル。下段がスペクトルとモデルの残差である。

この吸収構造の原因についてこれまでにいくつかの説が挙げられている。その中でも有力なものがセクション 1.3.1 でも触れたサイクロトロン共鳴散乱線という解釈である。電子のサイクロトロン共鳴散乱であればこの天体の磁場は $B \sim 6 \times 10^{10}$G と計算でき、また、陽子のサイクロトロン共鳴散乱であればその磁場は $B \sim 1.6 \times 10^{14}$G という超強磁場となり、この天体が超強磁場中性子星 (マグネター) と考えられていた (Bignami et al. 2003) 。しかし、3、4 本目の構造は有意ではなく、10^{12}G 程度の磁場中での水素様重元素 (酸素やネオン) イオンによる遷移線による構造という主張もあり (Mori et al. 2005,2006)、未だに吸収構造の正体についてははっきりしていない。これらの吸収構造の原因を調べることがこの天体の正体を探るキーポイントとなっている。

本論文の主な目的はこの吸収構造の原因を探り、1E1207.4−5209 の物理的な構造を考察する事にある。

第2章　「すざく」衛星による観測

1E1207.4−5209 に見られる特徴の物理的解釈を確かにするために日本の X 線天文衛星「すざく」による観測を行った。本章ではすざく衛星による 1E1207.4−5209 の観測と、その解析結果についてまとめている。

2.1　すざく衛星

1E1207.4−5209 を観測するために使用したすざく衛星とは日本第 5 番目の X 線天文衛星である。2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた。図 2.1 に外観図を示す。

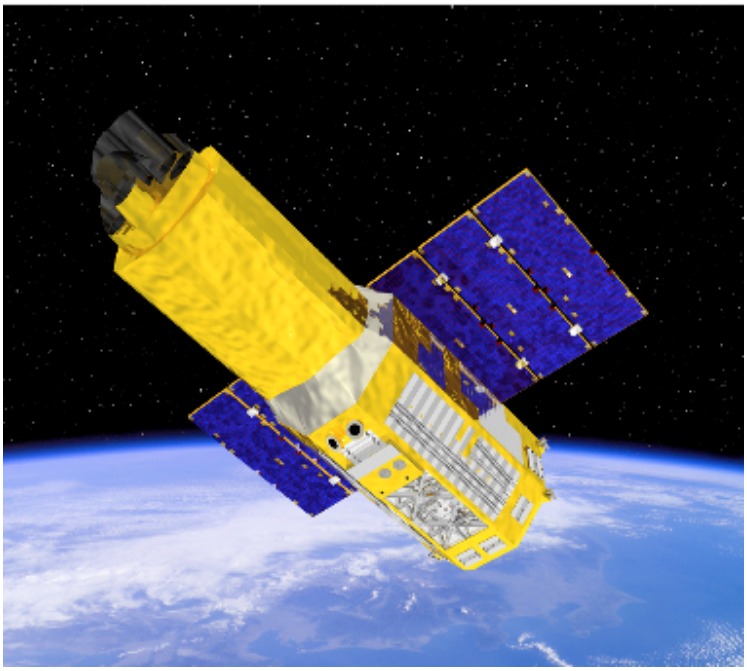

図 2.1: すざく衛星の外観図。

すざく衛星では 3 種の観測装置が動作している。1 つ目が 4 台の X 線 CCD からなる X-ray Imaging Spectrometer(XIS, Koyama et al. 2007) で 0.3-10keV の X 線を検出でき、天体の撮像と X 線スペクトルの取得が可能である。XIS の 4 台のセンサーをそれぞれ XIS0, XIS1, XIS2, XIS3 と呼び、これらは表面照射型 (Frontside Illuminated; FI) と裏面照射型 (Backside Illuminated; BI) に分かれている。XIS0, XIS2, XIS3 の 3 台が FI-CCD、XIS1 が BI-CCD である。XIS の観測モードは、Clock モードと Edit モードという異なる 2 つのモードから成る。Clock モードには CCD の全てのピクセルを 8 秒周期で読み出す Normal と読み出し方向に一定行を加算してから読み出す Parallel-sum (P-sum, 詳細は後のセクションで説明) の 2 通りがある。Edit モードは 1 イベントに対して出力する情報量を決めており、5×5 モード、3×3 モード 2×2 モード等が存在する。これらに加えて、露光時間が短くできる Burst オプションや CCD の特定領域のみを読み出す事が出来る

Window オプションを選択できる。また、X 線イベントが一つのピクセルにとどまる場合と、ピクセル境界付近に入射して 2 つ以上のピクセルにまたがる場合がある。そこで XIS ではそのまたがり方により、イベントを 7 通りのグレードに分類する。通常、解析に用いられるのは Normal モードでは、グレード 0、2、3、4、6、P-sum モードでは、グレード 0、1、2 である。XIS には軌道上でのエネルギー較正のため較正線源が取り付けられている。線源は ^{55}Fe。

2 つ目が 10 ∼ 600keV の広いエネルギー範囲の硬 X 線を高感度で観測できる硬 X 線検出器 Hard X-ray Detector (HXD) である。硬 X 線領域では、天体からの信号はエネルギーに対してべき関数的に減衰するため、バックグラウンドの低減しながら天体の信号を検出できる様、16 本の井戸型フォスイッチカウンター (Well ユニット) を使用し、その周りを BGO 結晶のアンチカウンター (Anti ユニット) 20 本が取り囲んでいる。

Well ユニットの主検出部は PIN 型半導体検出器と GSO シンチレータを重ねることで 10-600keV という広帯域を実現する。また、主検出部の周りのシールド部には深い井戸型をした BGO シンチレータが用いられている。

4 × 4 に並べられた 16 本の Well 検出器が X 線を検出する。10 ∼ 50 keV 程度のエネルギーをもつ X 線は、PIN 型半導体検出器で検出され、40 ∼ 700 keV の X 線は PIN を突きぬけ、GSO 結晶で検出される。バックグラウンド (γ 線や荷電粒子) や視野外からの X 線は BGO によって除去される。また、BGO と GSO のの蛍光減衰時間の違いを利用して、反同時計測によりバックグラウンドを除去する。

Anti 検出器は、厚い (平均 2.6 cm)BGO 結晶とフォトチューブを組み合わせた検出器である。これらを Well ユニットの周辺に 20 本並べることで放射線に対するアクティブシールドの役割を果たす。また、Anti 検出器は大きい有効面積 (X 線、ガンマ線に対する検出感度) を持っているため、あらゆる方向からくる X 線やガンマ線を検出でき、ガンマ線バーストなどトランジェント天体の広帯域全天モニタ Wideband All-sky Monitor(WAM) という、すざく 3 つ目の検出器として使用されている。HXD と WAM の構造を図 2.2 に示す。

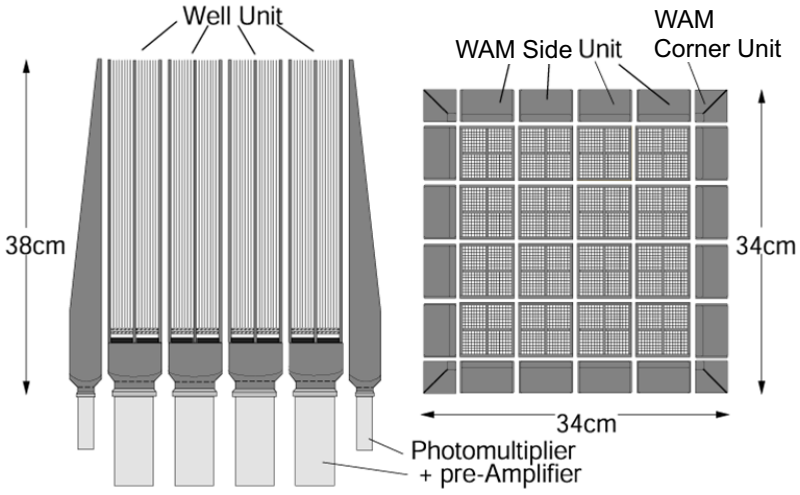

図 2.2: HXD(WAM) の構造図。

すざく衛星の大きな特徴はこれらの検出器を複合して広いエネルギーバンド (0.3keV∼5MeV) を高感度での観測できる事である。表 2.1 にすざく衛星の各検出器のスペックをまとめた。

表 2.1: すざく衛星に搭載の各検出器のスペック。

	検出器	搭載数	観測帯域 (keV)	視野	位置分解能	検出感度
XIS	X-ray CCD	4	0.3-10	0.31 °×0.31 °	0.03 °	∼0.01 mCrab
HXD	Si PIN+GSO	1	10-600	0.56 °×0.56 °	-	∼0.1 mCrab
WAM	BGO	1	100-5000	2 π	-	∼0.1 Crab

2.2 観測

すざくによる 1E1207.4−5209 の観測は 2 回行われた。

最初の観測で Psum モードへの移行がうまく行われずに Psum 観測モードによる観測が短くなってしまったため、後日 2 回目の観測が行われた。観測モードは XIS023(2 回目は XIS03) に関して 1 回目は Normal から P-sum に変更、2 回目は P-sum のみだった。XIS1 に関してはどちらも Normal モード。表 2.2 にすざくによる 1E1207.4−5209 の観測の情報を示す。

表 2.2: すざくの 1E1207.4−5209 観測情報。

	2006 Obs.			2007 Obs.		
Obs. ID Obs. time (UT)	401030010 2006/07/30 13:38 ∼ 2006/08/01 06:15 (146 ksec)			401030020 2007/02/15 05:01 ∼ 2007/02/16 15:20 (124 ksec)		
	XIS0,2,3	XIS1	HXD	XIS03	XIS1	HXD
Net Exposure (ksec)	70.2 (Normal) ↓ 17.9 (P-sum)	102.3 (Normal)	94.0	43.9 (P-sum)	49.8 (Normal)	44.4
Remarks	XIS nominal SCI off			XIS nominal SCI on		

今回の観測の狙いは大きくまとめて 3 つにまとめられる。

- 一つ目はタイミング解析、つまり 1E1207 からの X 線の周期的な変動を検出し、その周期と周期変化率がを求め、それが過去の他の観測のものと比べて変化していないかすること。
- 二つ目はスペクトル解析を行い。すざく衛星の観測でも先行研究と同様な連続成分、吸収構造でスペクトルを説明できるか確かめると共に、吸収構造の原因を突き止めること。
- 三つ目はすざく衛星の特徴である高エネルギー側の X 線放射を観測し、その有無を調べること。

2.3 解析ソフト

解析は最新のソフトウェア等を使用して行った。以下にそれらについてまとめる。

Heasoft Heasoft とは High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (HEASARC) が提供する X 線データ解析に必要な様々なソフトウェア群。`http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software.html` から入手することが出来る。HEASARC とは NASA の一部門で、特に高エネルギー天体物理学に関する研究 データのアーカイブ、ソフトウェア開発などを行っている観測衛星から得られたデータは天体のデータ以外にもノイズを含め様々な情報が含まれている。それらから必要なデータのみを抽出したり、実際にライトカーブやスペクトルの解析を行うソフトウェアが用意されている。

CALDB CALDB とは Calibration Database の略で各検出器の較正情報が含まれている。検出器の較正が進めば、新しい CALDB がリリースされる。検出器の状態によるスペクトルの変化を考慮するための応答関数 (レスポンス) ファイル等もこの中に含まれており、スペクトル解析をする際に各イベント光子のエネルギー較正等に使用する。

DS9 DS9 とは天文学の研究分野で広く使われている画像ビューアー。単に表示するだけでなく、画像の解析や画像から必要な部分の領域の情報を抜き出したりすることが可能である。

2.4 Normal modeデータ解析

ここではNormal modeデータのライトカーブ解析についてまとめる。

2.4.1 一時処理

cleanイベント (解析するために必要な標準的な処理が終わった観測データ) を使用した。プロセスのバージョンは2.0.6.13。cleanイベントのままでは、まだ解析に適さないため、それらに対し以下の処理を行った。

- CALDBに従ってイベントファイルのCTI補正 (放射線損傷による劣化の補償) やエネルギー較正を行うxispiというプログラムをかけ直した。バージョンは2009-02-28。その際に使用したCALDBファイルはae_xi∗_makepi_20111018.fits。
- GTI(Good Time Interval; 各XISが天体を観測している時間) の論理積をとり、GTIのフィルターをかけ、各XISで同じ時間のデータを取り出した。
- そのデータから画像データを作成し、そこから天体領域とバックグラウンド領域を指定してソースイベント (主に天体からのX線) とバックグラウンドイベント (天体以外からのX線) を用意した。
- ソース、バックグラウンド領域のイベントファイルからスペクトルとライトカーブを作成した。ソースイベントからバックグラウンドイベントを差し引くことで天体の正味のX線データが得られる。
- RMF(Redistribution Matrix File、各入射エネルギーにおける波高値の確率分布) ファイルとARF(Angular Response File、有効面積) ファイルを作成しレスポンスファイルを用意した。

2.4.2 解析領域の決定

各XISの画像データから天体領域 (ソース領域) を円状にとり、そのまわりにドーナツ状にバックグラウンド領域をとった。それぞれの領域の中心座標はDETX、DETY方向にヒストグラムを描いてローレンツ関数でフィッティングし決定した。また、領域の半径や内半径、外半径は以下の様に決定した。

= ソース
半径：半値半幅の大きい方の3倍の値
= バックグラウンド
内径：半値半幅の大きい方の6倍の値
外径：半値半幅の大きい方の10倍の値

表2.3に各観測における解析領域の中心座標や半径等をまとめる。

表2.3: 各観測、各XISごとの解析領域の中心座標と半径。DETX、DETYは検出器座標系である。

観測	1st Obs. (2006)				2nd Obs. (2007)
検出器	XIS0	XIS1	XIS2	XIS3	XIS1
中心座標 (DETX,DETY)	505,512	507,517	518,503	503,521	516,509
ソース半径	120	147	123	96	102
バックグラウンド内半径	240	294	246	192	204
バックグラウンド外半径	400	490	410	320	340

各 XIS の画像データと解析領域を図 2.3 から 2.7 に示す。全て DETXDETY 表示で、三つの円は中心からそれぞれソース領域、バックグラウンド領域の内円、外円を表す。

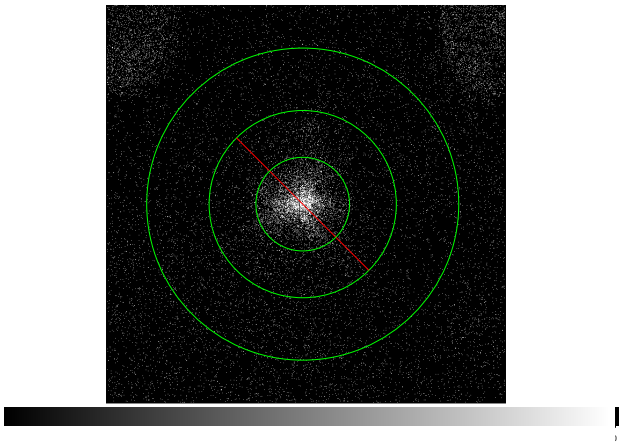

図 2.3: 観測 1 回目の XIS0 の解析領域。

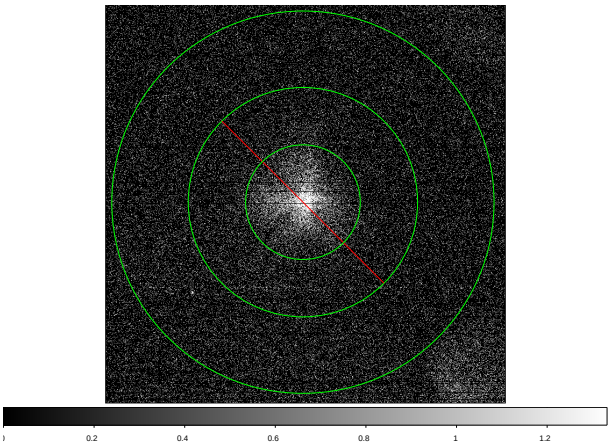

図 2.4: 観測 1 回目の XIS1 の解析領域。

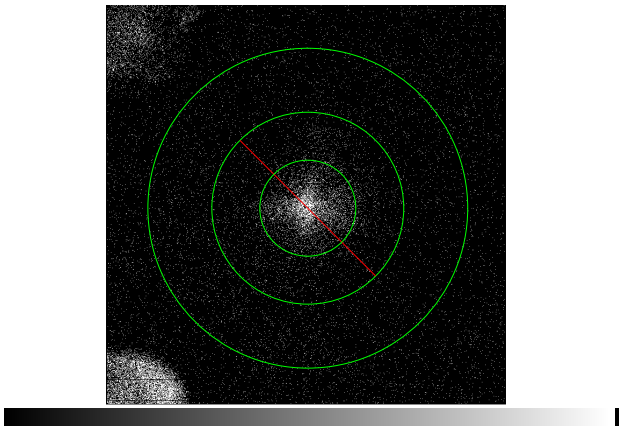

図 2.5: 観測 1 回目の XIS2 の解析領域。

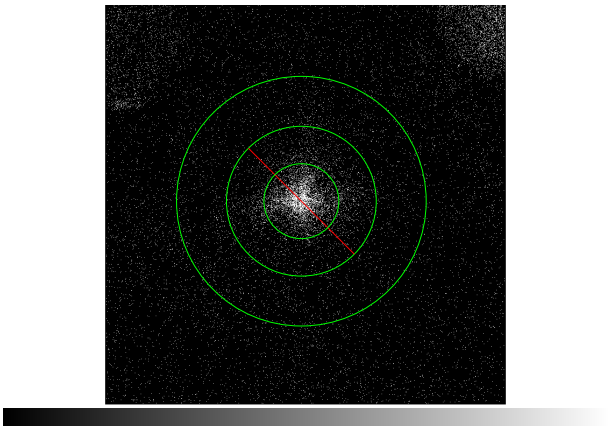

図 2.6: 観測 1 回目の XIS3 の解析領域。

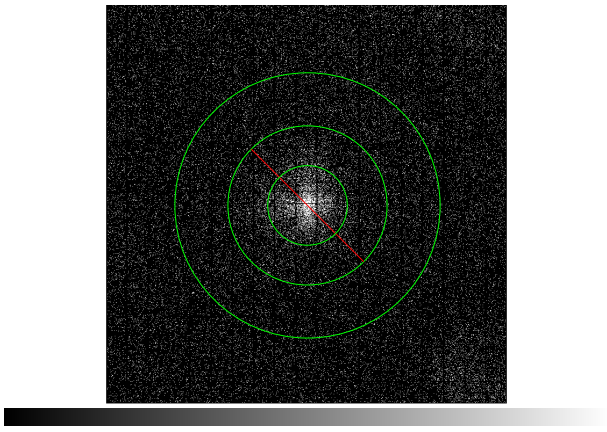

図 2.7: 観測 2 回目の XIS1 の解析領域。

2.5 XIS Normal モード ライトカーブ解析

リダクションによって用意したイベントファイルからライトカーブを作成した。1E1207.4−5209 は暗い天体のためソース領域のライトカーブからバックグラウンド領域のライトカーブを引いた。Normal モードでの観測は観測 1 回目の XIS 全てと観測 2 回目の XIS1 で行われており、1 回目の XIS023 は観測途中で P-sum に移行しているので 1 回目の XIS023 と XIS1 では観測時間が異なる。そこで今回は 1 回目の XIS023 を合わせたもの、1 回目の XIS1、2 回目の XIS1 と 3 つのグループに分けた。また、それぞれのグループについて 0.4keV∼10keV と 0.4keV∼2keV、2keV∼10keV のライトカーブと Hardness ratio(2keV∼10keV/0.4keV∼2keV) を作成した。Hardness ratio とはスペクトルの硬さ (高エネルギー側の強度が低エネルギー側に比べてどれだけ大きいか) の指標であり、高エネルギー側の強度を低エネルギー側の強度で割ったものである。それらを図 2.8 から図 2.10 に示す。

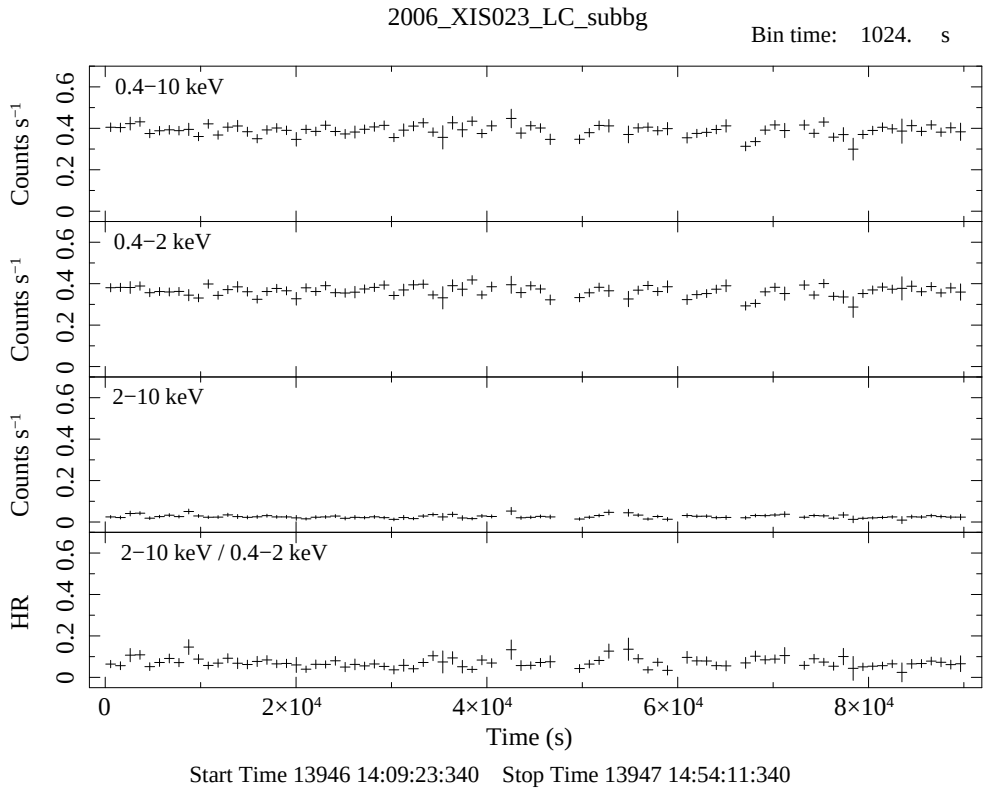

図 2.8: 2006 年観測の XIS0,2,3 を足し合わせたライトカーブと Hardness ratio。

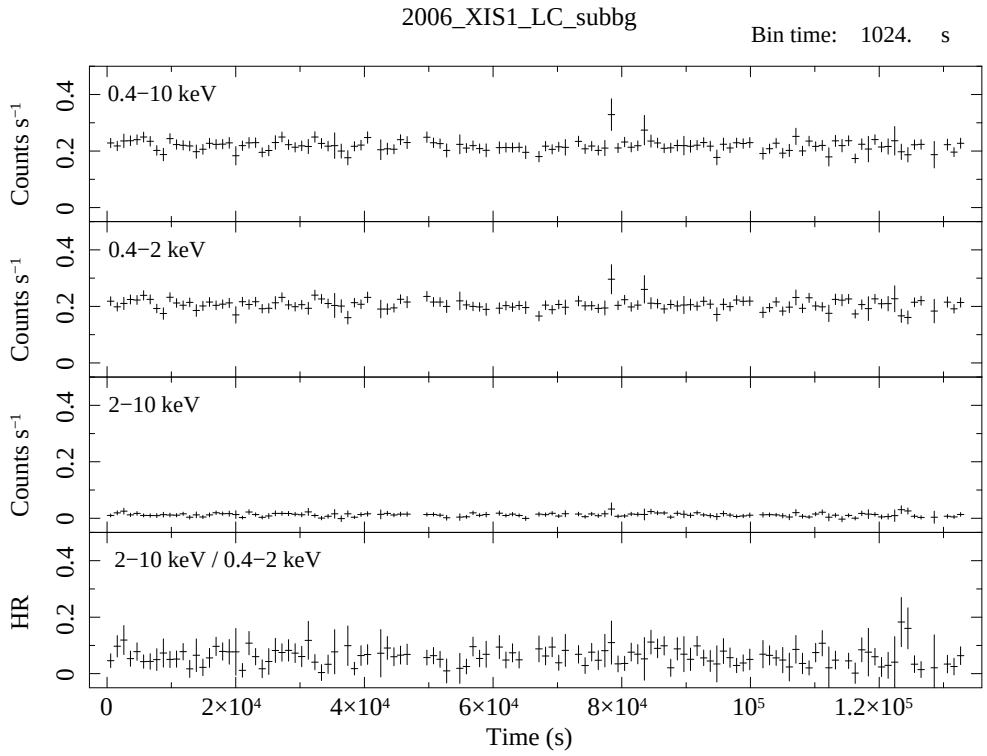

図 2.9: 2006 年観測の XIS1 のライトカーブと Hardness ratio。

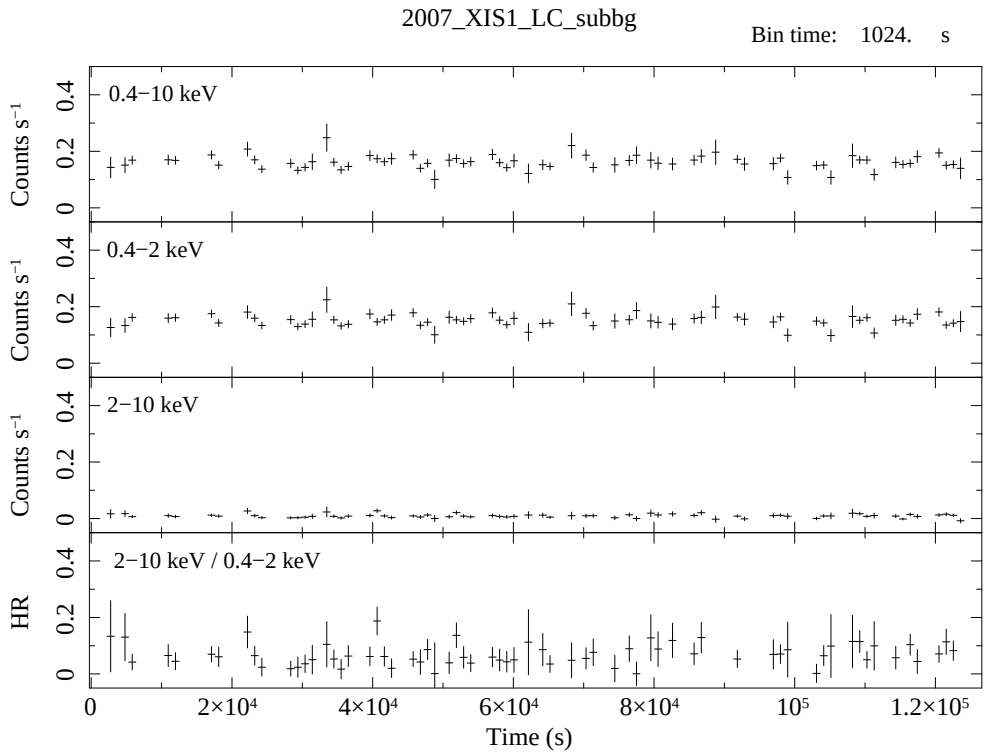

図 2.10: 2007 年観測の XIS1 のライトカーブと Hardness ratio。

これらの内、全エネルギー領域のライトカーブと Hardness ratio について変動しているかどうかを評価した。それぞれに対し、RMS を求めそれを統計誤差と比較することで変動を確かめた。RMS fractional variatio は以下の様に計算した。

```
AVE = Average (c/s)
STD = Standard Deviation (c/s)
STD^2 = Variance (c/s)**2 ：データのばらつきから推定した分散
EXP = Expected Variance ((c/s)**2 :(必要に応じて、デッドタイムの影響を補正した)newbin のカウントレートの中でそれらのエラーから評価された一定のソースの場合に期待される分散。つまりライトカーブが一定の明るさと仮定した場合の分散。
```

とすると、

$$\mathrm{RMSfractionalvariation} = \frac{\sqrt{\mathrm{STD}^2 - \mathrm{EXP}}}{\mathrm{AVE}} \tag{2.1}$$

しかし、もし Variance が Expected Variance より小さかった場合は 99.86%の信頼水準での 3 シグマアッパーリミットを与える。また Variance と Expected variance にはガウシアンエラーがつく。この値に平均値をかけることで RMS が求められる。また統計誤差として標準偏差の 3 倍 (3σ) を使用した。表 2.4 に各ライトカーブ、Hardness ratio についての変動の評価結果まとめる。

表 2.4: 各グループのライトカーブ、、Hardness ratio についての lcstats の結果等。

Obs.	1st Obs.				2nd Obs.	
Detector	XIS023 LC	XIS023 HR	XIS1 LC	XIS1 HR	XIS1 LC	XIS1 HR
No. of Newbins	81	81	120	117	69	65
Average (c/s)	0.390±0.003	0.071±0.003	0.218±0.002	0.061±0.004	0.162±0.003	0.069±0.007
Standard Deviation (c/s)	0.026	0.023	0.020	0.031	0.024	0.038
Minimum (c/s)	0.300	0.024	0.174	0.002	0.101	0.661E-03
Maximum (c/s)	0.448	0.146	0.329	0.183	0.248	0.187
Variance (1E-03(c/s)**2)	0.692±0.110	0.542±0.086	0.405±0.053	0.933±0.120	0.596±0.100	1.466±0.260
Expected Variance (1E-03(c/s)**2)	0.697±0.110	0.665±0.110	0.501±0.065	1.933±0.250	0.477±0.082	2.902±0.510
Chi-Square/d.o.f.	69.5/80	66.0/80	59.2/119	56.5/116	47.2/68	32.8/64
Chi-Square Prob of constancy	0.79236	0.87030	1.00000	1.00000	0.97401	0.99958
RMS fractional variation	< 0.050	< 0.308	< 0.081	< 0.710	< 0.079	< 0.821
RMS	< 0.020	< 0.022	< 0.018	< 0.043	< 0.013	< 0.057
Statistical error (3σ)	0.079	0.070	0.060	0.092	0.073	0.115

表 2.4 を見ると、全ての場合に置いて、RMS が統計誤差を下回る。これによりこの時間ビン (1024 秒) において全エネルギー領域のライトカーブと Hardness ratio が変動していないことを確認した。

2.6 XIS Normal モード スペクトル解析

ここでは Normal モードのスペクトルの解析についてまとめる。先行研究で確認されている 0.7keV から 2.8keV までの吸収構造を確認するために、XIS の Normal モードデータからスペクトルを作成し、モデルとの χ^2 フィッティングを行った。スペクトルデータのリダクション方法に関してはセクション 2.4.1、2.4.2 とほぼ同じだが、使用するエネルギーは 0.2 から 10keV としている。

2.6.1 スペクトル

2006 年の XIS023 を足し合わせたもの、2006 年の XIS1、2007 年の XIS1 それぞれについて、ソース領域とバックグラウンド領域のスペクトルをそれぞれ以下に示す。横軸にエネルギーを示す channel、縦軸に BACKSCAL の値で補正した Counts をとっている。それぞれ赤がソース領域、緑がバックグラウンド領域のスペクトルを示す。

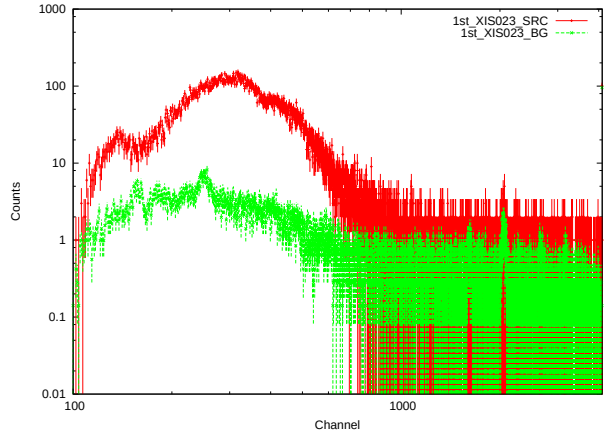

図 2.11: 1 回目の観測の XIS023 を足し合わせたデータにおけるソース領域とバックグラウンド領域のスペクトル。

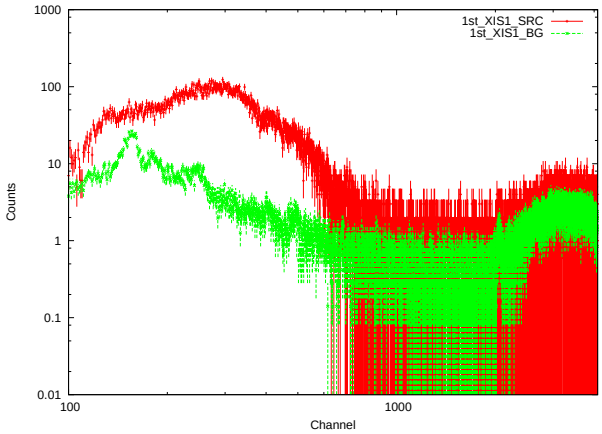

図 2.12: 1 回目の観測の XIS1 データにおけるソース領域とバックグラウンド領域のスペクトル。

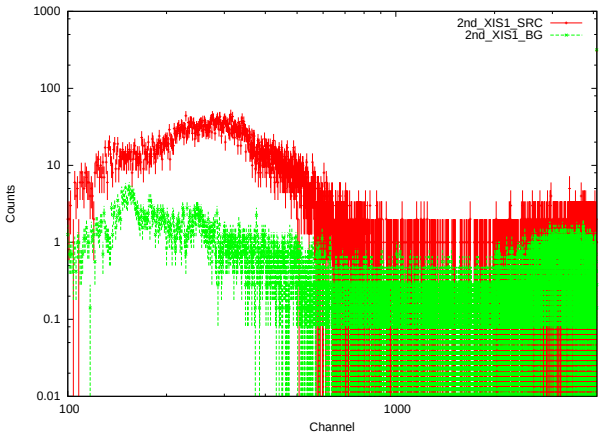

図 2.13: 2 回目の観測の XIS1 データにおけるソース領域とバックグラウンド領域のスペクトル。

2.6.2 フィッティングモデル

スペクトルフィッティングに使用したモデルは大まかに分けると星間吸収と連続成分、吸収構造に分かれる。まず連続成分については黒体放射 (bbodyrad)、べき関数 (powerlaw)、cutoffpl モデルを単体または組み合わせてフィッティングを行った。また、吸収構造にはガウス型のものを使用した。

ここで各モデルについて簡単にまとめる。

wabs(星間吸収)

X 線が星間物質によって受ける光電吸収のモデル。

$$A(E) = N \times \exp(-N_H \times \sigma_{ph}(E)) \tag{2.2}$$

N: 規格化係数
σ_{ph}: 光電吸収断面積 [cm^2]
N_H: 水素柱密度 [cm^{-2}]

bbodyrad(黒体放射)

温度による X 線放射のモデル

$$A(E) = \frac{K \times 1.0344 \times 10^{-3} E^2 dE}{\exp(E/kT) - 1} \tag{2.3}$$

kT: 温度 [keV]
K: 規格化係数
ただし、このモデルの場合、$K = R_{km}^2/D_{10}^2$ となり、R_{km}^2 はソースの半径 (km 単位) で D_{10}^2 はソースまでの距離 (10kpc 単位)

powerlaw(べき関数)

単純なべき乗分布モデル

$$A(E) = KE^{-\alpha} \tag{2.4}$$

K: 規格化係数
α: べき指数

cutoffpl

高エネルギー側で指数関数的に落ち込むべき乗分布モデル

$$A(E) = KE^{-\alpha} \exp(-\frac{E}{\beta}) \tag{2.5}$$

α: べき指数
β: 折れ曲がるエネルギー [keV]
K: Photons/keVcm^{2}s @1keV

gabs(断面積がガウス関数型の吸収構造)

$$A(E) = N \times \exp\left[-\frac{\tau}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-0.5\left(\frac{E - E_0}{\sigma}\right)^2\right\}\right] \tag{2.6}$$

N: 規格化係数
E_0: 吸収構造の中心エネルギー [keV]
σ: 吸収構造の幅 [keV]
$\tau/\sqrt{2\pi}\sigma$: ライン中心における光学的深さ

サイクロトロン共鳴散乱 (電子)

スペクトルの吸収線の原因はサイクロトロン共鳴散乱であると考えられている。以下にその原理についてまとめる。

磁場内の非相対論的な荷電粒子のエネルギー準位は以下の式で表される (Landau & Lifshitz 1969)。

$$E = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{e\hbar}{mc}B - \frac{\mu\sigma}{s}B + \frac{P_z^2}{2m} \tag{2.7}$$

電子の場合は各パラメーターは以下の様になる。

スピン成分: $\sigma = \pm\frac{1}{2}$
スピンの値: $s = \frac{1}{2}$
磁気モーメント: $\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e c}$
磁場方向の角運動量: $P_z = 0$

これらを代入すると、エネルギーは以下の様になる。

$$E_n = \left(n' + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\right)\frac{e\hbar B}{m_e c} = n\frac{e\hbar B}{m_e c} \tag{2.8}$$

つまり非相対論的電子は整数倍のランダウ準位 $En(n$=0,1,2...) を持つ。また、電子は進行方向と磁場の両方に垂直な方向の力 (ローレンツ力) を受けて円運動 (一般的には螺旋運動) している。これがサイクロトロン運動で、この様な電子群の中を X 線が通るとき電子の準位の差 $\Delta E_m(m$=1,2,3..) のエネルギーを持つ X 線は吸収され、電子の準位が上がる。そして準位が戻る際に等方的に光子を放出する。そのため、視線方向の ΔE_m のエネルギー光子の数が減る。En がハーモニック (倍波) であるからその差 ΔE_m も整数倍となり、スペクトルの整数倍エネルギーの部分に吸収構造が観測される。これがサイクロトロン共鳴による吸収である。

次の図は Be 星 (スペクトル中に水素の輝線を持つ B 型主系列星) と中性子星の連星 4U 0115+63 の X 線スペクトルである (Santangelo et al. 1999)。この吸収構造の中心エネルギーは 12.74, 24.16, 35.74, and 49.5 keV で 1:1.9:2.8:3.9 とほぼ整数倍の関係であり、これがサイクロトロン共鳴による吸収であると考えられている。

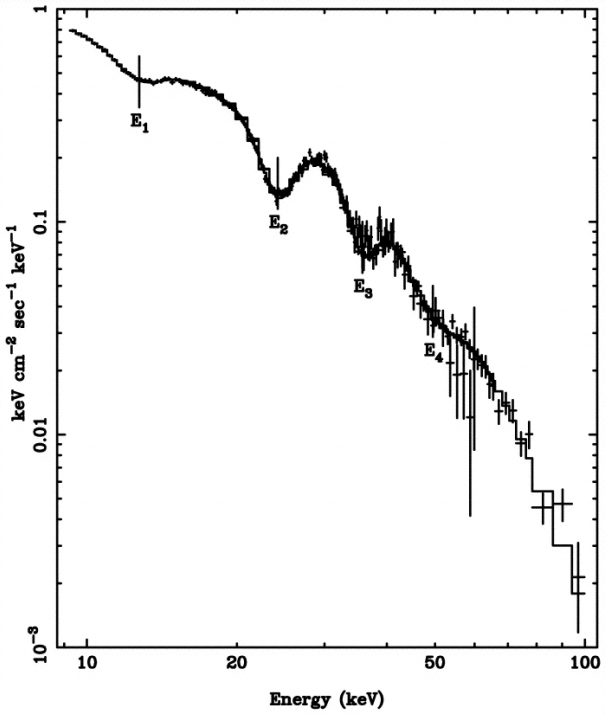

図 2.14: 4U 0115+63 の X 線スペクトル (Santangelo et al. 1999)。その中心エネルギーが整数倍の吸収構造が確認できる。

サイクロトロン共鳴散乱 (陽子)

陽子によるサイクロトロン共鳴の場合、異常磁気モーメントにより各パラメータは

スピン成分: $\sigma = \pm\frac{1}{2}$
スピンの値: $s = \frac{1}{2}$
磁気モーメント: $\mu_p = 2.793\frac{e\hbar}{2m_pc}$
B 方向の角運動量: $P_z = 0$

となる。スピンの成分以外を代入するとエネルギーは以下の様になる。

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} - 2.793\sigma\right)\frac{e\hbar B}{m_pc} \tag{2.9}$$

この式の係数は n と σ の値によって以下の様になる。

	$\sigma = \frac{1}{2}$	$\sigma = -\frac{1}{2}$
$n = 0$	1.8965	-0.8965
$n = 1$	2.8965	0.1035
$n = 2$	3.8965	1.1035
$n = 3$	4.8965	2.1035
$n = 4$	5.8965	3.1035

よってエネルギー準位 ($E_{n,\sigma}$) の大小関係は次に様になる。

$$E_{1,-\frac{1}{2}} < E_{2,-\frac{1}{2}} < E_{0,+\frac{1}{2}} < E_{3,-\frac{1}{2}} < E_{1,+\frac{1}{2}} < E_{4,-\frac{1}{2}} < E_{2,+\frac{1}{2}} .... \tag{2.10}$$

$E_{0,-\frac{1}{2}}$ の場合は係数がマイナスになってしまうので除外すると、$E_{1,-\frac{1}{2}}$ がもっともエネルギーが低い基底状態となる。このエネルギー準位間の差がサイクロトロン共鳴による吸収構造の中心エネルギーになる。基底状態と各準位間のエネルギー差の係数は以下の通り。

$$
\begin{aligned}
E_{3,-\frac{1}{2}} - E_{0,+\frac{1}{2}} &= 0.207 \\
E_{0,+\frac{1}{2}} - E_{2,-\frac{1}{2}} &= 0.793 \\
E_{2,-\frac{1}{2}} - E_{1,-\frac{1}{2}} &= 1 \\
E_{0,+\frac{1}{2}} - E_{1,-\frac{1}{2}} &= 1.793 \\
E_{3,-\frac{1}{2}} - E_{1,-\frac{1}{2}} &= 2 \\
E_{1,+\frac{1}{2}} - E_{1,-\frac{1}{2}} &= 2.793 \\
E_{4,-\frac{1}{2}} - E_{1,-\frac{1}{2}} &= 3 \\
E_{2,+\frac{1}{2}} - E_{1,-\frac{1}{2}} &= 3.793
\end{aligned}
$$

つまり陽子の場合のサイクロトロン共鳴のエネルギーの比率は

1:3.831:4.831:8.662:9.662:13.493:14.4928:18.3237....
または
0.261:1:1.261:2.261:2.522:3.522:3.783:4.783....
または
0.207:0.793:1:1.793:2:2.793:3:3.793....
または
0.115:0.442:0.558:1:1.115:1.558:1.673:2.115....
.
.
.

となる。以下に各エネルギー準位と準位差の比率をまとめた図を示す。

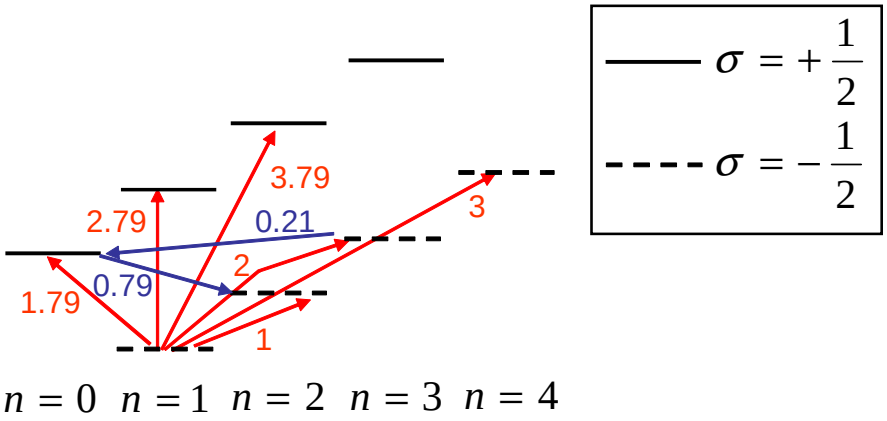

図 2.15: n と σ によって決まるエネルギー準位とその差の比。矢印の数字は基底状態から第一励起準位への遷移を 1 とした場合の比率。

電子と陽子の場合で吸収構造の中心エネルギーの比率は異なるため、どちらがより良くスペクトルを説明できるか確認出来ればどちらによるものか結論付けられる。

2.6.3 スペクトルフィッティング

次にフィッティングの方針と結果についてまとめる。スペクトルデータは観測した年で次の 2 つのグループに分かれる。

グループ 1: 2006 年の XIS023 を足し合わせたスペクトルと 2006 年の XIS1 のスペクトル
グループ 2: 2007 年の XIS1 のスペクトル

本論文では各グループについて以下の様にフィッティングを進めた。

- 星間吸収と連続成分のみでフィッティング。
- 電子のサイクロトロン共鳴散乱を仮定して、吸収構造を 1 本ずつ追加しながらフィッティング。追加した吸収構造の順番は 1.4keV、0.7keV、2.1keV の順。
- 陽子のサイクロトロン共鳴散乱を仮定して、吸収構造 5 本を入れてフィッティング。吸収構造の比率は固定した。

基本的なフィッティング

まず、星間吸収と連続成分のみの場合と、電子のサイクロトロン共鳴散乱を仮定した吸収構造 2 本までの各場合のフィッティングを行った。それらの結果 ($\chi^2/d.o.f$ と probability) をまとめると、以下の表 2.6.3 の様になった。詳しいフィッティングパラメータ等は付録 E.1 にまとめている。連続成分と吸収構造の数で場合分けをしている。$d.o.f$ は自由度である。

吸収線	連続成分			2006 $\chi^2/d.o.f$	2007 $\chi^2/d.o.f$	2006 prob.	2007 prob.
無し	bbodyrad			1348.3/428(3.15)	351.3/217(1.62)	8.0e-96	2.1e-08
		powerlaw		1252.5/428(2.93)	330.1/217(1.52)	8.0e-82	1.1e-06
			cutoffpl	1121.5/427(2.63)	308.0/216(1.43)	8.9e-64	3.9e-05
	2bbodyrad			1129.9/426(2.65)	308.2/215(1.43)	4.0e-65	3.1e-05
	bbodyrad	powerlaw		1146.3/426(2.69)	314.1/215(1.46)	2.3e-67	1.2e-05
	bbodyrad		cutoffpl	1095.2/425(2.58)	302.3/214(1.41)	1.2e-60	6.6e-05
1 本	bbodyrad			839.9/425(1.98)	242.9/214(1.14)	1.6e-29	8.5e-02
		powerlaw		1015.8/425(2.39)	280.1/214(1.31)	2.6e-50	1.6e-03
			cutoffpl	795.4/424(1.88)	239.3/213(1.12)	5.8e-25	1.1e-01
	2bbodyrad			727.4/423(1.72)	228.1/212(1.08)	1.8e-18	2.1e-01
	bbodyrad	powerlaw		630.1/423(1.49)	208.3/212(0.98)	2.3e-10	5.6e-01
	bbodyrad		cutoffpl	630.2/422(1.49)	208.3/211(0.99)	1.9e-10	5.4e-01
2 本	bbodyrad			667.6/422(1.58)	211.5/211(1.00)	2.3e-13	4.8e-01
		powerlaw		537.6/422(1.27)	195.7/211(0.93)	1.1e-04	7.7e-01
			cutoffpl	509.9/421(1.21)	183.7/210(0.87)	1.9e-03	9.1e-01
	2bbodyrad			500.7/420(1.19)	184.9/209(0.88)	4.1e-03	8.8e-01
	bbodyrad	powerlaw		524.5/420(1.25)	188.0/209(0.90)	3.8e-04	8.5e-01
	bbodyrad		cutoffpl	495.6/419(1.18)	183.1/208(0.88)	5.8e-03	8.9e-01

連続成分が bbodyrad+bbodyrad と bbodyrad+cutoffpl、吸収構造が 2 本の場合が良くスペクトルを説明出来ている。

3 本目の吸収構造は有意か?

2 本吸収構造を入れた場合でのスペクトルとフィッティングモデルの残差には先行研究でも触れられている 2.1keV の吸収構造が存在する様に見えた。そこで 3 本目の吸収構造を入れてフィッティングを行った。連続成分は bbodyrad+bbodyrad と bbodyrad+cutoffpl について試した。フィッティングの結果、2 つのモデル共にスペクトルを良く説明でき、$\chi^2/d.o.f$ 及び probability は吸収構造が 2 本の場合に比べて改善した。以下に、各連続成分の場合のフィッティング結果をまとめる。

wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs*gabs

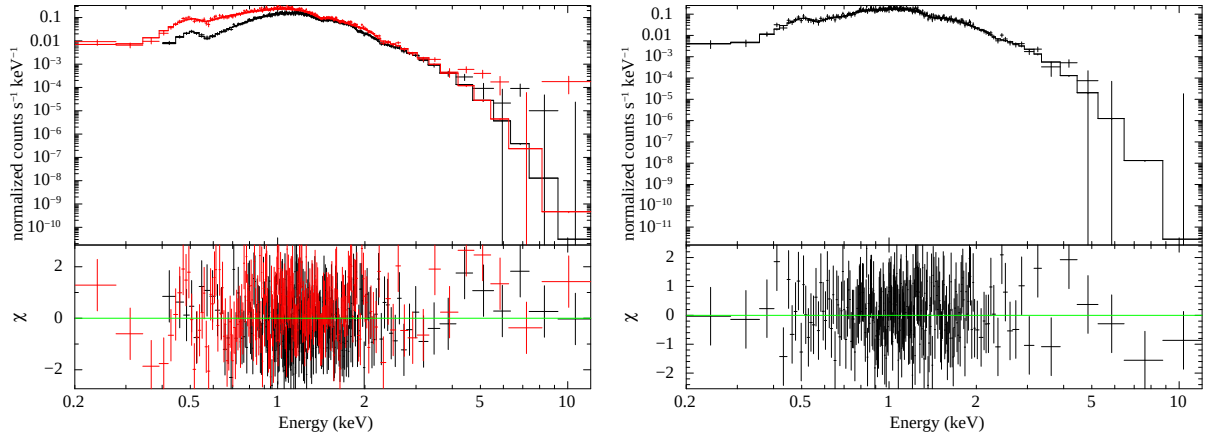

図 2.16: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

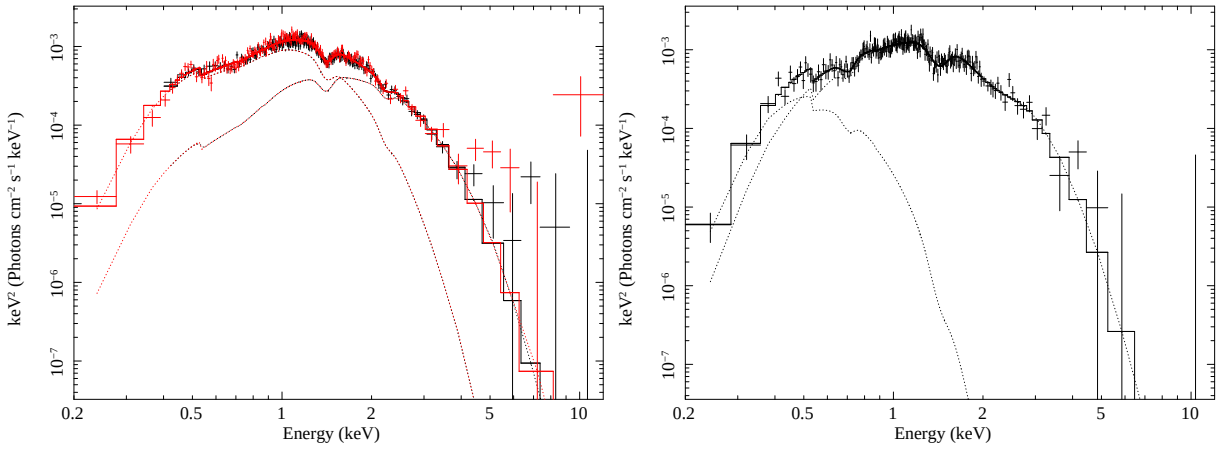

図 2.17: $\nu F\nu$ スペクトル。これはスペクトルをべき指数 2、規格化係数 1 の powerlaw に従うデータで割ったもので、装置の有効面積や応答関数の影響を除去することができる。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

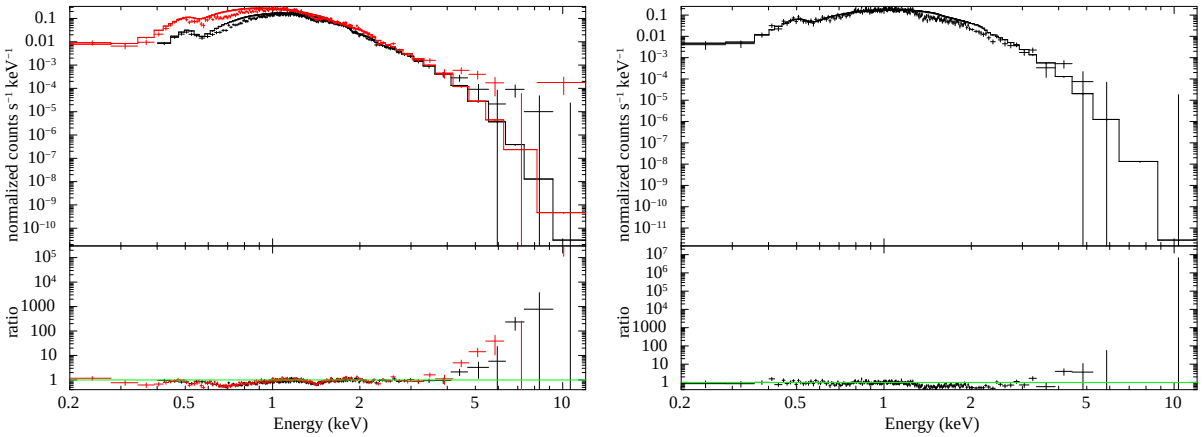

図 2.18: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。残差はフルスケール。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

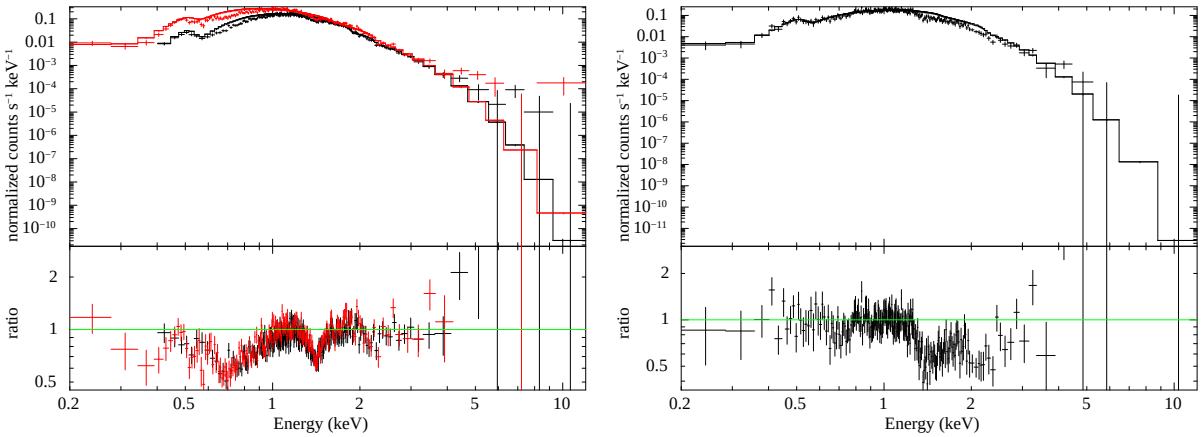

図 2.19: 図 2.18 の残差のスケールを調整したもの。

表 2.5: 連続成分に 2 温度黒体放射、吸収構造が 3 本の場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.07\ ^{+0.04}_{-0.02}$	$0.10\ ^{+0.07}_{-0.04}$
bbodyrad	kT	keV	$0.21\ ^{+0.03}_{-0.05}$	$0.09\ ^{+0.03}_{-0.02}$
bbodyrad	norm	—	$146\ ^{+465}_{-59}$	$2111\ ^{+10760}_{-1792}$
bbodyrad	norm	km♯	$2.4\ ^{+2.5}_{-0.6}$	$9.2\ ^{+13.5}_{-5.6}$
bbodyrad	kT	keV	$0.36\ ^{+0.06}_{-0.03}$	$0.30\ ^{+0.02}_{-0.01}$
bbodyrad	norm	—	$5.1\ ^{+7.1}_{-3.6}$	$38.\ 0^{+13.5}_{-8.2}$
bbodyrad	norm	km♯	$0.5\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$1.2\ ^{+0.2}_{-0.1}$
gabs	LineE	keV	$0.71\ ^{+0.02}_{-0.06}$	$0.70\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	$0.17\ ^{+0.06}_{-0.03}$	$0.03\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.21\ ^{+0.03}_{-0.07}$	$0.03\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.407\ ^{+0.009}_{-0.008}$	$1.420\ ^{+0.028}_{-0.023}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.10\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.15\ ^{+0.07}_{-0.05}$
gabs	LineE	keV	$2.23\ ^{+0.07}_{-0.06}$	$2.15\ ^{+0.17}_{-0.13}$
gabs	Sigma	keV	$0.09\ ^{+0.06}_{-0.04}$	$0.41\ ^{+0.29}_{-0.14}$
gabs	Tau	—	$0.06\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.64\ ^{+0.95}_{-0.30}$
$\chi^2/d.o.f$			487.51/417(1.17)	173.16/206(0.84)
Null hypothesis probability			9.67E-03	9.53E-01
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.15E-12 $^{+2.10E-15}_{-6.27E-13}$	2.17E-12 $^{+4.10E-14}_{-3.86E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.14E-12 $^{+5.60E-15}_{-7.09E-13}$	2.16E-12 $^{+3.35E-14}_{-3.96E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(bbodyrad+cutoffpl)*gabs*gabs*gabs

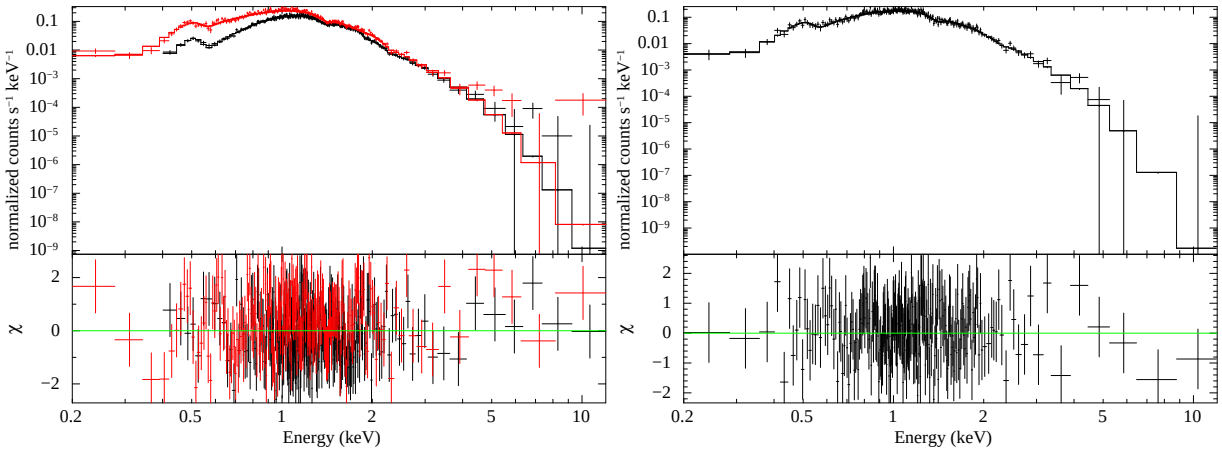

図 2.20: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

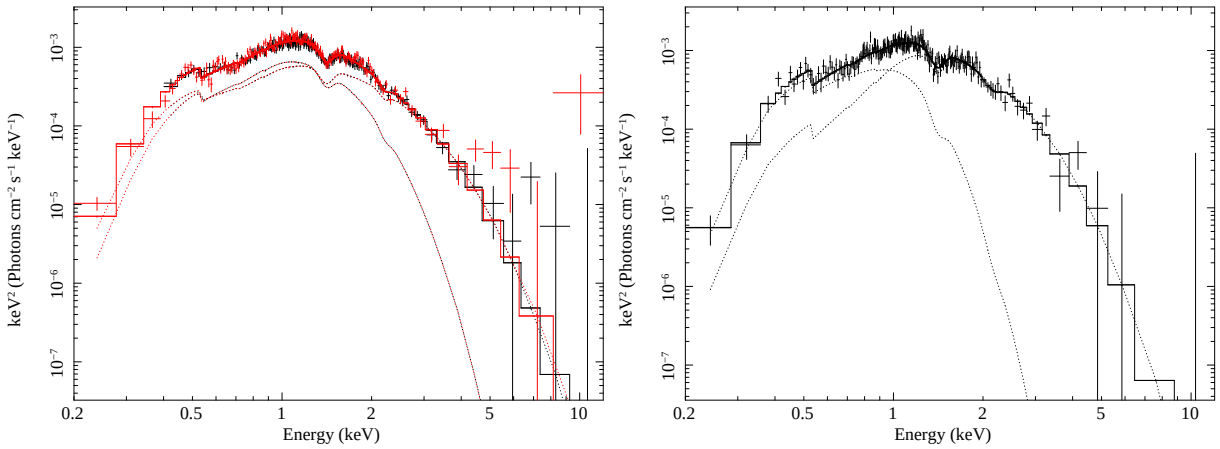

図 2.21: $\nu F\nu$ スペクトル。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

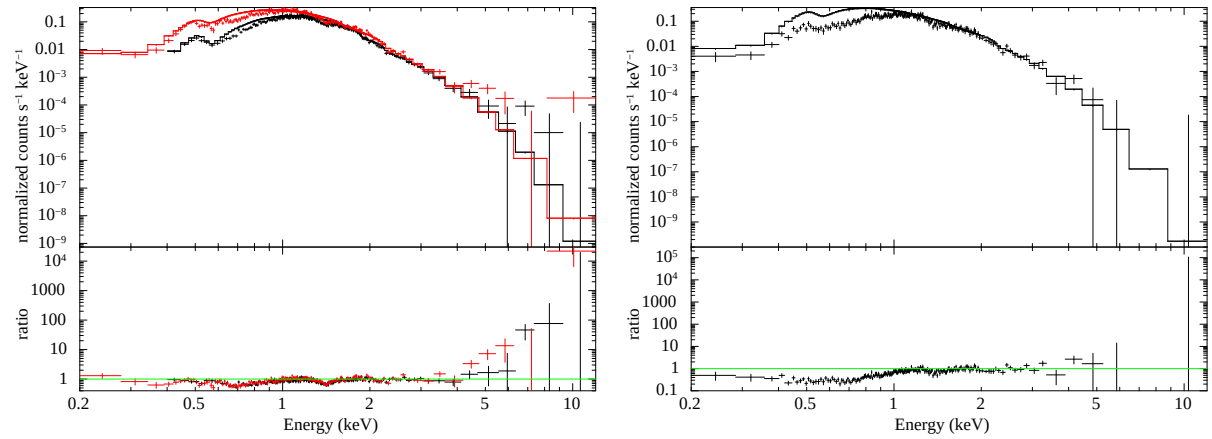

図 2.22: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。残差はフルスケール。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

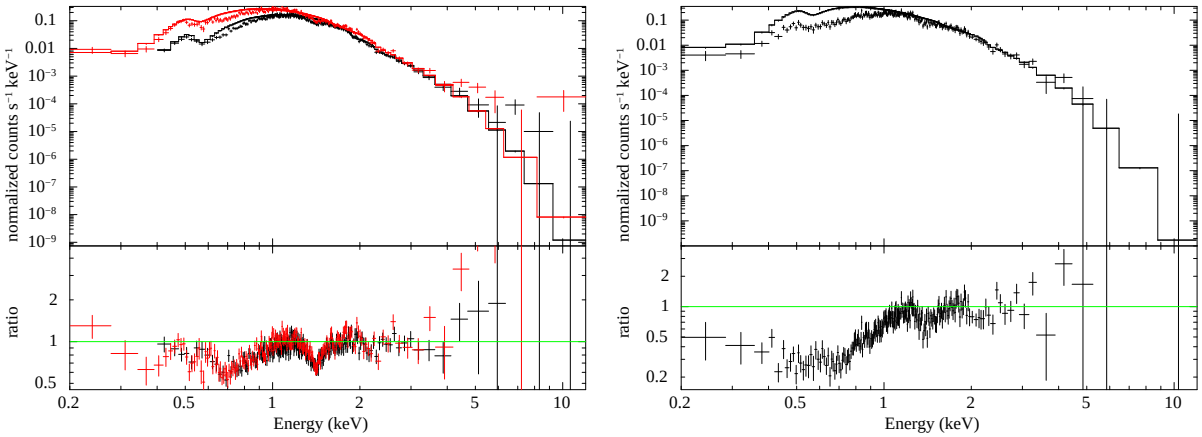

図 2.23: 図 2.22 の残差のスケールを調整したもの。

表 2.6: 連続成分に 2 温度黒体放射、吸収構造が 3 本の場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	10^{22}cm^{-2}	$0.09\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.12\ ^{+0.07}_{-0.04}$
bbodyrad	kT	keV	$0.22\ ^{+0.02}_{-0.07}$	$0.13\ ^{+0.05}_{-0.13}$
bbodyrad	norm	—	$75.9\ ^{+42.9}_{-21.6}$	$3032\ ^{+6967}_{-3032}$
		km$^\sharp$	$1.7\ ^{+0.4}_{-0.3}$	$11.0\ ^{+9.0}_{-11.0}$
cutoffpl	PhoIndex	—	$0.56\ ^{+0.97}_{-0.97}$	$-0.07\ ^{+2.70}_{-0.30}$
cutoffpl	HighECut	keV	$0.58\ ^{+0.30}_{-0.13}$	$0.44\ ^{+0.40}_{-0.15}$
cutoffpl	norm	—	$4.1\text{E-}03\ ^{+5.4E-03}_{-2.6E-03}$	$0.012\ ^{+4.2E-03}_{-6.7E-03}$
gabs	LineE	keV	$0.70\ ^{+0.03}_{-0.05}$	$0.57\ ^{+0.21}_{-0.11}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.27\ ^{+0.13}_{-0.13}$
gabs	Tau	—	$0.19\ ^{+0.24}_{-0.06}$	$0.94\ ^{+1.92}_{-0.76}$
gabs	LineE	keV	$1.409\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$1.406\ ^{+0.025}_{-0.021}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.07\ ^{+0.04}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.09\ ^{+0.05}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$2.22\ ^{+0.07}_{-0.08}$	$2.15\ ^{+0.14}_{-0.11}$
gabs	Sigma	keV	$0.09\ ^{+0.06}_{-0.08}$	$0.13\ ^{+0.15}_{-0.11}$
gabs	Tau	—	$0.04\ ^{+0.04}_{-0.02}$	$0.10\ ^{+0.11}_{-0.08}$
$\chi^2/d.o.f$			484.40/416(1.16)	176.75/205(0.86)
Null hypothesis probability			1.14E-02	9.24E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	$2.15\text{E-}12\ ^{+4.75E-14}_{-5.14E-13}$	$2.17\text{E-}12\ ^{+3.05E-12}_{-2.06E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	$2.14\text{E-}12\ ^{+6.66E-14}_{-3.92E-13}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+2.43E-12}_{-1.67E-12}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

$\sharp$ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

陽子サイクロトロン共鳴の吸収構造を入れた場合

セクション 2.6.2 で示した様に陽子サイクロトロン共鳴の場合は吸収構造の中心エネルギーが 1 : 1.793 : 2 : 2.793 : 3…の比率になるはずである。そこでこの比率で固定して gabs を入れた。また最初は gabs の sigma も固定した。結果は 2,4 本目の吸収構造の深さが極端に小さくなってしまい、誤差を考慮すると 1.793 の 2.793 比率に対応する。

次に条件を弱くして比率のみ固定した。フィッティングの結果、2、4 本目は幅が広く、浅くなり連続成分の様になった。しかも $\chi^2/d.o.f$ や probability は電子を仮定した場合より大きくなり、スペクトルをうまく説明できない。

まとめると陽子のサイクロトロン共鳴の場合に存在するはずの 2,4 本目 (1.793 の 2.793 比率) の吸収構造は無い方が $\chi^2/d.o.f$ の値は小さくなり、probability は大きくなる。つまり、陽子によるサイクロトロン共鳴散乱は棄却できる。

吸収構造のパラメータ

様々な連続成分と吸収構造の本数を試した結果、連続成分には 2 温度黒体放射、吸収構造が 3 本が最も良くスペクトルを説明できる事が分かった。吸収構造の中心エネルギーの比率は 2 温度黒体放射で吸収構造が 3 本の場合以下の様になった。

表 2.7: 吸収構造の中心エネルギー

	2006 年	2007 年
1st LineE [keV]	$0.705\ ^{+0.024}_{-0.057}$	$7.029\text{E-}01\ ^{+2.705E-02}_{-2.654E-02}$
2nd LineE [keV]	$1.407\ ^{+0.009}_{-0.008}$	$1.420\text{E+}00\ ^{+2.777E-02}_{-2.258E-02}$
3rd LineE [keV]	$2.227\ ^{+0.065}_{-0.059}$	$2.149\text{E+}00\ ^{+1.651E-01}_{-1.270E-01}$

Parameter errors are 90% confidence.

どちらの観測についてもそのエネルギーの比は約 1:2:3 となった。陽子のサイクロトロン共鳴散乱を仮定した場合のフィッティングでは説明できなかった事も踏まえれば電子によるサイクロトロン共鳴散乱によるものであると考えられる。

また、電子のサイクロトロン共鳴散乱と仮定して、その基本波 (1 本目) の中心エネルギーから磁場 B を計算すると $B \sim 5.8 \times 10^{10}$ G となり、先行研究と同程度となった。

Deep1st と *Shallow1st*

2006 年のスペクトルでの吸収構造のベストフィットパラメータでは、先行研究と同様に 1 本目 (0.7keV) の深さが深く、2 本目、3 本目と浅くなっていたが、それに対して 2007 年のベストフィットパラメータはそれとは逆に 1 本目 (0.7keV) の深さが浅く、2 本目、3 本目の方が深くなっていた。

そこで先行研究で見られる様な 1 本目 (0.7keV) の吸収構造が最も深く、2 本目、3 本目とだんだん浅くなるものを *Deep1st* と定義し、今回のすざく 2007 年のスペクトルに見られるベストフィットパラメータの様に 1 本目 (0.7keV) の深さが浅く、2 本目、3 本目の方が深くなっているものを *Shallow1st* と定義する。

この天体について、*Shallow1st* の様なパラメータのとり方はこれまでの先行研究では報告されておらず、本論文で初めて求められたものである。これは連続成分のモデルパラメータに依存している。すざく衛星は他の X 線観測衛星に比べより高エネルギー側まで感度があるため、この様な連続成分が得られたと考えられる。

吸収構造が *Shallow1st* になる事は理論的にはまったく不思議ではない。理論的サイクロトロン共鳴散乱線の数値計算の結果、磁場方向と視野方向のなす角によって基本波の深さが浅くなる、つまり *Shallow1st* になる事が示唆されている (Mészáros & Nagel 1985, 図 2.24)。今回の 2007 年すざく衛星のスペクトルフィッティングの結果は同様の事を示していると考えられる。詳しくは第 4 章の議論参照。

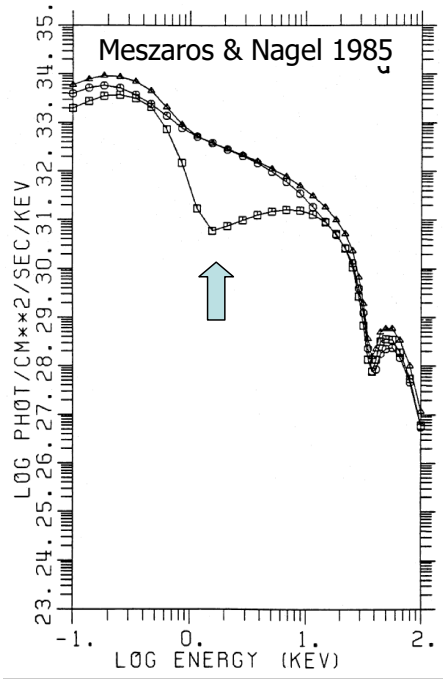

図 2.24: 数値計算によって求められたサイクロトロン共鳴散乱による吸収構造 (Mészáros & Nagel 1985)。各線は磁場方向と視野方向のなす角が異なる場合を表す。矢印の部分が基本波の部分に対応する。

3 つ目の連続成分の可能性

2 温度黒体放射に 3 本の吸収構造が存在するモデル (wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs*gabs) 等について、2006 年のデータでは高エネルギー側でスペクトルとモデルの残差が大きくなっていた (図 2.18)。もしかしかすると他に連続成分があるかもしれないと考えて 3 つ目の連続成分として powerlaw を足してフィッティングを行った。吸収はガウス型吸収構造。2006 年、2007 年どちらも調査した。フィッティングの結果 powerlaw を連続成分に追加した方が $\chi^2/d.o.f$ の値は小さくなる。しかし高エネルギー側のスペクトルの統計が悪いため、べきや Normalization のエラー範囲は大きく、powerlaw を入れても入れなくてもほぼ変わらない。以下にフィッティング結果を示す。

wabs(bbodyrad+bbodyrad+powerlaw)*gabs*gabs*gabs

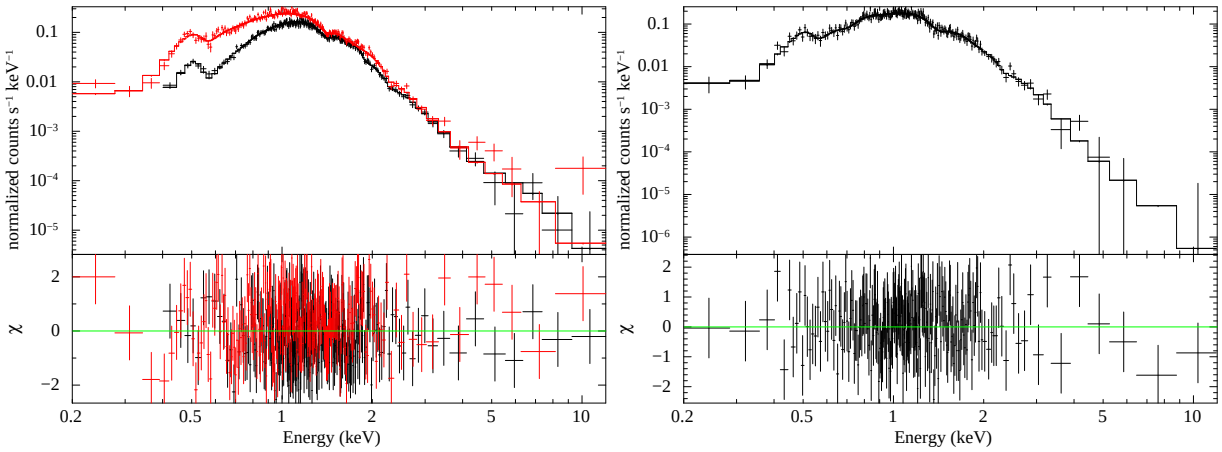

図 2.25: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

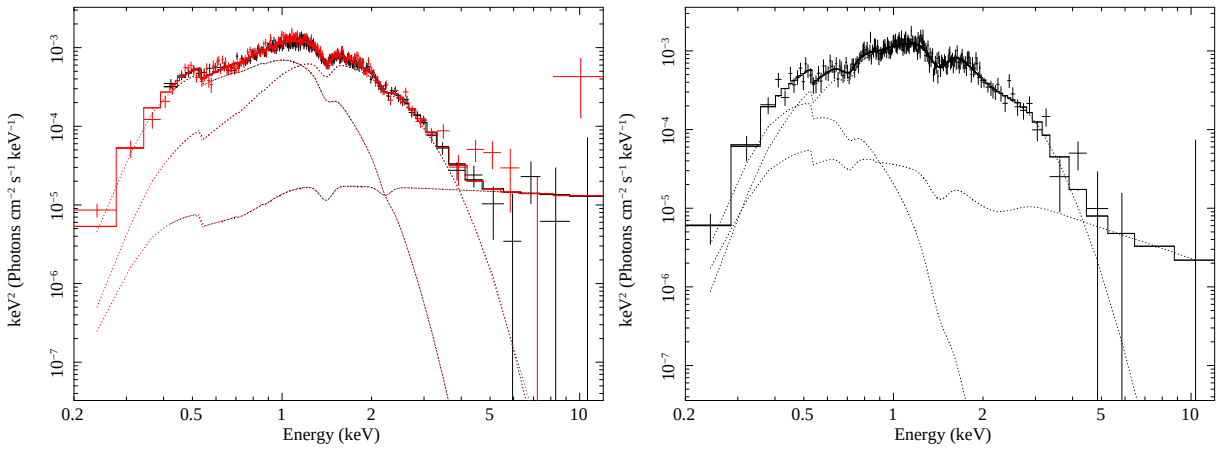

図 2.26: $\nu F\nu$ スペクトル。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

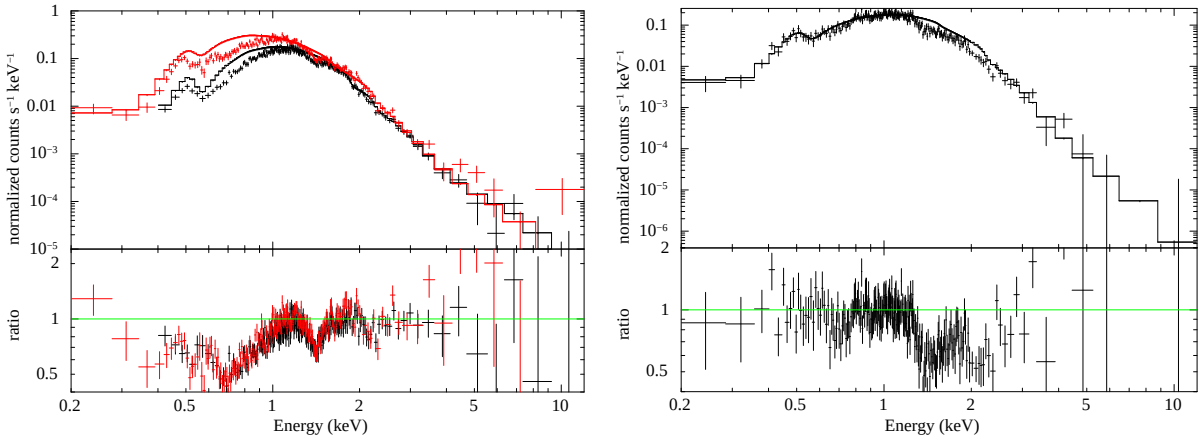

図 2.27: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

表 2.8: 連続成分に 2 温度黒体放射とべき乗関数、吸収構造が 3 本の場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.09\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.11\ ^{+0.07}_{-0.05}$
bbodyrad	kT	keV	$0.17\ ^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09\ ^{+0.10}_{-0.09}$
bbodyrad	norm	—	$387\ ^{+473}_{-241}$	$2087\ ^{+39210}_{-209}$
		km♯	$3.9\ ^{+1.9}_{-1.5}$	$9.1\ ^{+31.5}_{-9.1}$
bbodyrad	kT	keV	$0.317\ ^{+0.026}_{-0.009}$	$0.296\ ^{+0.019}_{-0.018}$
bbodyrad	norm	—	$14.5\ ^{+7.3}_{-7.2}$	$39.8\ ^{+14.7}_{-9.7}$
		km♯	$0.8\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$1.3\ ^{+0.2}_{-0.2}$
powerlaw	PhoIndex	—	$2.19\ ^{+1.30}_{-2.03}$	$3.33\ ^{+5.11}_{-3.67}$
powerlaw	norm	—	$2.02\text{E-}05\ ^{+1.31E-04}_{-1.96E-05}$	$4.75\text{E-}05\ ^{+3.38E-04}_{-4.75E-05}$
gabs	LineE	keV	$0.67\ ^{+0.04}_{-0.10}$	$0.70\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	$0.20\ ^{+0.09}_{-0.05}$	$0.03\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.33\ ^{+0.81}_{-0.15}$	$0.03\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.406\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$1.421\ ^{+0.023}_{-0.018}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.10\ ^{+0.02}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.15\ ^{+0.05}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$2.22\ ^{+0.06}_{-0.05}$	$2.13\ ^{+0.16}_{-0.11}$
gabs	Sigma	keV	$0.10\ ^{+0.05}_{-0.04}$	$0.38\ ^{+0.20}_{-0.13}$
gabs	Tau	—	$0.06\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.54\ ^{+0.64}_{-0.32}$
$\chi^2/d.o.f$			472.70/415(1.14)	172.91/204(0.85)
Null hypothesis probability			2.62E-02	9.44E-01
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.17\text{E-}12\ ^{+3.46E-14}_{-1.48E-12}$	$2.18\text{E-}12\ ^{+2.66E-11}_{-2.03E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+4.69E-14}_{-8.22E-13}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+2.65E-11}_{-2.43E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Shallow1st で 2006 年すざくスペクトルをフィッティング

グループ 1(2006 年) についても *Shallow1st* の解釈でスペクトルを説明できるかフィッティングによって調査した。モデルは wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs*gabs とし、powerlaw 成分が無い場合と有る場合で試した。その結果、powerlaw 成分無し、有り共にスペクトルを良く説明できた。powerlaw 成分ありの方が多少 $\chi^2/d.o.f$ の値が小さい。ただし *Deep1st* と比べると $\chi^2/d.o.f$ の値は大きい。

wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs*gabs

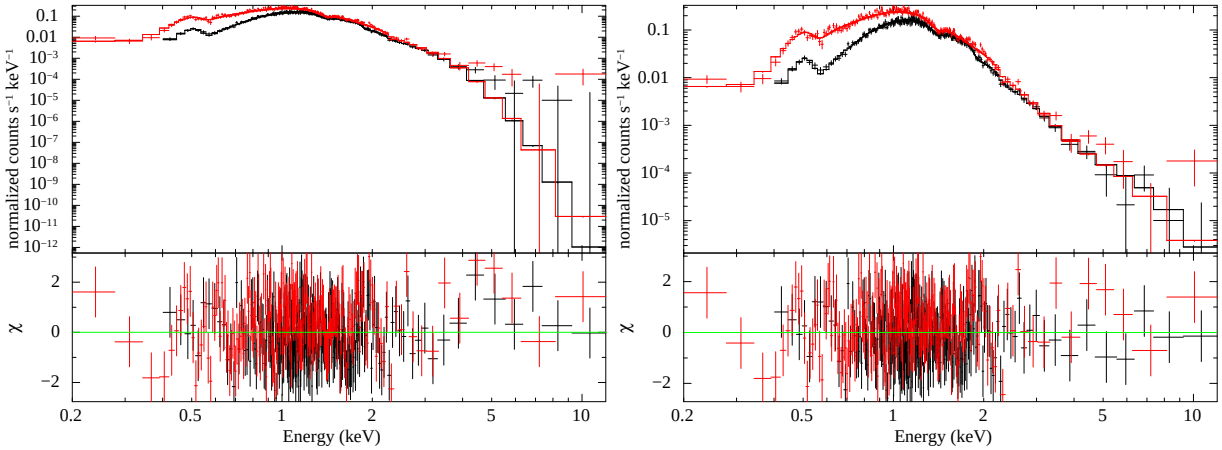

図 2.28: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。赤いデータが XIS1、黒いデータが XIS0,2,3 を足し合わせたもの。左側が powerlaw 成分無し、右側が powerlaw 成分有り。

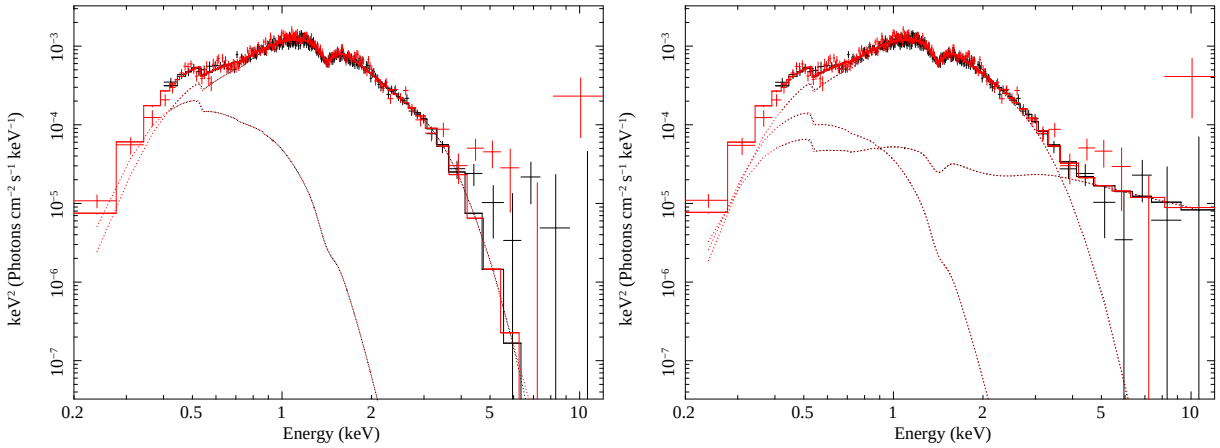

図 2.29: $\nu F\nu$ スペクトル。左側が powerlaw 成分無し、右側が powerlaw 成分有り。

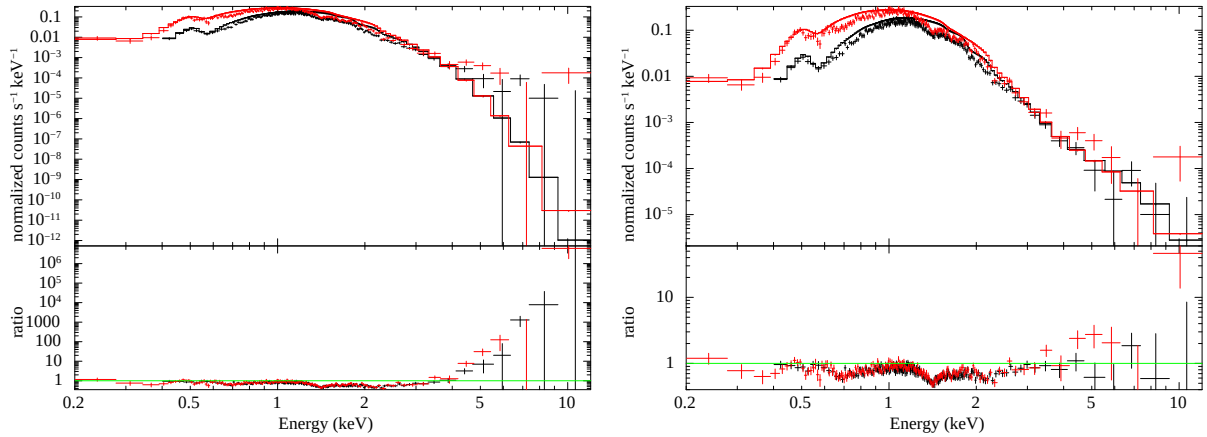

図 2.30: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。残差はフルスケール。左側が powerlaw 成分無し、右側が powerlaw 成分有り。

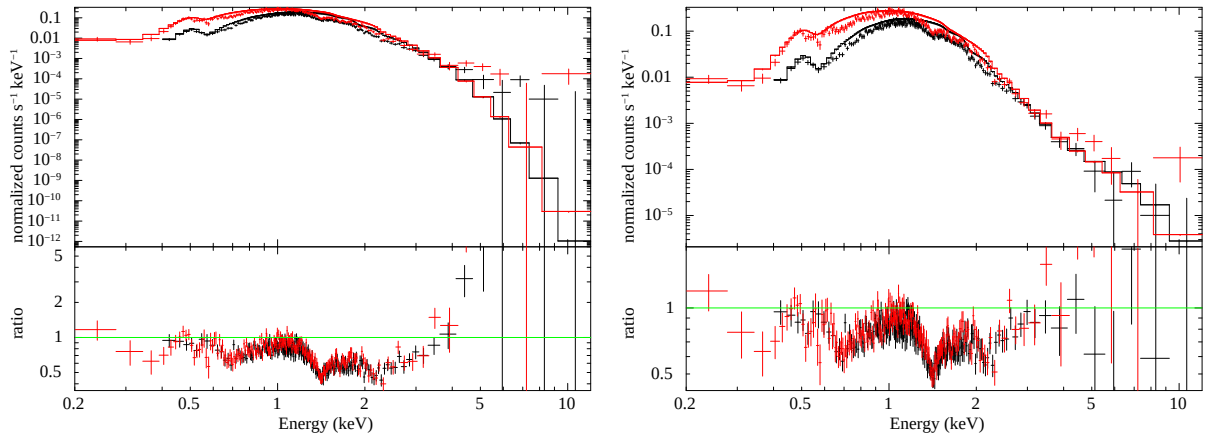

図 2.31: 図 2.30 の残差のスケールを調整したもの。左側が powerlaw 成分無し、右側が powerlaw 成分有り。

表 2.9: 連続成分に 2 温度黒体放射、吸収構造が 3 本で *Shallow1st* の場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年 (powerlaw 無し)	2006 年 (powerlaw 有り)
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.03}$
bbodyrad	kT	keV	$0.11\ ^{+0.06}_{-0.02}$	$0.11\ ^{+0.08}_{-0.08}$
bbodyrad	norm	—	$525\ ^{+1304}_{-299}$	$442\ ^{+292}_{-199}$
		km$^\sharp$	$4.6\ ^{+4.0}_{-1.6}$	$4.2\ ^{+1.2}_{-1.1}$
bbodyrad	kT	keV	$0.302\ ^{+0.014}_{-0.007}$	$0.281\ ^{+0.012}_{-0.008}$
bbodyrad	norm	—	$39.4\ ^{+1.7}_{-3.2}$	$50.7\ ^{+5.0}_{-3.0}$
		km$^\sharp$	$1.26\ ^{+0.03}_{-0.05}$	$1.42\ ^{+0.07}_{-0.04}$
powerlaw	PhoIndex	—	—	$2.94\ ^{+0.47}_{-1.86}$
powerlaw	norm	—	—	$7.5\mathrm{E}{-05}\ ^{+1.5E-04}_{-6.1E-05}$
gabs	LineE	keV	$0.71\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.71\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Sigma	keV	$0.14\ ^{+0.01}_{-0.03}$	$0.14\ ^{+0.01}_{-0.04}$
gabs	Tau	—	$0.11\ ^{+0.03}_{-0.05}$	$0.12\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.411\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$1.409\ ^{+0.009}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$2.20\ ^{+0.08}_{-0.06}$	$2.04\ ^{+0.12}_{-0.09}$
gabs	Sigma	keV	$0.64\ ^{+0.07}_{-0.07}$	$0.60\ ^{+0.17}_{-0.12}$
gabs	Tau	—	$1.09\ ^{+0.07}_{-0.22}$	$0.66\ ^{+0.08}_{-0.26}$
$\chi^2/d.o.f$			509.13/417(1.22)	491.00/415(1.18)
Null hypothesis probability			1.33E-03	5.95E-03
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.15\mathrm{E}{-12}\ ^{+2.22E-13}_{-7.77E-13}$	$2.17\mathrm{E}{-12}\ ^{+2.71E-12}_{-5.74E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.14\mathrm{E}{-12}\ ^{+2.835E-13}_{-8.325E-13}$	$2.13\mathrm{E}{-12}\ ^{+2.09E-12}_{-5.74E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

吸収成分は 2 温度黒体放射のどちらにかかっているか?

すざくで観測した 1E1207.4−5209 のスペクトルが 2 温度黒体放射と 3 本の吸収構造で良く合うことが分かったが、これまでに吸収構造が 2 つの黒体放射成分の内どちらにかかるのかは調査していなかった。両方の黒体放射成分にかかる場合は今までのフィッティング方法で検証したので、低温側黒体放射成分にかかる場合、高温側黒体放射成分にかかる場合の 2 種類について調査した。

モデルパラメータは *Deep1st* と *Shallow1st* 両方で試し、吸収構造は 3 本の場合でフィッティングを行った。ただし、2007 年については *Deep1st* ではスペクトルを説明できなかったので *Shallow1st* のみ採用した。また、連続成分に powerlaw を追加したものも調査した。

もし *Shallow1st* モデルが正しくて、2 つの黒体放射がそれぞれ星全体と極付近に対応するのであれば、サイクロトロン共鳴が起こるのは一般的に極付近なので吸収構造は高エネルギー側の黒体放射成分にしかかからないはずである。

以下に各場合のフィッティング結果をまとめた。

Deep1st **wabs(bbodyrad*gabs*gabs*gabs+bbodyrad)**

Deep1st で低温側の黒体放射成分に吸収構造が存在する場合では 1.4,2.1keV の吸収構造の深さが大きくなりすぎてしまった。これは低温側の BB の強度が 1keV 以上で高温側の黒体放射成分以下になってしまうためと考えられる。これを防ぐために低温側の温度をあげてみたが、低温側の温度のエラーが高温側の温度まで広がってしまった。また $\chi^2/d.o.f$ も 1.27 以下にならず、スペクトルを説明できなかった。

Deep1st **wabs(bbodyrad+bbodyrad*gabs*gabs*gabs)**

Deep1st で高温側の黒体放射成分に吸収構造が存在する場合ではパラメータを自由に変化させた場合、*Shallow1st* モデルに落ち着いてしまった。そこである程度パラメータを制限してフィッティングした。その結果を以下に示す。

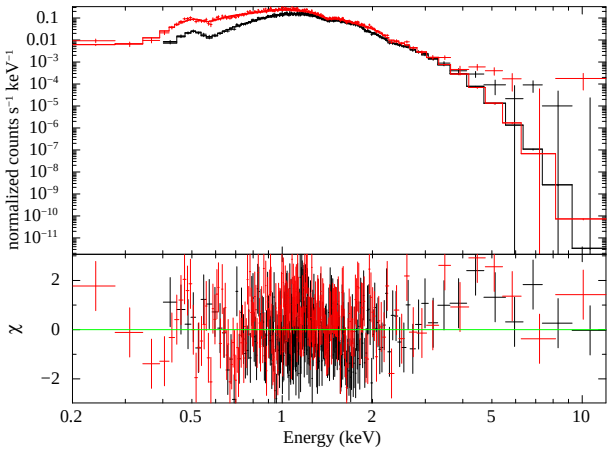

図 2.32: 2006 年のスペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。赤いデータが XIS1、黒いデータが XIS0,2,3 を足し合わせたもの。

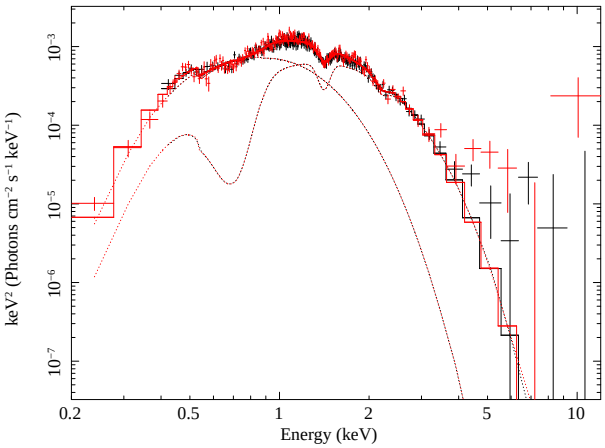

図 2.33: 2006 年の $\nu F\nu$ スペクトル。

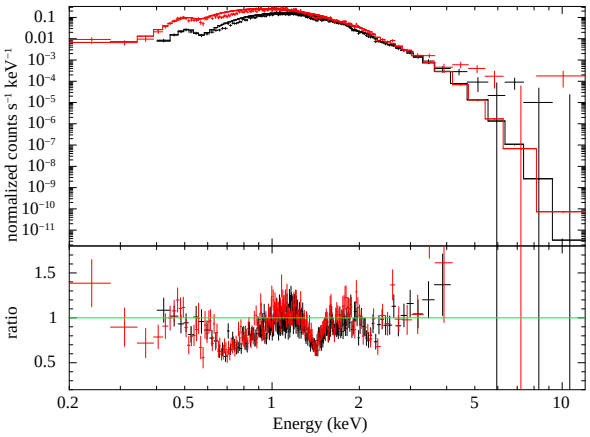

図 2.34: 2006 年のスペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。

表 2.10: 連続成分に 2 温度黒体放射、吸収構造が 3 本、*Deep1st* で高温側黒体放射成分のみに吸収構造が存在する場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.072\ ^{+0.018}_{-0.017}$
bbodyrad	kT	keV	$0.196\ ^{+0.008}_{-0.006}$
bbodyrad	norm	—	$128\ ^{+56}_{-23}$
		km$^\sharp$	$2.3\ ^{+0.5}_{-0.2}$
bbodyrad	kT	keV	$0.33\ ^{+0.01}_{-0.01}$
bbodyrad	norm	—	$12.1\ ^{+0.6}_{-0.5}$
		km$^\sharp$	$0.70\ ^{+0.02}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$0.70\ ^{+0.02}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	$0.11\ ^{+0.02}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.73\ ^{+0.22}_{-0.20}$
gabs	LineE	keV	$1.411\ ^{+0.008}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.05}$
gabs	LineE	keV	$2.21\ ^{+0.04}_{-0.05}$
gabs	Sigma	keV	$0.11\ ^{+0.08}_{-0.04}$
gabs	Tau	—	$0.08\ ^{+0.03}_{-0.02}$
$\chi^2/d.o.f$			529.76/417(1.27)
Null hypothesis probability			1.46E-04
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.14E-12 $^{+9.69E-14}_{-1.09E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.13E-12 $^{+9.00E-14}_{-1.10E-12}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Shallow1st **wabs(bbodyrad*gabs*gabs*gabs+bbodyrad)**

Shallow1st で低温側の黒体放射成分に吸収構造が存在する場合ではスペクトルとモデルがまったく合わず、誤差も計算できなかった。フィッティング時の χ^2/dof は 2006 年が 3.22、2007 年が 0.99 となった。

Shallow1st **wabs(bbodyrad+bbodyrad*gabs*gabs*gabs)**

*Shallow1st*で、高温側の黒体放射成分に吸収構造が存在する場合では、他の場合に比べて良くスペクトルを説明できた。以下にその結果を示す。

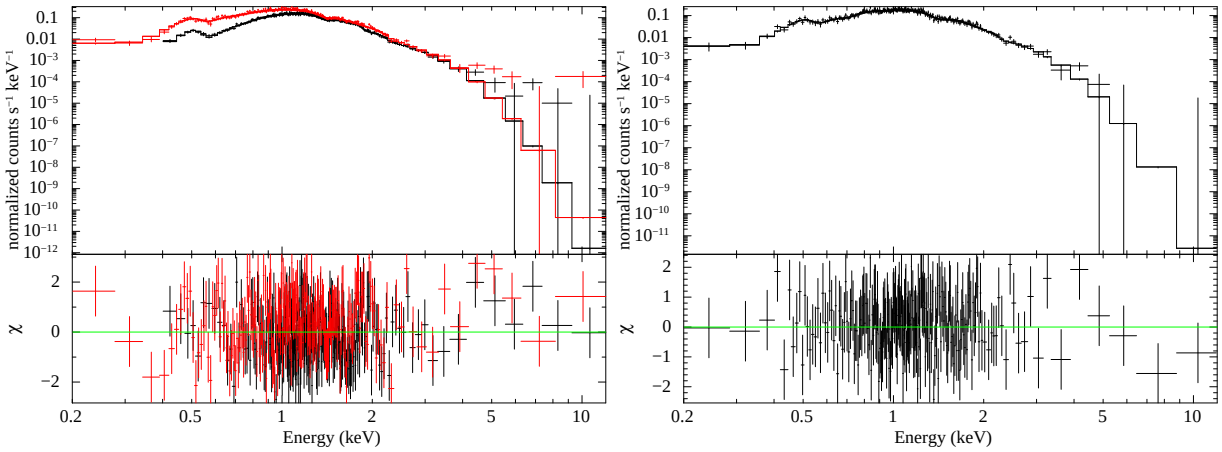

図 2.35: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

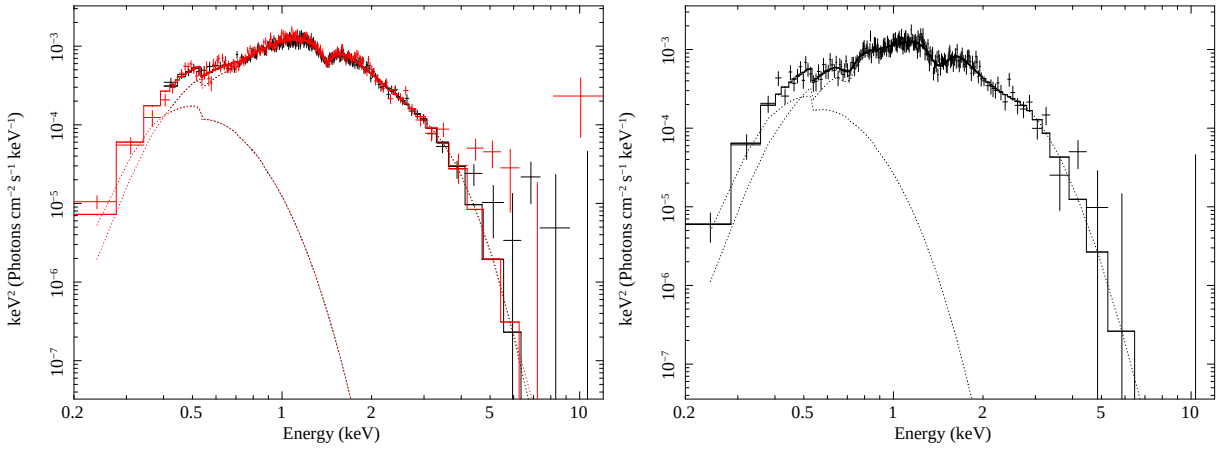

図 2.36: $\nu F\nu$ スペクトル。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

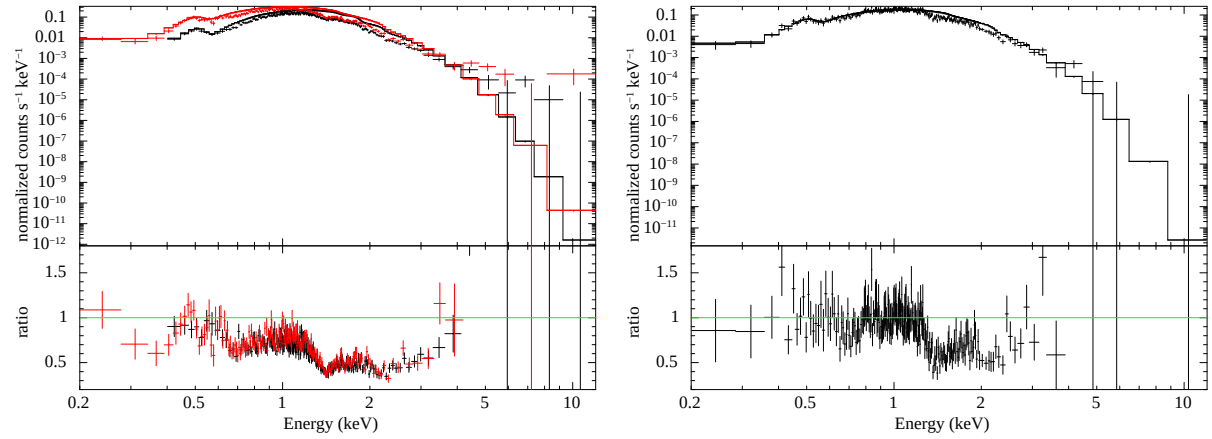

図 2.37: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

表 2.11: 連続成分に 2 温度黒体放射、吸収構造が 3 本、*Shallow1st* で高温側黒体放射成分のみに吸収構造が存在する場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.10\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.10\ ^{+0.07}_{-0.04}$
bbodyrad	kT	keV	$0.084\ ^{+0.003}_{-0.007}$	$0.090\ ^{+0.033}_{-0.021}$
bbodyrad	norm	—	$2739\ ^{+2588}_{-1006}$	$2110\ ^{+7888}_{-1759}$
		km♯	$10.5\ ^{+4.1}_{-2.1}$	$9.2\ ^{+10.8}_{-5.4}$
bbodyrad	kT	keV	$0.303\ ^{+0.006}_{-0.003}$	$0.301\ ^{+0.015}_{-0.014}$
bbodyrad	norm	—	$44.5\ ^{+2.6}_{-4.2}$	$38.0\ ^{+13.4}_{-8.3}$
		km♯	$1.33\ ^{+0.04}_{-0.07}$	$1.23\ ^{+0.20}_{-0.14}$
gabs	LineE	keV	$0.72\ ^{+0.03}_{-0.03}$	$0.70\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	$0.10\ ^{+0.03}_{-0.08}$	$0.03\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.06\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.04\ ^{+0.04}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$1.414\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$1.420\ ^{+0.028}_{-0.023}$
gabs	Sigma	keV	$0.085\ ^{+0.011}_{-0.006}$	$0.099\ ^{+0.034}_{-0.031}$
gabs	Tau	—	$0.098\ ^{+0.005}_{-0.012}$	$0.148\ ^{+0.067}_{-0.052}$
gabs	LineE	keV	$2.27\ ^{---}_{-0.05}$	$2.15\ ^{+0.17}_{-0.13}$
gabs	Sigma	keV	$0.72\ ^{+0.04}_{-0.06}$	$0.41\ ^{+0.29}_{-0.14}$
gabs	Tau	—	$1.50\ ^{+0.24}_{-0.74}$	$0.64\ ^{+0.77}_{-0.30}$
$\chi^2/d.o.f$			511.31/417(1.23)	173.15/206(0.84)
Null hypothesis probability			1.07E-03	9.54E-01
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.14E-12 $^{+1.07E-13}_{-5.58E-13}$	2.17E-12 $^{+3.10E-14}_{-3.60E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.13E-12 $^{+9.29E-14}_{-4.76E-13}$	2.16E-12 $^{+3.05E-14}_{-3.68E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

次に上記の 4 つの場合の内、フィッティングができた 2 つの場合について連続成分に powerlaw を追加してフィッティングを行った。

Deep1st **wabs(bbodyrad+bbodyrad*gabs*gabs*gabs+pow)** *Deep1st* で高温側の黒体放射成分に吸収構造がかかっている場合に powerlaw を追加した。ただし、この powerlaw には吸収構造をかけていない。powerlaw を追加しても、パラメータを自由に振った場合、*Shallow1st* に落ち着いてしまった。そこである程度パラメータを制限してフィッティングした。つまり、この場合では *Shallow1st* での解釈が bestfit モデルであり、*Deep1st* は棄却するべき解釈と考えられる。フィッティング結果を以下に示す。

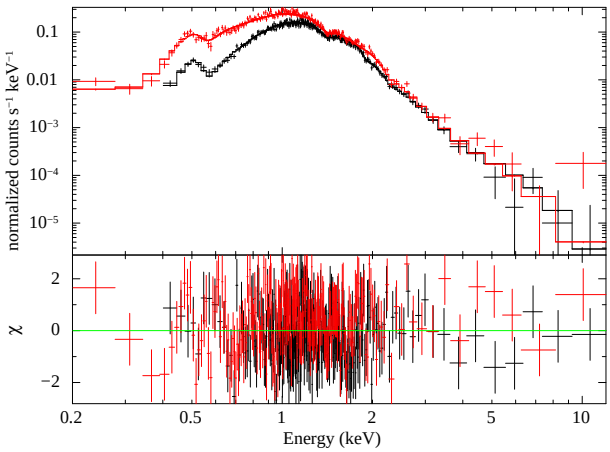

図 2.38: 2006 年のスペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。赤いデータが XIS1、黒いデータが XIS0,2,3 を足し合わせたもの。

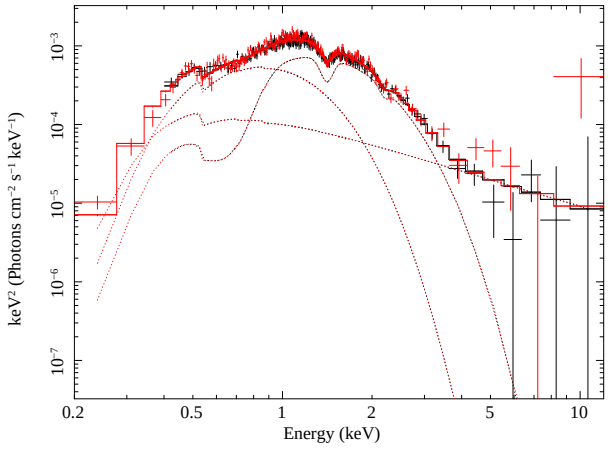

図 2.39: 2006 年の $\nu F\nu$ スペクトル。

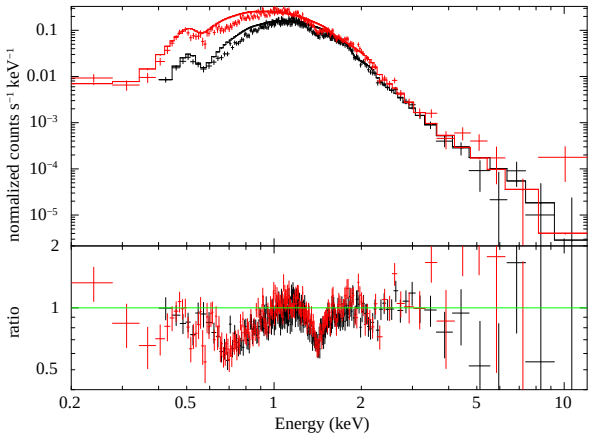

図 2.40: 2006 年のスペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。

表 2.12: 連続成分に 2 温度黒体放射とべき乗関数、吸収構造が 3 本、*Deep1st* で高温側黒体放射成分のみに吸収構造が存在する場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.10\ ^{+0.01}_{-0.03}$
bbodyrad	kT	keV	$0.18\ ^{+0.02}_{-0.02}$
bbodyrad	norm	—	$149\ ^{+51}_{-54}$
		km$^\sharp$	$2.4\ ^{+0.4}_{-0.5}$
bbodyrad	kT	keV	$0.290\ ^{+0.014}_{-0.007}$
bbodyrad	norm	—	$23.6\ ^{+6.7}_{-7.4}$
		km$^\sharp$	$1.0\ ^{+0.1}_{-0.2}$
gabs	LineE	keV	$0.66\ ^{+0.05}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	$0.14\ ^{+0..02}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.69\ ^{+0.19}_{-0.30}$
gabs	LineE	keV	$1.410\ ^{+0.008}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.12\ ^{+0.04}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.20\ ^{+0.05}_{-0.06}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.05}_{-0.08}$
gabs	Tau	—	$0.06\ ^{+0.03}_{-0.03}$
powerlaw	PhoIndex	—	$3.2\ ^{+0.4}_{-0.7}$
powerlaw	norm	—	1.3E-04 $^{+8.2E-05}_{-8.8E-05}$
$\chi^2/d.o.f$			492.25/415(1.19)
Null hypothesis probability			5.33E-03
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.17E-12 $^{+1.15E-13}_{-2.17E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.13E-12 $^{+6.08E-14}_{-2.10E-12}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
$\sharp$ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Shallow1st **wabs(bbodyrad+bbodyrad*gabs*gabs*gabs)**

*Shallow1st*で高温側の黒体放射成分に吸収構造がかかっている場合に powerlaw を追加した。ただし、この powerlaw には吸収構造をかけていない。フィッティングの結果、2006 年、2007 年どちらも powerlaw 成分を入れた方が χ^2/dof は改善した。フィッティング結果を以下にまとめた。

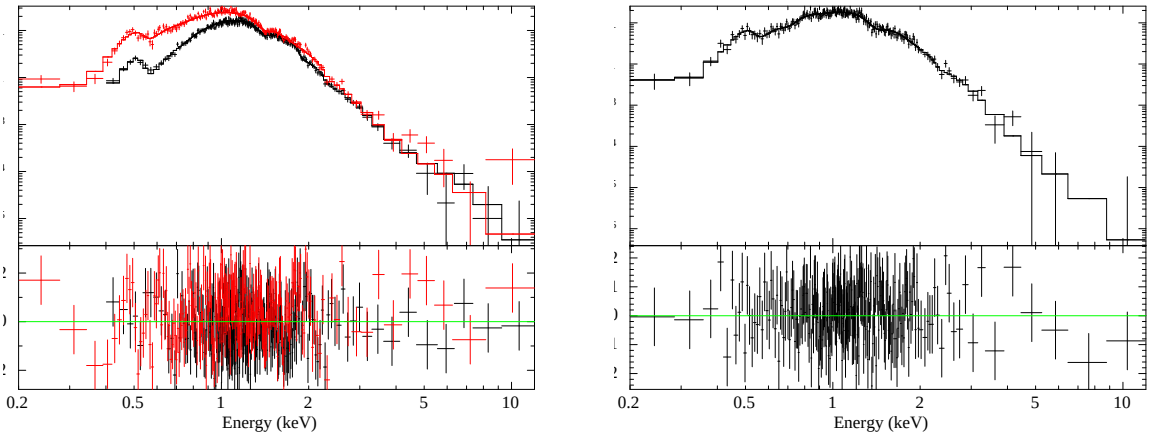

図 2.41: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

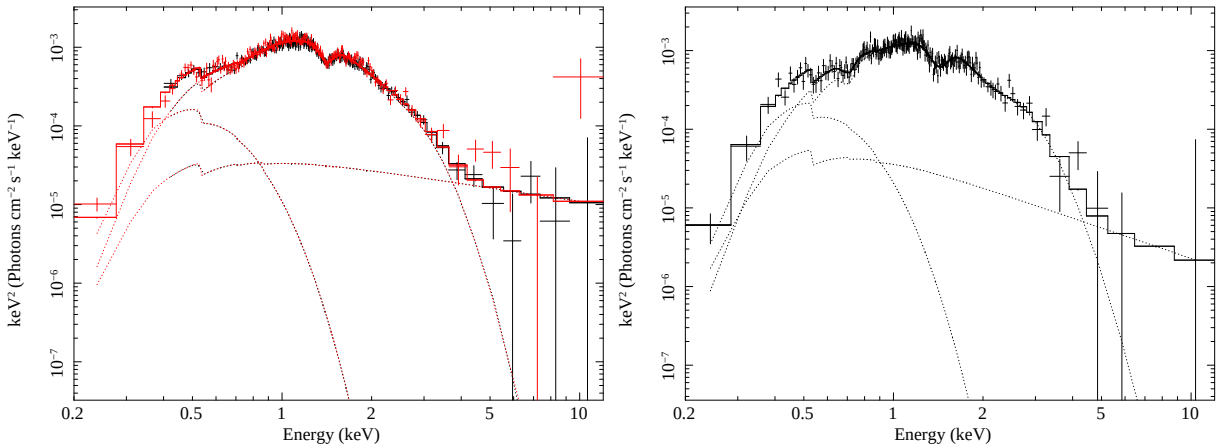

図 2.42: $\nu F\nu$ スペクトル。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

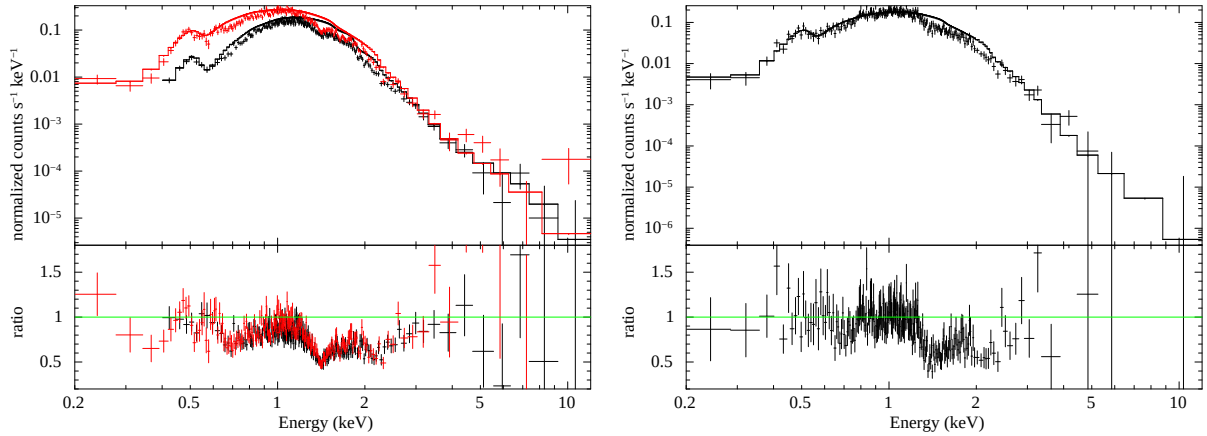

図 2.43: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左側が 2006 年 (赤いデータが XIS1)、右側が 2007 年のデータ。

表 2.13: 連続成分に 2 温度黒体放射とべき乗関数、吸収構造が 3 本、*Shallow1st* で高温側黒体放射成分のみに吸収構造が存在する場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.09\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.11\ ^{+0.08}_{-0.05}$
bbodyrad	kT	keV	$0.084\ ^{+0.007}_{-0.062}$	$0.089\ ^{+0.061}_{-0.089}$
bbodyrad	norm	—	$1846\ ^{+96710}_{-1746}$	$2072\ ^{+7555}_{-2072}$
		km♯	$8.6\ ^{+54.2}_{-6.6}$	$9.1\ ^{+10.5}_{-9.1}$
bbodyrad	kT	keV	$0.283\ ^{+0.013}_{-0.009}$	$0.296\ ^{+0.019}_{-0.022}$
bbodyrad	norm	—	$51.2\ ^{+14.5}_{-8.7}$	$39.7\ ^{+9.5}_{-19.5}$
		km♯	$1.4\ ^{+0.2}_{-0.1}$	$1.3\ ^{+0.1}_{-0.4}$
gabs	LineE	keV	$0.71\ ^{+0.03}_{-0.03}$	$0.70\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	$0.12\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.03\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.04\ ^{+0.05}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.410\ ^{+0.008}_{-0.004}$	$1.421\ ^{+0.029}_{-0.023}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.10\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$0.15\ ^{+0.07}_{-0.05}$
gabs	LineE	keV	$2.10\ ^{+0.10}_{-0.10}$	$2.14\ ^{+0.17}_{-0.13}$
gabs	Sigma	keV	$0.62\ ^{+0.20}_{-0.61}$	$0.39\ ^{+0.30}_{-0.16}$
gabs	Tau	—	$0.79\ ^{+0.16}_{-0.40}$	$0.57\ ^{+0.87}_{-0.30}$
powerlaw	PhoIndex	—	$2.6\ ^{+1.7}_{-2.1}$	$3.3\ ^{+5.2}_{-4.6}$
powerlaw	norm	—	$4.2\text{E-}05\ ^{+4.6E-05}_{-2.1E-07}$	$4.7\text{E-}05\ ^{+3.3E-04}_{-3.9E-07}$
$\chi^2/d.o.f$			492.28/415(1.19)	172.90/204(0.85)
Null hypothesis probability			5.31E-03	9.44E-01
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.17\text{E-}12\ ^{+3.90E-12}_{-3.06E-13}$	$2.18\text{E-}12\ ^{+2.43E-11}_{-2.15E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+2.81E-12}_{-3.00E-13}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+2.15E-11}_{-1.64E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

これまでの結果をまとめると 2006 年については表 2.14 の様になった。

表 2.14: フィッティング結果の比較 (2006 年)

		Deep1st		Shallow1st	
		χ^2/dof	Prob.	χ^2/dof	Prob.
両方	pow 無し	487.51/417(1.17)	9.7E-3	509.13/417(1.22)	1.3E-3
両方	pow 有り	472.70/415(1.14)	2.6E-2	491.00/415(1.18)	5.9E-3
高温側	pow 無し	529.76/417(1.27)	1.5E-4	511.31/417(1.23)	1.1E-3
高温側	pow 有り	492.25/415(1.19)	5.3E-3	492.28/415(1.19)	5.3E-3

また、2007 年についても *Shallow1st* のみで各場合についてまとめると表 2.15 の様になった。

表 2.15: フィッティング結果の比較 (2007 年)

		Shallow1st	
		χ^2/dof	Prob.
両方	pow 無し	173.16/206(0.84)	9.5E-1
両方	pow 有り	172.91/204(0.85)	9.4E-1
高温側	pow 無し	173.15/206(0.84)	9.5E-1
高温側	pow 有り	172.90/204(0.85)	9.4E-1

1E1207.4−5209 のスペクトルに対し、2 つの黒体放射成分の内吸収構造がどちらにかかるのかも加えて検証した結果、2006 年のスペクトルは *Deep1st* と *Shallow1st* の場合の間でほとんど差は無く、2007 年のスペクトルは *Shallow1st* の方がより良く説明できる。また、高温側のみに吸収構造が存在する場合に限れば powerlaw 成分の有り無し関係なく、2006 年、2007 年ともに *Shallow1st* の方が若干良くスペクトルを説明できる。しかし低エネルギー側の黒体放射にかかる場合はフィッティング出来なかった。χ^2/dof の値も大きい。つまり低エネルギー側の黒体放射成分だけには吸収構造は存在しない。

このことから *Shallow1st* でもすざくスペクトルを良く説明でき、吸収構造は高温側の黒体放射成分のみに存在する可能性が高いと言える。

2.7 XIS Psum モード タイミング解析 I

ここでは Psum モードデータのタイミング解析についてまとめている。

2.7.1 Psum モードとは

今回のすざくの 1E1207 の観測には Psum モードを使用している。このデータを使用し、タイミング解析を行った。Psum モードとは XIS の撮像領域で読み出し方向に光子情報を圧縮することで、読み出し方向の位置情報を失うのと引き換えに時間分解能を Normal モードの 1024 分の 1(約 7.8ms) に短縮して観測が可能となるモードである。

XIS に使用されている CCD は Frame Transfer 型 CCD ある。撮像領域と蓄積領域があり、撮像領域で取得したデータを蓄積領域に転送して読み出す構造になっている。図 2.45 は XISCCD の構造を示した物である。

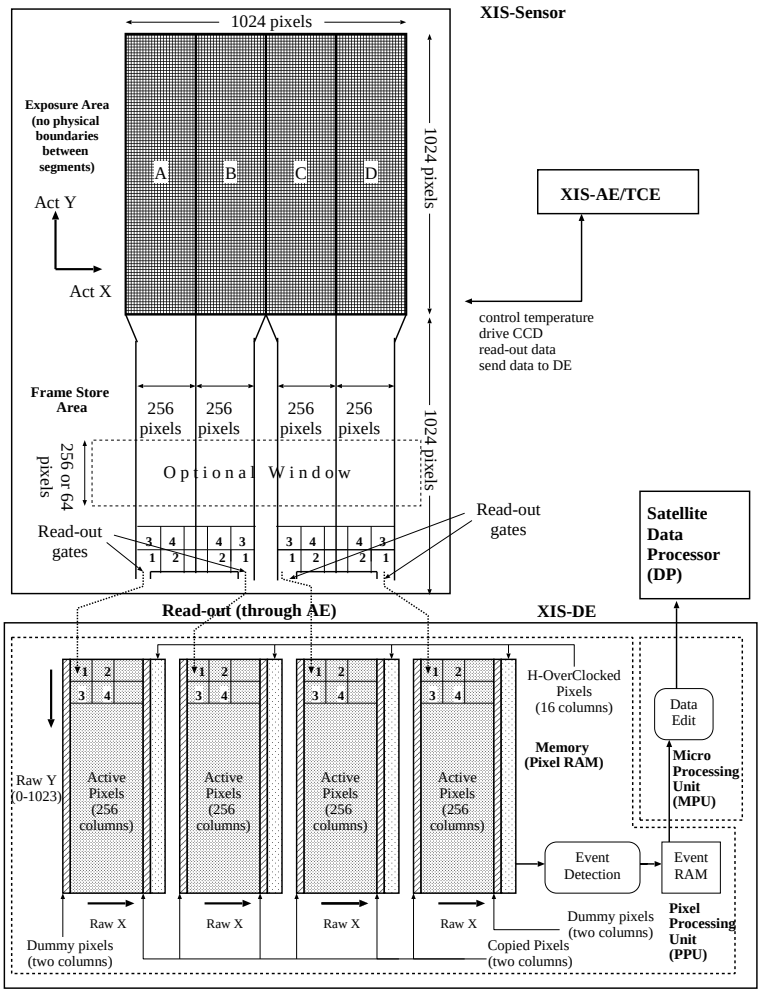

図 2.44: XIS CCD チップとデータ転送の模式図 (`http://heasarc.nasa.gov/docs/astroe/about/xis_inst.html` より)。XIS CCD センサーの上側が撮像領域、下側が蓄積領域。

Psum モードでは XIS は以下の用に動作する。

1. 撮像開始。
2. 撮像をし続けたまま撮像領域を読み出し方向に転送 (128 回) し撮像領域の下端で電荷を足し合わせる。
3. 蓄積領域を一行読み出すと共に撮像領域の下限の一行を蓄積領域に転送する。
4. 2,3 を繰り返す。

以下にこの動作の模式図を示す。

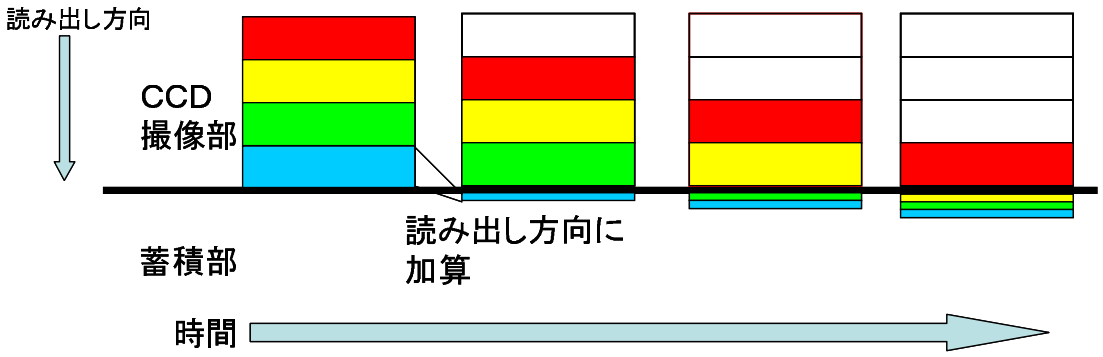

図 2.45: P-sum モードの動作の模式図。線より上が撮像領域、下が蓄積領域。これは 256 行ずつ転送の場合であるが、今回の観測では 128 行ずつ転送している。

蓄積領域からの読み出しは Normal モード同様 8 秒で 1024 行読み出しであるが、撮像をし続けたまま転送していくため読み出し方向がそのまま時刻情報に置き換わり、高時間分解能のデータが得られる。

2.7.2 リダクション方法

Psum データのリダクションは以下の様に行った。

基本的なイベントセレクション

unfiltered event(基本的な処理が行われていない天体データ) を使用した (プロセスのバージョンは 2.0.6.13)。

- まず、解析用のタスク aepipeline を使用し、基本的なキャリブレーションを行った。このタスクの中で xisgtigen、xistime、xiscoord、xisputpixelquality、そして xispi が行われ、最新の CALDB に従ってイベントファイルの時間補正や Charge Transfer Inefficiency(CTI) 補正、エネルギー較正を行った。
- aepipeline でできた cleaned イベントについて、GTI の論理積をとり、イベントファイルに GTI のフィルターをかける。
- grade や STATUS、条件によるイベントセレクションやフリッカリングピクセルの除去を行った。各作業に置けるパラメータは以下の通り。

```
(GRADE==0)&&((STATUS>=0&&STATUS<=524287)

sisclean 2 5 -5.24 3 0 4095

AOCU_HK_CNT3_NML_P==1 && ANG_DIST<1.5 && S0_DTRATE<3 && S1_DTRATE<3 &&
S2_DTRATE<3 && S3_DTRATE<3 && SAA_HXD==0 && T_SAA_HXD>436 && ELV>5
&& DYE_ELV>20
```

Psum モードの場合標準の解析方法では grade0,1,2 を使用するが、以下の理由により今回のタイミング解析では grade0 のみを使用した。

- 1E1207 は暗い天体のため荷電粒子等のノイズイベントの割合が大きい。
- Psum モードの場合 ACTY 方向へピクセルデータを足し合わせることから Normal モードでは除去する Grade のイベントまで X 線イベントとして分類してしまう。そのような分類の割合は grede0 より grade1,2 の方が大きいはずである。

ちなみに 1 回目の観測の XIS023 を合わせたイベントファイルについて grade0,1,2 の場合と grade0 のみの場合で比較すると、event 数は Grede0,1,2 の方が 1.5 倍ほど大きかった。

- COR(Cut off rigidity) のセレクションを行った。COR とは地磁気による宇宙線粒子をシールドする能力を表した指標である。今回は COR が 6GeV より大きい時のイベントのみ使用するようにした。

ノイズイベントの除去

次にイベントファイルからノイズの除去を行った。

- イベントファイルから ACTY 方向への投影図を作成した (X 軸は ACTX)。
- その図を参考に輝度の高いカラムを除去した。
- まず event ファイルを 3keV を境に低いエネルギー側と高いエネルギー側に分けた。
- 低エネルギー側 (109〜820ch) の ACTX 方向のデータをローレンツ関数でフィッティングした。
- フィッティングで求めたローレンツ関数を元のデータから引いた。
- そのデータに対して ACTX の 1 カラムごとに条件判断を行った。全てのカラムの値から求めた平均と標準偏差による閾値 (平均値 $\pm 4\sigma$) より外側だった場合、そのカラムを除去するカラムとしてセレクションファイルを作った。
- このセレクションファイルでセレクションを行い、event ファイルを作成した。その際はエネルギーは全ての領域を使用した。

図 2.46 は XIS0 の除去を行う前と行った後の低エネルギー側の ACTX データを示す。

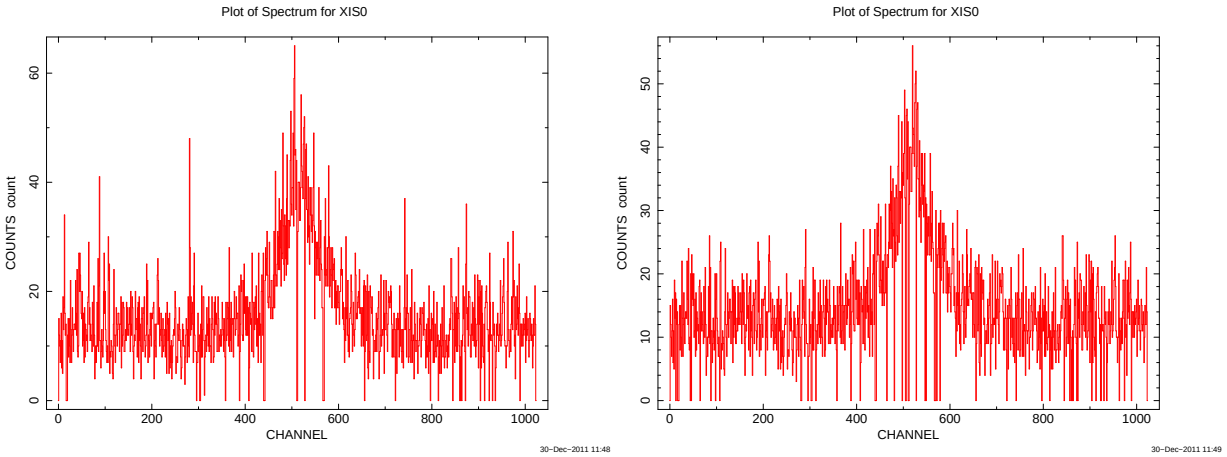

図 2.46: ノイズ除去の影響。左:除去を行う前、右:除去を行った後。カウントの大きなノイズカラムを除去できている事が分かる。

エネルギー分け

初期解析により 1E1207.4−5209 が低エネルギー側で強い放射があることが分かっていたためタイミング解析には低エネルギー側のデータのみ使用することにした。

また、様々な検討の結果 (付録 A 参照)0.4 から 2.5keV(109-685ch) のデータのみ使用した。

region 分割

ノイズ除去をおこなった event ファイルからソース、バックグラウンド、キャルソースの region を取り出して別々の event ファイルに分けた。各 region の決め方は、それぞれの ACTX 方向の長さがノイズ除去したカラムを含めずに同じになる様に分けた。図 2.47 と図 2.49 に各観測の XIS0 の RAWY 方向への投影図と各領域を示す。なお、観測データに対し、各エネルギー領域やソース領域の幅をいろいろ変えてバックグラウンドの標準偏差とソースとバックグラウンドのカウントレイトの差の比 (SN 比) をとって比較した。2006 年の結果を図 2.48 に、2007 年のものを図 2.50 に示す。

また、他にも各幅について試しにタイミング解析を行い (付録 A 参照)、最も良い結果が得られる幅を調べた。

最終的にソース領域の幅を 1 回目は 182pixel(カウントが 0 のカラムを除く) 2 回目は 102pixel(カウントが 0 のカラムを除く) として region 分割を行った。

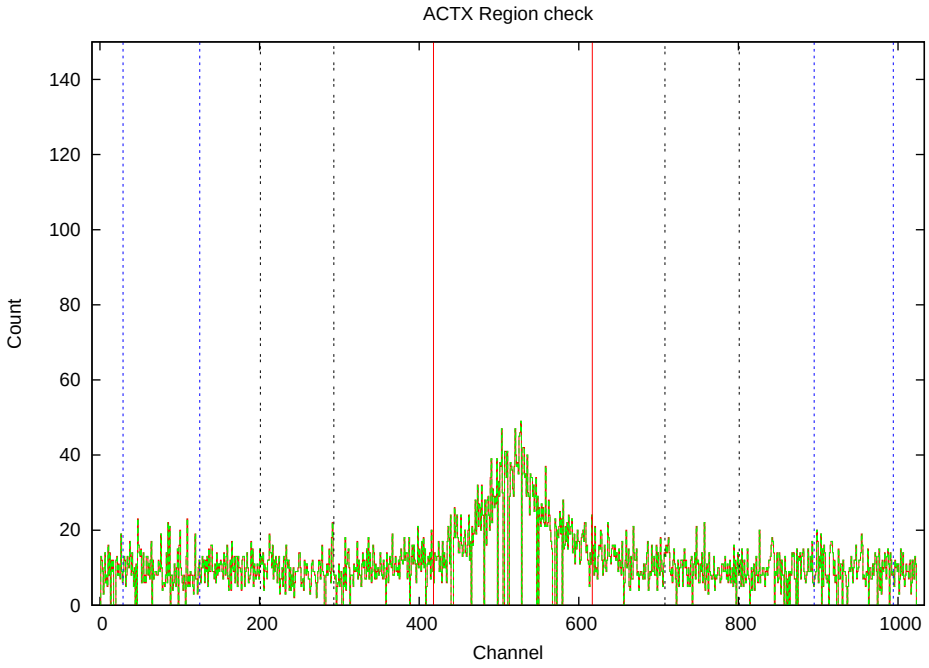

図 2.47: 2006 年の観測の XIS0 の RAWY 方向への投影図とソースとバックグラウンド、55Fe の region。エネルギー領域は 0.4-2.5keV。赤色の垂線で挟まれた部分ががソース、黒がバックグラウンド、青がキャルソース (55Fe)。

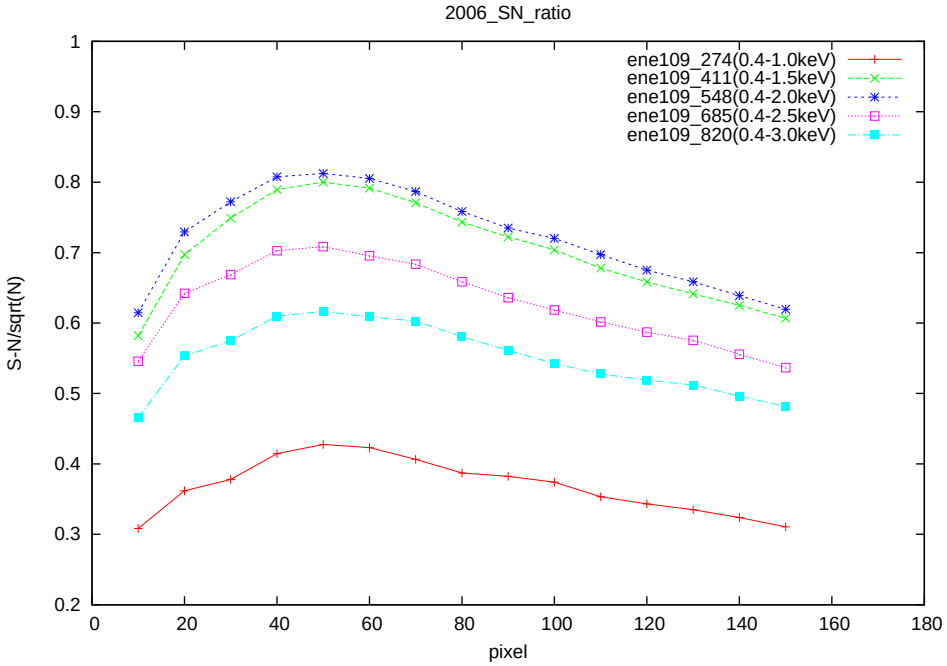

図 2.48: 2006 年の観測について、各エネルギー領域でのソース領域の幅に対する SN 比。X 軸は (ソース領域の幅-2)/2、Y 軸は SN 比。

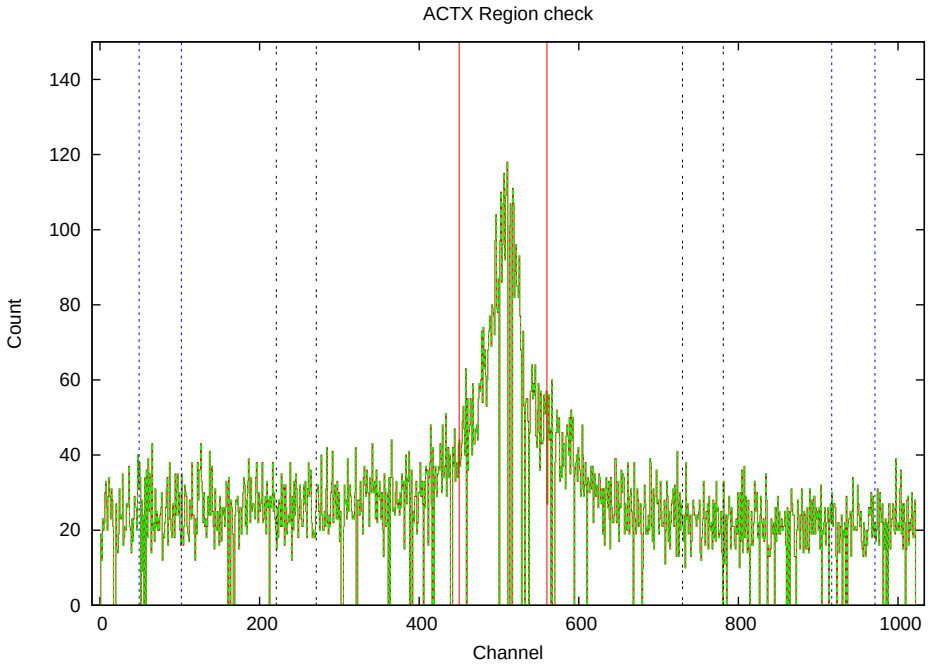

図 2.49: 2007 年の観測の XIS0 の RAWY 方向への投影図とソースとバックグラウンド、55Fe の region。エネルギー領域は 0.4-2.5keV。赤色の垂線で挟まれた部分ががソース、黒がバックグラウンド、青がキャルソース (55Fe)。

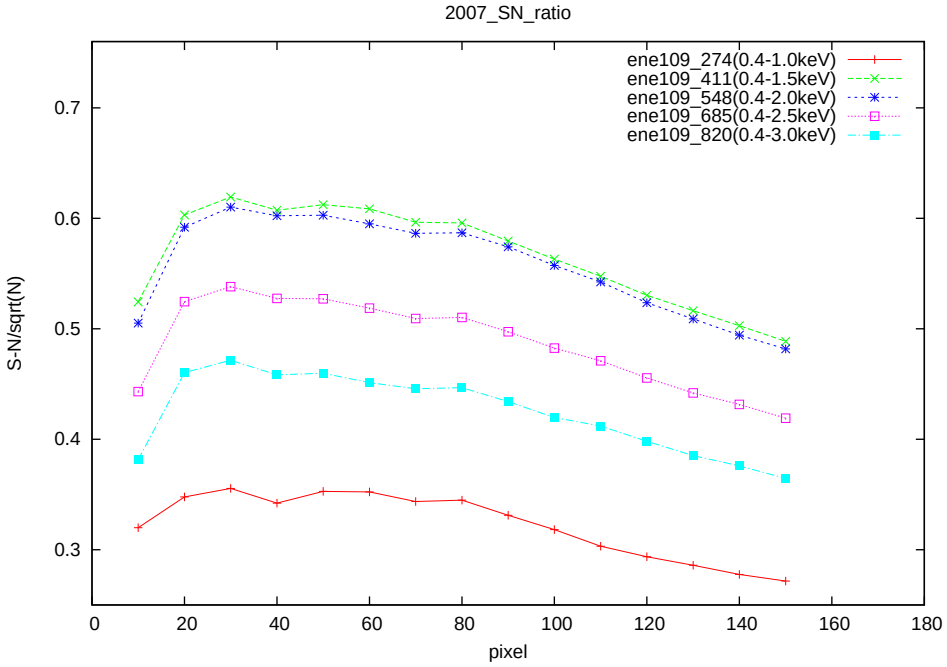

図 2.50: 2007 年の観測について、各エネルギー領域でのソース領域の幅に対する SN 比。X 軸は (ソース領域の幅-2)/2、Y 軸は SN 比。

絶対時刻の補正

Psum データの解析の際には時間補正をかけなければならない。具体的にはイベントの絶対到達時間 (絶対時刻) にずれが存在する。Psum モードでは読み出し方向 (ACTY) に 128 行

足し合わされ、足し合わされた行は 7.8ms で読み出される。そのため読み出し方向で y の位置にあるソースに対しては [y/128 の整数にもっとも近い数]×7.8 ms 分時間を引かなければならない。つまりライトカーブ等を書くと最初はソースの光が含まれていないデータ (光子情報) を最初のデータとして時刻づけしてしまう。[y/128 の整数にもっとも近い数]×7.8ms 分後になって初めてソースの光情報が入ったデータが時時刻付けされる。そのため、ソースの実際の光子時間情報とその分だけずれが生じる。このずれを直すために、ずれの時間を計算し以下の様に 0,0312 秒分イベントファイル等の時間情報を offset した。ここで y の値が必要だが、Psum モードで観測している限りソースの y の値は分からない。そこで Normal モードで観測している XIS1 のデータからソースの位置 (DETX,DETY) を見積り XIS0,2,3 での y の値を求めた。ただし、XIS0,1,2,3 それぞれ ACTXY 軸方向が異なるので、それを考慮して変換を行った。以下に各 XIS の座標関係を示す。

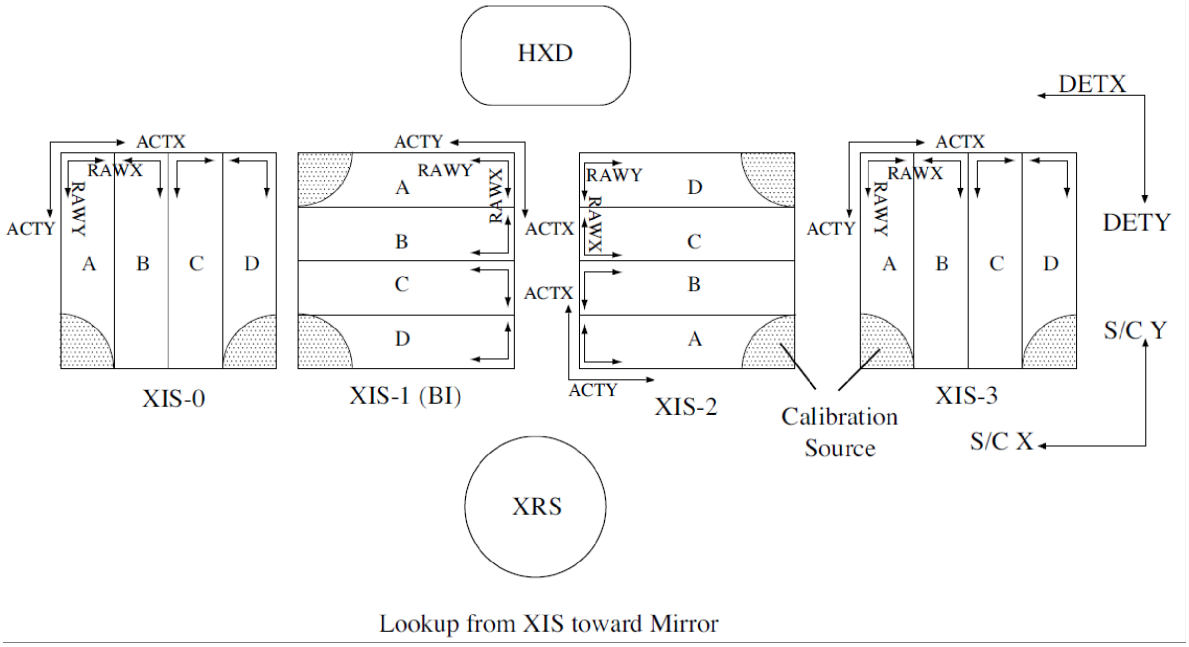

図 2.51: 各 XIS の座標関係。「すざくファーストステップガイド」(`http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep_web/fstep.html`) より。

barycenter 補正

リダクションの最後にイベントの barycenter 補正を行った。地球が天体に近づいているか、遠ざかっているかで、天体からの光子の見かけの到達時間はドップラー効果に依って変化する。これを補正するために、光子イベントの到達時間を、太陽系重心 (barycenter) で測定した値に補正する。その際に使用した赤経、赤緯は Luca et al. 2010 で求めていた Chandra 衛星の High Resolution Camera(HRC) での位置、RA(J2000)=12 時 10 分 0.88 秒,　DEC(J2000)=-52 度 26 分 28.61 秒を使用した。なぜなら HRC の空間分解能が良いからである (FWHM0.4 秒角)。

2.7.3 パワースペクトル

リダクションによって得られたイベントファイルを使用してパワースペクトルを作成した。その際に 2006 年の XIS0,2,3 を合わせたもの、2007 年の XIS0,3、そして全て合わせたもの 3 グループ (グループ 1-3) に分けて解析した。先行研究では 1E1207.4−5209 の周期は 0.424130 秒=2.357768Hz 付近となっているため、その付近に周期ピークが存在するか確認した。以下に結果を示す。

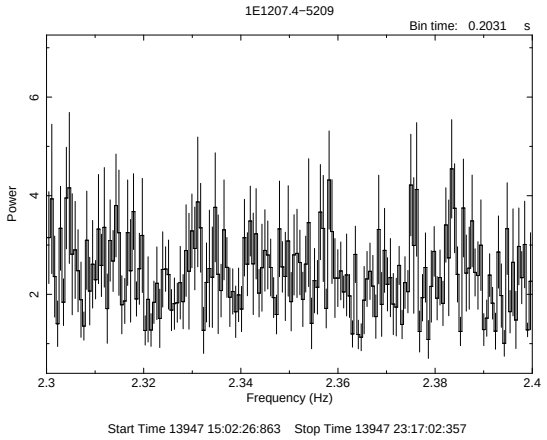

図 2.52: グループ 1(2006 年の XIS0123 を合わせたもの) のパワースペクトル。2.3∼2.4Hz までを表示 (周期 0.424130 秒=2.357768Hz)。

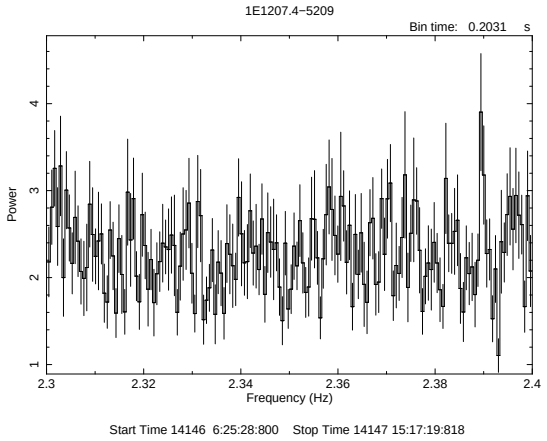

図 2.53: グループ 2(2007 年の XIS1) のパワースペクトル。2.3∼2.4Hz までを表示。

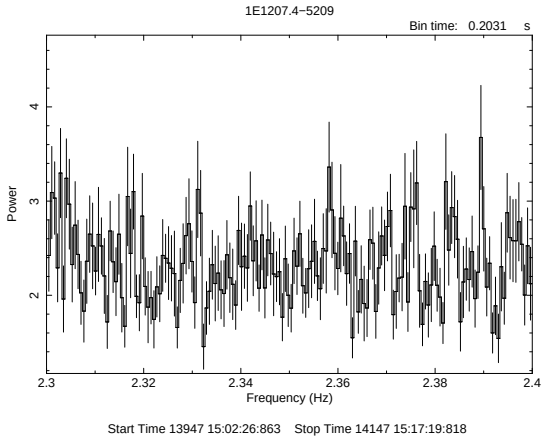

図 2.54: グループ 3(全て) のパワースペクトル。2.3∼2.4Hz までを表示。

どのグループでも予想した周波数 (2.3578Hz) 付近にピークを確認出来なかった。

2.7.4 efsearch(畳み込みライトカーブの χ^2 検定)

次に efsearch という、畳み込みライトカーブの χ^2 検定を行った。リダクションによって得られたイベントファイルからライトカーブを作成し、それを様々な周期で畳み込んだものに対して一定であると仮定して χ^2 検定を行う。ライトカーブがホワイトノイズの様に一定で変動が無い場合は χ^2 の値は小さくなるが、ライトカーブが周期的な変動を持つ場合、その周期部分で χ^2 の値が大きくなり、ピークができる。パワースペクトルの場合と同様に 1 回目の XIS023 を合わせたもの、2 回目の XIS03、そして全て合わせたもの 3 グループ (グループ 1-3) に分けて解析した。

グループ 1(2006 年の XIS023 を合わせたもの)

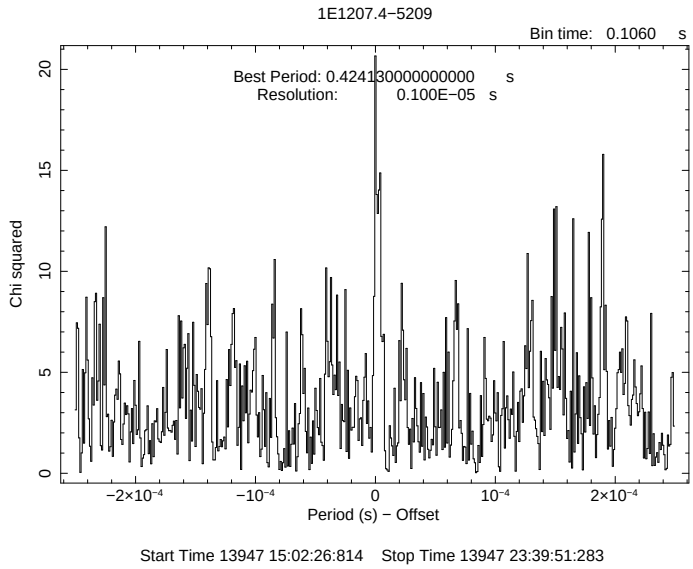

図 2.55: グループ 1(2006 年の XIS023 を合わせたもの) の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 1×10^{-6} 秒で 500step。

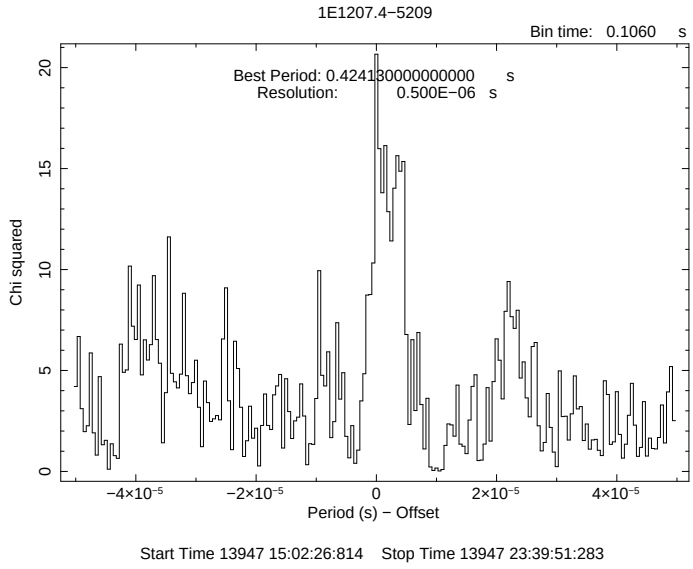

図 2.56: グループ 1(2006 年の XIS023 を合わせたもの) の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 5×10^{-7} 秒で 200step。

先行研究で見つかった周期付近 (0.424130 秒) にピークを確認した。周期分解能 1×10^{-9} 秒で 20000step、efsearch をした場合、一番 χ^2 が大きいのは 0.424135204 秒でその時の χ^2 の値は 24.55。他の周期範囲でこれ以上のピークは確認出来なかった。

グループ 2(2 回目の XIS03 を合わせたもの)

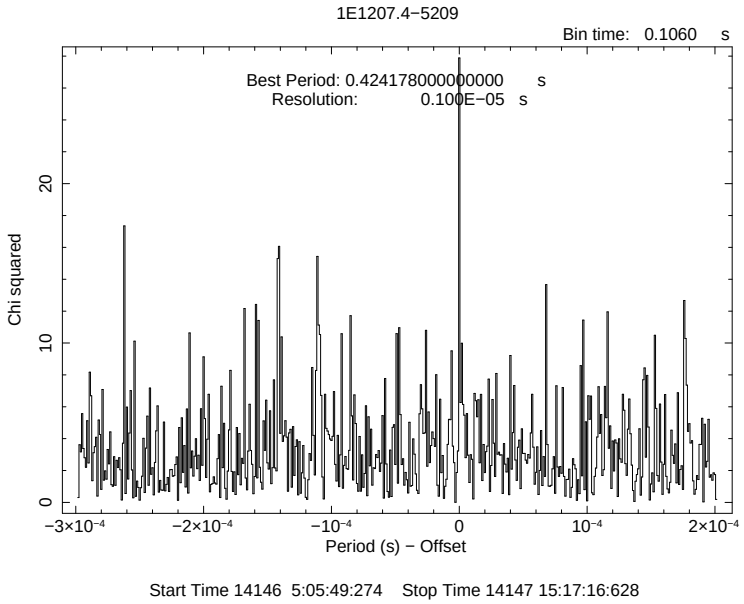

図 2.57: グループ 2(2007 年の XIS03 を合わせたもの) の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 1×10^{-6} 秒で 500step。

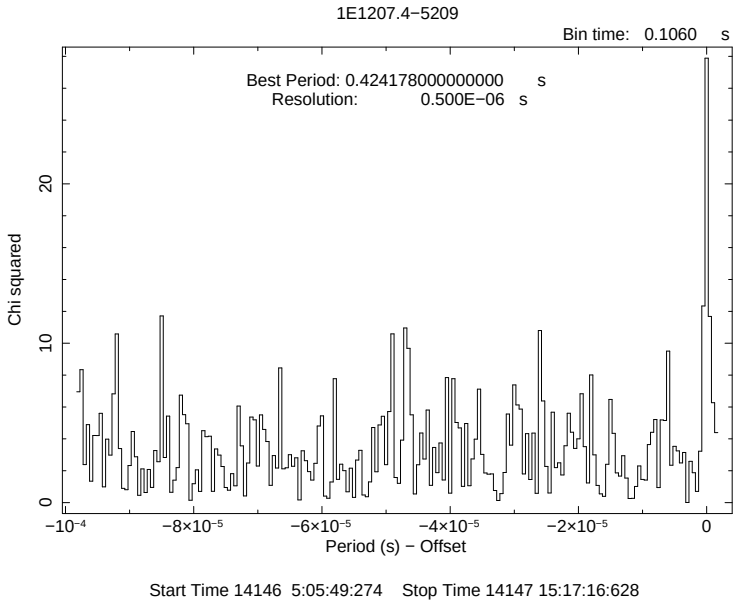

図 2.58: グループ 2(2007 年の XIS03 を合わせたもの) の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 5×10^{-7} 秒で 200step。

先行研究で見つかった周期付近 (0.424131 秒) にピークを確認したがその大きさは小さく、他に大きいピークが存在した。周期分解能 1×10^{-9} 秒で 20000step の efsearch をした場合、一番 χ^2 が大きいのは 0.424130724 秒でその時の χ^2 の値は 19.00。

グループ 3(全て)

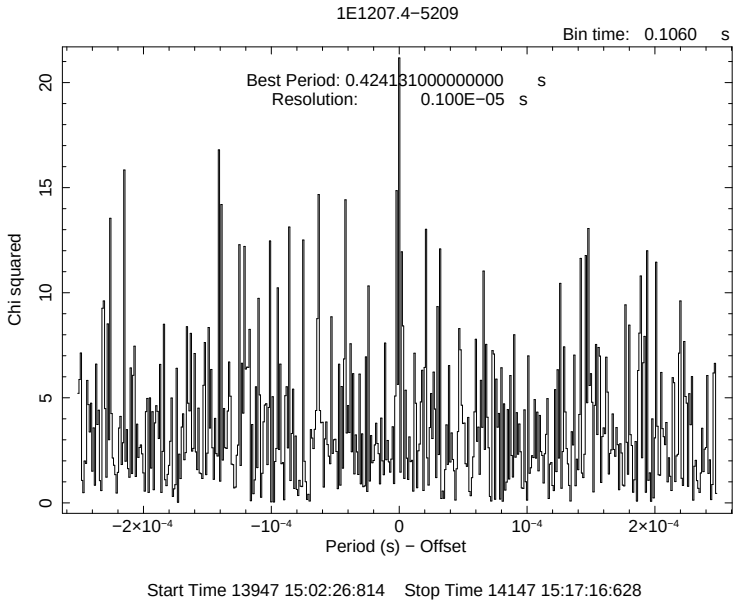

図 2.59: グループ 3(全て) の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 1×10^{-6} 秒で 500step。

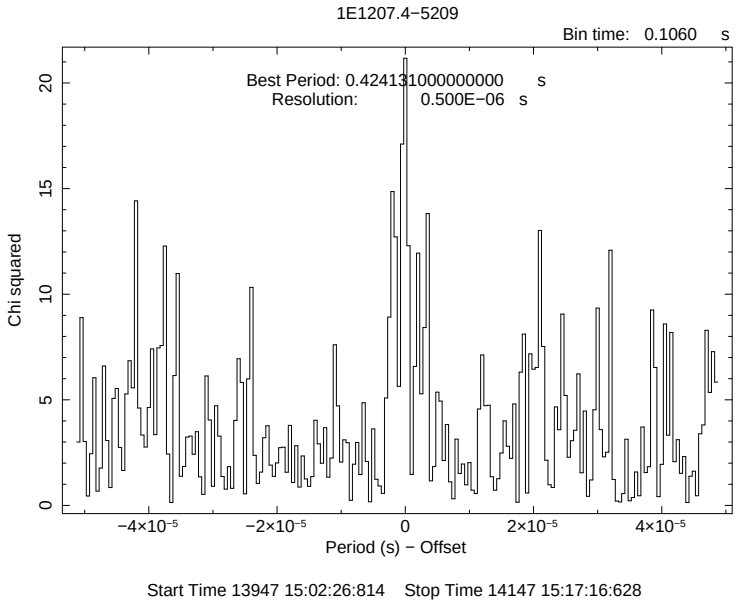

図 2.60: グループ 3(全て) の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 5×10^{-7} 秒で 200step。

周期分解能を細かくしていくと先行研究で見つかった周期付近 (0.42413123 秒) にピークを検出した。$\pm5\times10^{-4}$ 秒の周期範囲で見てみるとこのピークの以上に χ^2 の値が大きいピークは存在しない。周期分解能 1×10^{-9} 秒で 20000step の efsearch をした場合、一番 χ^2 が大きいのは 0.424131157 秒でその時の χ^2 の値は 36.53 である。

以下に efsearch の結果をまとめる。まず、efsearch における χ^2 検定結果の有意性についてまとめる。有意性の評価には χ^2 分布を使用する。χ^2 分布 (確率関数) は自由度によって決まる。分布が決まると、ある有意水準における χ^2 の値が決まる。その χ^2 の値より大きければその有意水準で 2 つの分布データ群が同一という帰無仮説を棄却できる、つまり比較した 2 つの分布データは異なることが言える。ここで使用する有意水準は数値の低い方がより厳しい判断の仕方になる。χ^2 の値はすでに分かっている。表 2.16 にそれぞれのグループについての 0.424130 秒付近における efserch の結果をまとめた。

表 2.16: 各グループにおける 0.424130 秒付近での efserch の結果。

group	χ^2	P center [s]	ΔP [s]	bin	peak P [s]
G1	24.55	0.424130	10^{-9}	20000	0.424135204
G2	19.00	0.424130	10^{-9}	20000	0.424130724
G3	36.53	0.424130	10^{-9}	20000	0.424131157

自由度はビンのまとめかたが全部で 4 ビンなので 3 になる (const モデルなので 1 個の制約条件を持つ)。自由度 3 の場合の有意水準 p とその時の χ^2 の値は表 2.17 の様になっている。

表 2.17: χ^2 分布において自由度 3 の場合の有意水準 p とその時の χ^2 の値。

Prob.	0.995	0.975	0.05	0.01	0.005	0.001	0.0005	0.0001
χ^2@dof3	0.072	0.216	7.815	11.345	12.838	16.266	17.731	21.108

グループ 1 については有意水準 0.002%、グループ 2 については有意水準 0.03%で揺らいでいる (一定の明るさではない) と言えるが他にも同じくらいの χ^2 を持つピークが存在する。最後にグループ 3 は 0.424130 付近のピークは χ^2 値が 30 を越えており、有意水準 6×10^{-6}%で揺らいでいる (一定の明るさではない) と言える。$\pm 5 \times 10^{-4}$ 秒の周期範囲内にはこれ以上の χ^2 値をもつピークは確認できない。まとめると表 2.18 の様になった。

表 2.18: 各グループにおける 0.424130 秒付近の efserch の結果とピークの有意水準。

group	χ^2	P center [s]	ΔP [s]	bin	peak P [s]	dof	Prob.(right-tail)
G1	24.55	0.424130	10^{-9}	20000	0.424135204	3	1.92×10^{-5}
G2	19.00	0.424130	10^{-9}	20000	0.424130724	3	2.73×10^{-4}
G3	36.53	0.424130	10^{-9}	20000	0.424131157	3	6.00×10^{-8}

次にピークの誤差についてまとめる。efsearch の結果のピーク付近をガウス関数と定数でフィットし、ガウス関数の中心と σ を求めた。この σ から 90%エラーを計算し、それをピークのエラーとした。各グループのフィッティングの結果を図 2.61 から図 2.63 に示す。フィッティング結果は表 2.19 の様になった。

表 2.19: 各グループのフィッティングの結果。

group	center[s]	sigma [s]	90%err
G1	0.42413196	2.80×10^{-6}	4.60×10^{-6}
G2	0.42413116	5.74×10^{-7}	9.44×10^{-7}
G3	0.42413142	2.13×10^{-6}	3.50×10^{-6}

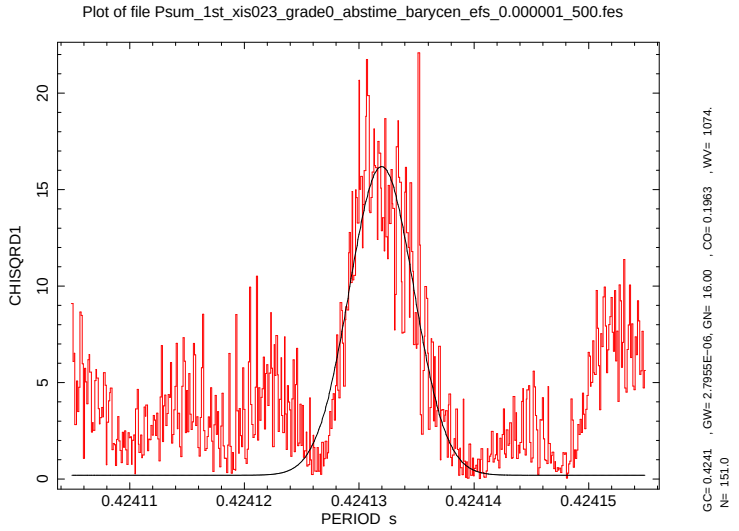

図 2.61: グループ 1 のピークのガウシアンフィッティング。

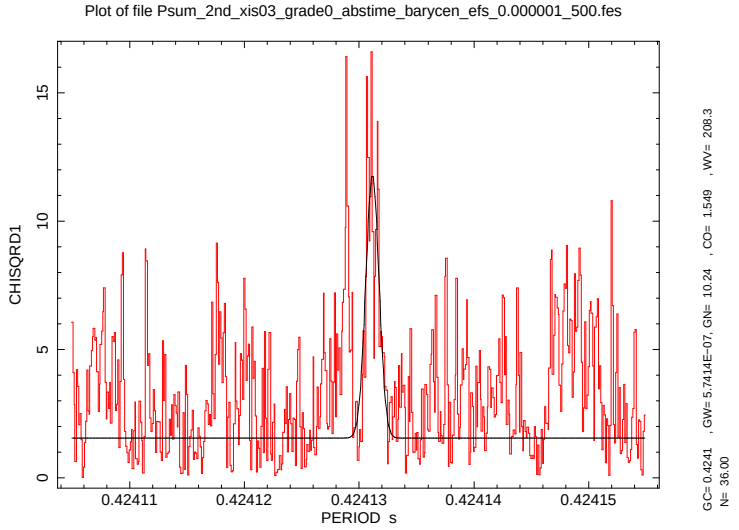

図 2.62: グループ 2 のピークのガウシアンフィッティング。

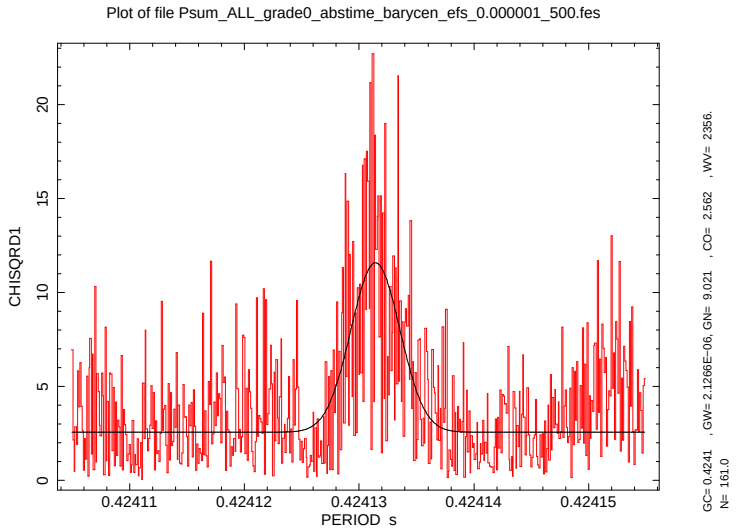

図 2.63: グループ 3 のピークのガウシアンフィッティング。

2.7.5 efold(畳み込みライト カーブ)

efold というプログラムを使用し、各グループの efsearch で見つかったピーク周期で元のライトカーブを畳み込み、周期内での変動を確認した。

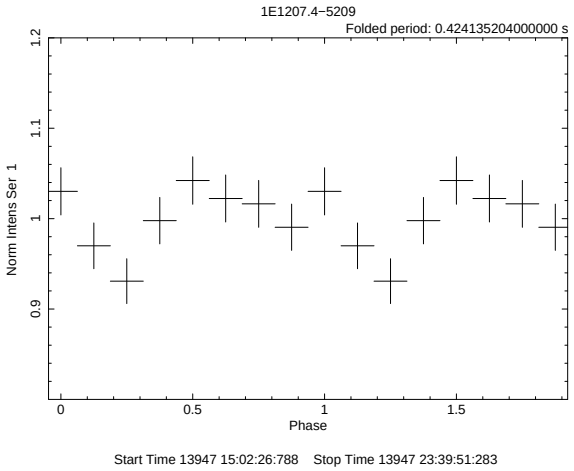

図 2.64: グループ 1 について 0.424135204 秒で efold した結果。

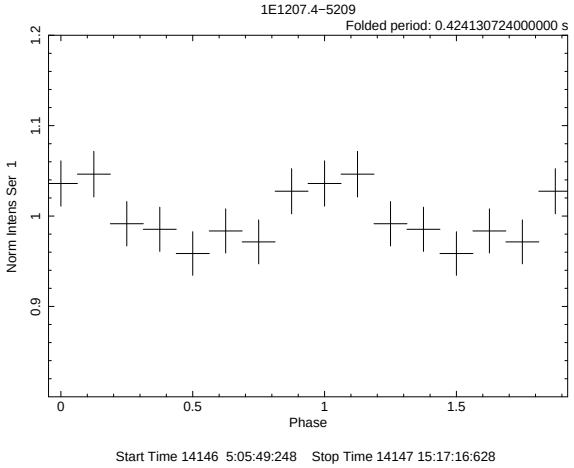

図 2.65: グループ 2 について 0.424130724 秒で efold した結果。

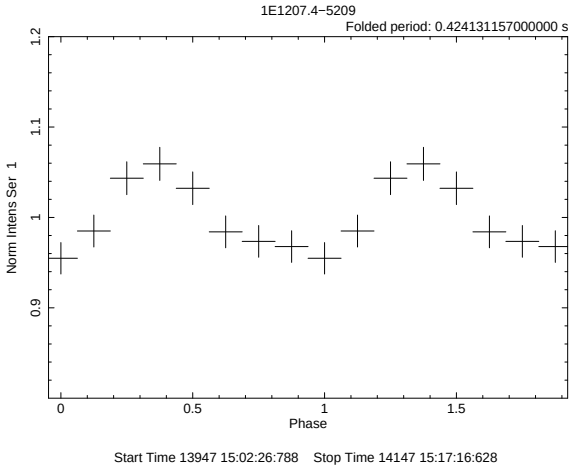

図 2.66: グループ 3 について 0.424131157 秒で efold した結果。

efseach で決まった 0.424130 秒付近のピークで efold を行った結果、どのグループについても 10%程度の変動を持った一山構造の folded ライト カーブが得られた。

2.7.6 Ztest

Z_n^2 テストとはフーリエ解析による周期探査方法で、1E1207.4−5209 の周期探査の論文ではこの方法でピークの検出が行われている。以下の式で定義される Z_n^2 の値が大きくなるほど強い変動が周波数 ν で起こっている事を示している。$n = 1$ のとき Rayleigh test となる。

$$Z_n^2 = (2/N) \sum_{k=1}^{n} \left((\sum_{j=1}^{N} \cos(2\pi k \phi_j))^2 + (\sum_{j=1}^{N} \sin(2\pi k \phi_j))^2 \right) \tag{2.11}$$

n:パルスの山の数
N: 光子イベント数
ϕ_j : パルス位相、$(\nu \Delta t_j + \dot{\nu} \Delta t_j^2/2 + \ddot{\nu} \Delta t_j^3/6)$ の端数 (小数点以下)
ν: 試行する周波数
$\Delta t_j = t_j - t_0$
t_j: j 番目の光子の到着時刻 (太陽系重心)
t_0: 電波の観測時間 (太陽系重心)

これまでと同様に 3 つのグループ (1 回目の XIS0123 を合わせたもの、2 回目の XIS1、そして全て合わせたもの) に分け Ztest を行った。ただし、今回は $n = 1$ の Rayleigh テストであり、ϕ_j は $\nu \Delta t_j$ の少数部とし、$\dot{\nu}$、$\ddot{\nu}$ は考慮していない。evt データからライトカーブデータを作成し、それに対して Ztest を行った。1E1207.4−5209 の周期 0.424130 秒は周波数で 2.357768 Hz なのでその付近の周波数を探査した。その結果を次の図 2.67 から図 2.69 に示す。

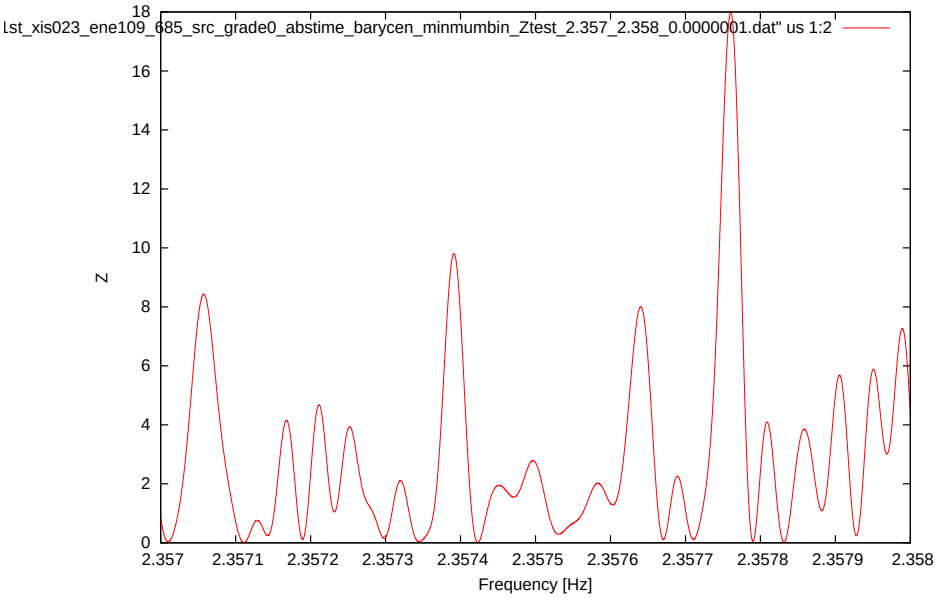

図 2.67: グループ 1 について 2.357 から 2.358 Hz を 1×10^{-7} Hz の分解能で Ztest した結果。

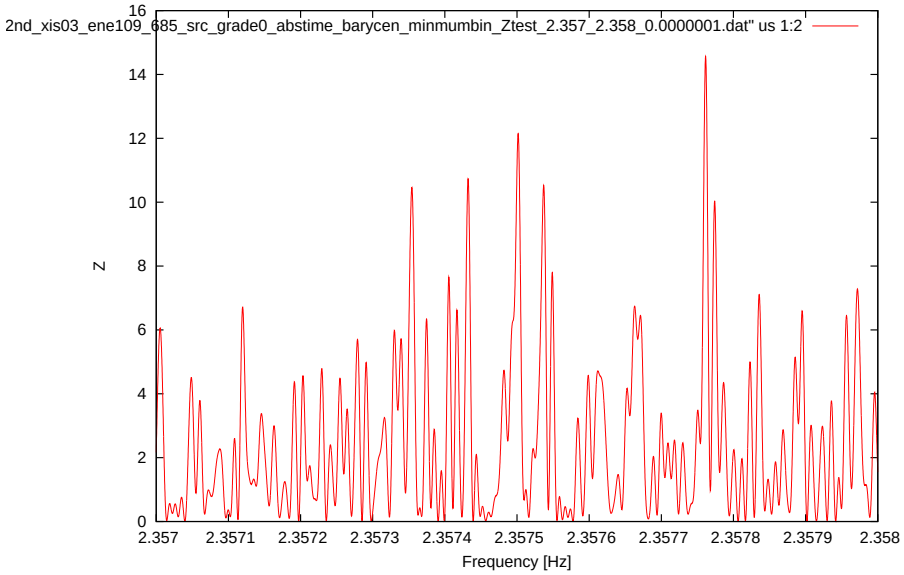

図 2.68: グループ 2 について 2.357 から 2.358 Hz を 1×10^{-7} Hz の分解能で Ztest した結果。

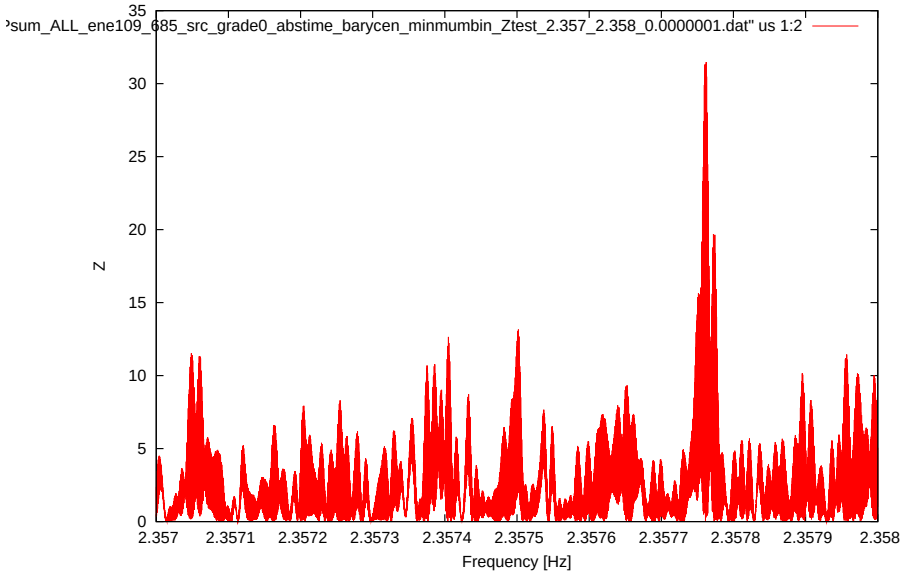

図 2.69: グループ 3 について 2.357 から 2.358 Hz を 1×10^{-7} Hz の分解能で Ztest した結果。

efsearch で見つかった周期付近にピークを確認した。ピークの形状も efsearch の時と同様となった。他にも同程度かまたはそれ以上のピークが確認された。ただし、グループ 3 については 2 回の観測を合わせたため、efsearch 同様に Z の値がバタついていた。これらのピークに対し、ガウス関数でフィッティングを行って中心とその 90%エラーを求めた。また、グループ 3 については値が高いところのみ使用してフィッティングを行った。その結果、各グループにおけるピークのパラメータは表 2.20 の様になった。

表 2.20: 各グループにおけるピークのフィッティングパラメータ。

group	center[s]	sigma [s]	90%err [s]	Z
G1	0.42413133	2.37×10^{-6}	3.90×10^{-6}	18.00
G2	0.42413113	5.27×10^{-7}	8.67×10^{-7}	14.67
G3	0.42413116	7.93×10^{-7}	1.30×10^{-6}	30.32

2.7.7　Ztest で見つかったピークでのライト カーブの畳み込み

ここで、Ztest で見つかったピークに対し畳み込みライト カーブを確認した。それらを次の図 2.70 から図 2.72 に示す。

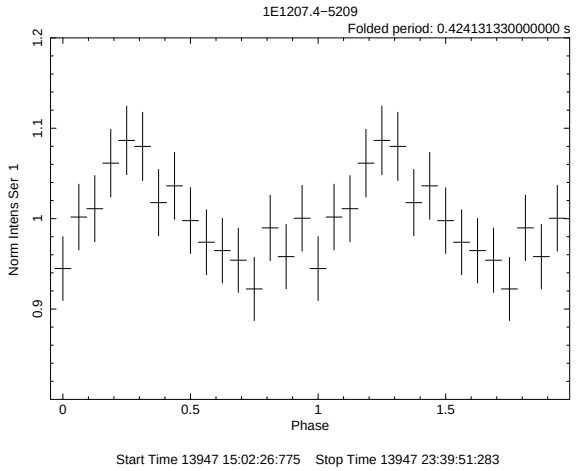

図 2.70: グループ 1 について 0.42413133 秒で efold した結果。

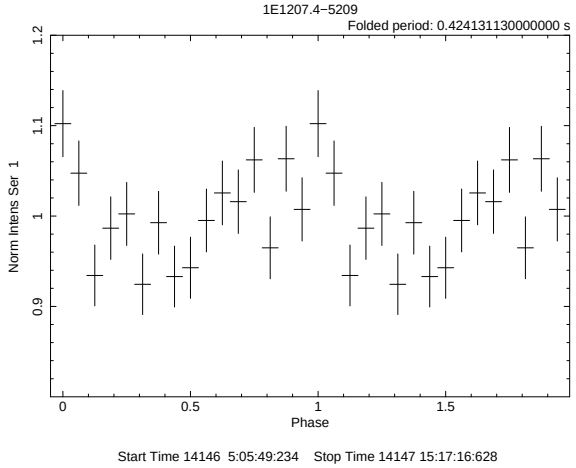

図 2.71: グループ 2 について 0.42413113 秒で efold した結果。

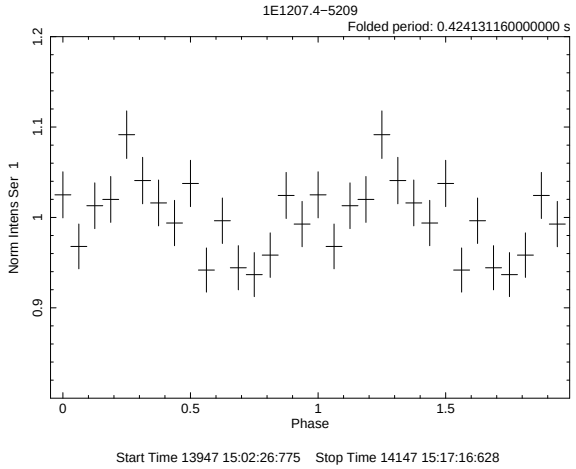

図 2.72: グループ 3 について 0.42413116 秒で efold した結果。

全てのグループについて、論聞値付近の周期で 10%程度の変動を持つ folded ライト カーブが得られた。

2.8 Psum タイミング解析 II

スペクトル解析により、2 温度黒体放射に 3 本の吸収線が尤もらしいことが分かった。X 線パルサーの場合、スペクトルの異なる放射成分が混在しているため、エネルギーを分割した畳み込みライトカーブの位相が反転していて全エネルギーの畳み込みライトカーブを描くと変動が少なくなる場合がある。1E1207.4−5209 も同様な状態にある可能性が考えられる。そこで、2 つの黒体放射成分のうち片方の寄与をできるだけ抑えたエネルギー分けを行い、efsearch と Ztest でピークの有無を確かめた。その際、リダクション時のソース領域の幅も様々な長さに変更ながら解析した。0.4-2.5keV の以前のタイミング解析がスペクトルパラメータを考慮しないものだったのに対して今回はスペクトル構造を加味してタイミング解析を行う。また、エネルギー分けをする際に使用したモデルは吸収線が *Deep1st* と *Shallow1st* の 2 種類。

2.8.1 エネルギー分け

まず、タイミング解析するエネルギー領域を決めるために、スペクトルモデルにおける各黒体放射の寄与を確認した。図 2.74、2.74 にそれぞれのスペクトルモデルを示す。2007 年については *Shallow1st* のみ。

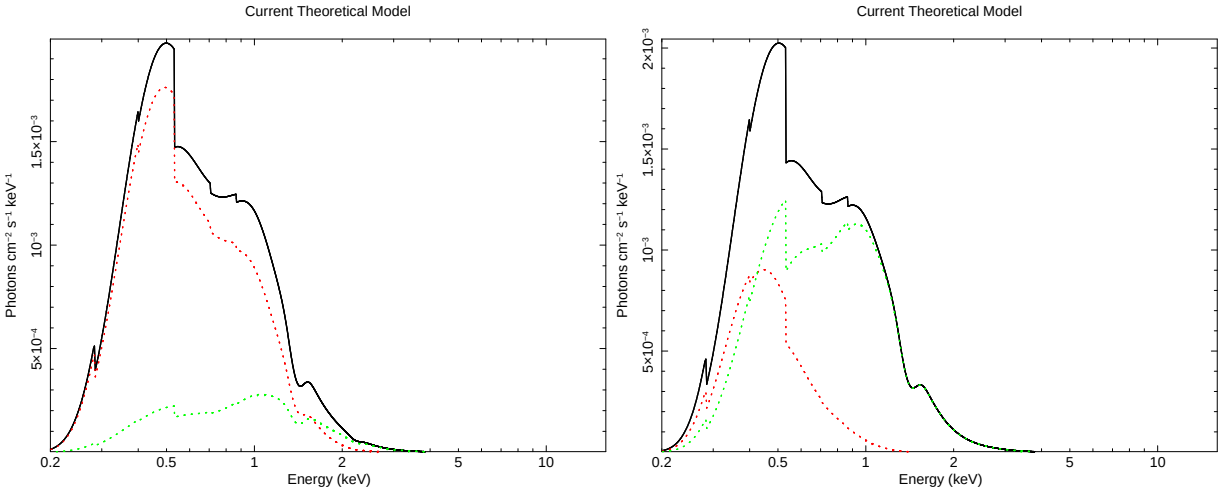

図 2.73: 2006 年の 2 温度黒体放射モデルにおける各温度成分の寄与。左側が *Deep1st*、右側が *Shallow1st*。赤い点線が低温成分で緑の点線が高温成分。

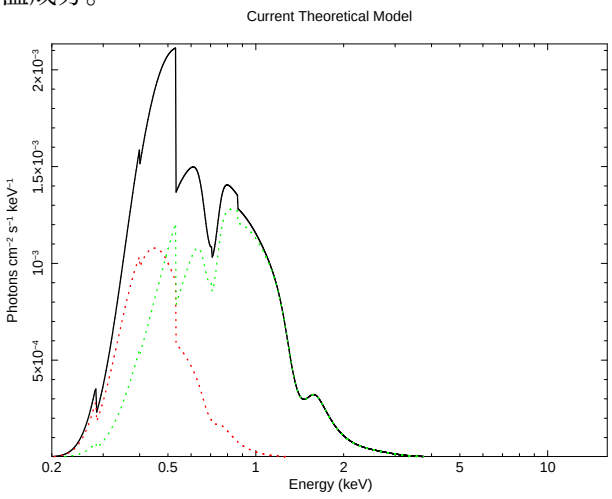

図 2.74: 2007 年の 2 温度黒体放射モデルにおける各温度成分の寄与。*Shallow1st* のみ。

このモデルの強度を参考に、片方の黒体放射の寄与が全体に対して 20%以下になる部分を探した。図 2.76、2.76 は低温側、高温側それぞれについてモデル全体に対する寄与を表示したもの。こちらも 2007 年は *Shallow1st* モデルのみ。

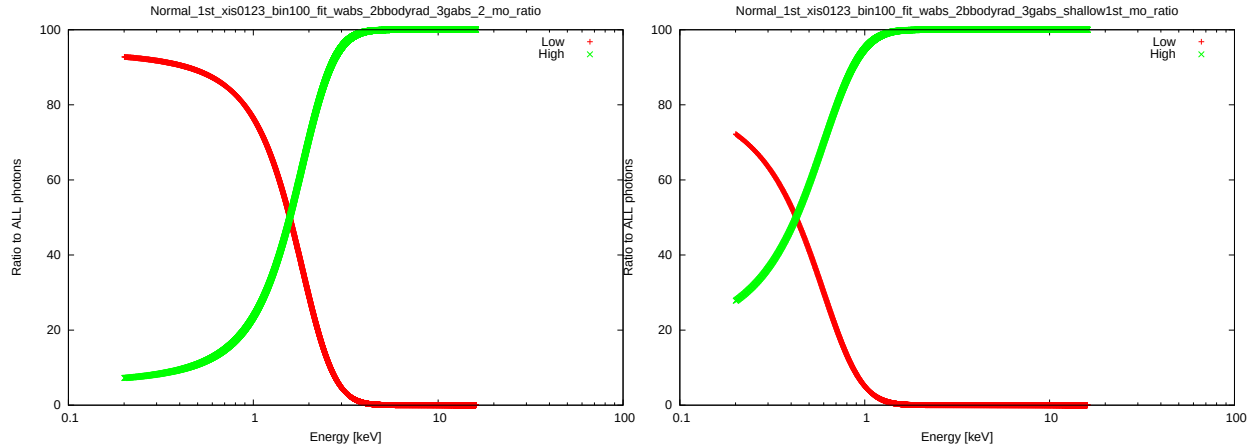

図 2.75: 2006 年のスペクトルにおける各黒体放射のモデル全体に対する寄与。左:*Deep1st*。右:*Shallow1st*。赤線が低音側の黒体放射のモデル全体に対する寄与、緑線が低音側の黒体放射のモデル全体に対する寄与。

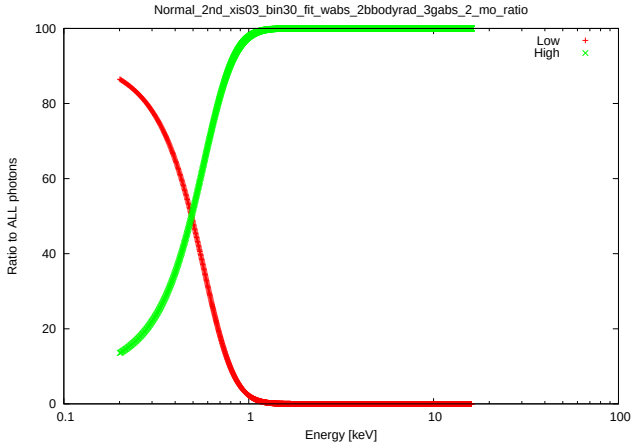

図 2.76: 2007 年のスペクトルにおける各黒体放射のモデル全体に対する寄与。右:*Shallow1st*。赤線が低音側の黒体放射のモデル全体に対する寄与、緑線が低音側の黒体放射のモデル全体に対する寄与。

検証した結果、2006 年の *Deep1st* の場合、高温側の黒体放射の全体に対する寄与が 20%程度以下になるのは 0.9keV 以下、低温側の黒体放射の全体に対する寄与が 20%程度以下になるのは 2.23keV 以上となった。よって取り出すべきエネルギー範囲は

```
0.4-0.9keV 109-247ch
2.23-4.0keV  611-1096ch
```

とした。上限を 4keV にしたのはこれ以上にすると統計が悪いためである。

また、2006 年の *Shallow1st* の場合、高温側の黒体放射の全体に対する寄与が 20%以下になるのは 0.2keV より下。40%になるのは 0.33keV。Psum モードデータは 0.4keV 以上なのでこれでは確

かめられない。低エネルギー側の黒体放射の全体に対する寄与が 20%程度以下になるのは 0.71keV 以上となったため、取り出すべきエネルギー範囲は

```
0.71-4.0keV 195-1096ch
```

とした。

2007 年については *Shallow1st* のみ検証した。2006 年の場合と同様、高温側の寄与が 20%以下になるのは 0.3keV 程度なので取り出すことは出来ない。低温側の黒体放射の全体に対する寄与が 20%程度以下になるのは 0.683keV 以上。これは 2006 年の場合とほぼ変わらなかったため、2006 年と同様に 0.71keV から 4keV までを抜き出す事にした。最終的に、抜き出すエネルギーバンドは次の 3 領域とした。

```
0.4-0.9keV 109-247ch
2.23-4.0keV 611-1096ch
0.71-4.0keV 195-1096ch
```

これら 3 つの場合についてリダクション時のソース領域の幅も様々な長さに変更しながらタイミング解析を行った。

2.8.2 efsearch(畳み込みライトカーブの χ^2 検定)

各ソース幅ごとの efsearch の結果を図 2.77、2.78 にまとめる。

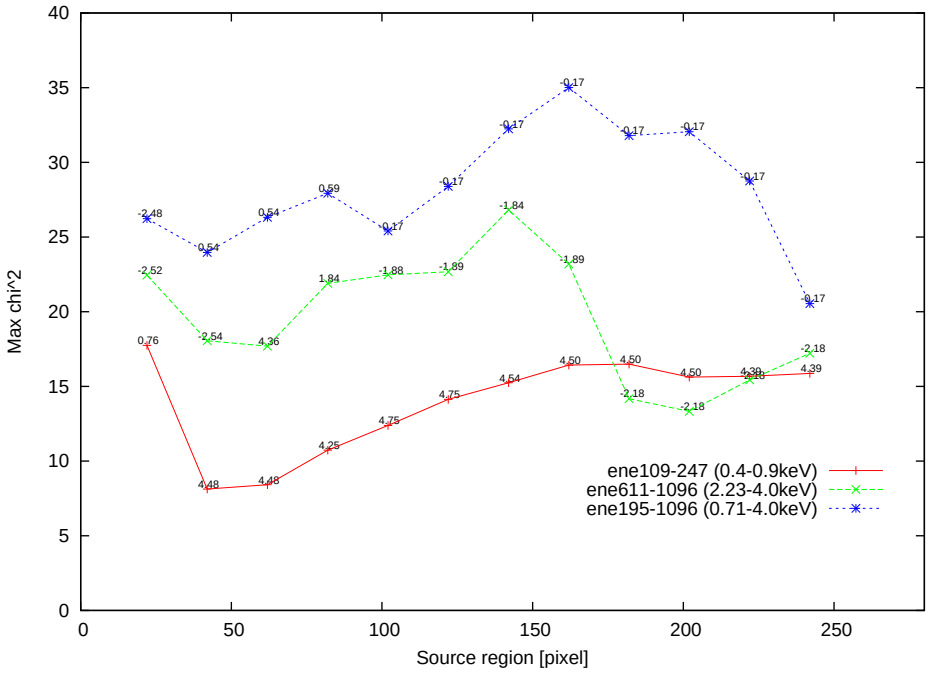

図 2.77: 2006 年の観測データについて、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 χ^2 の値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

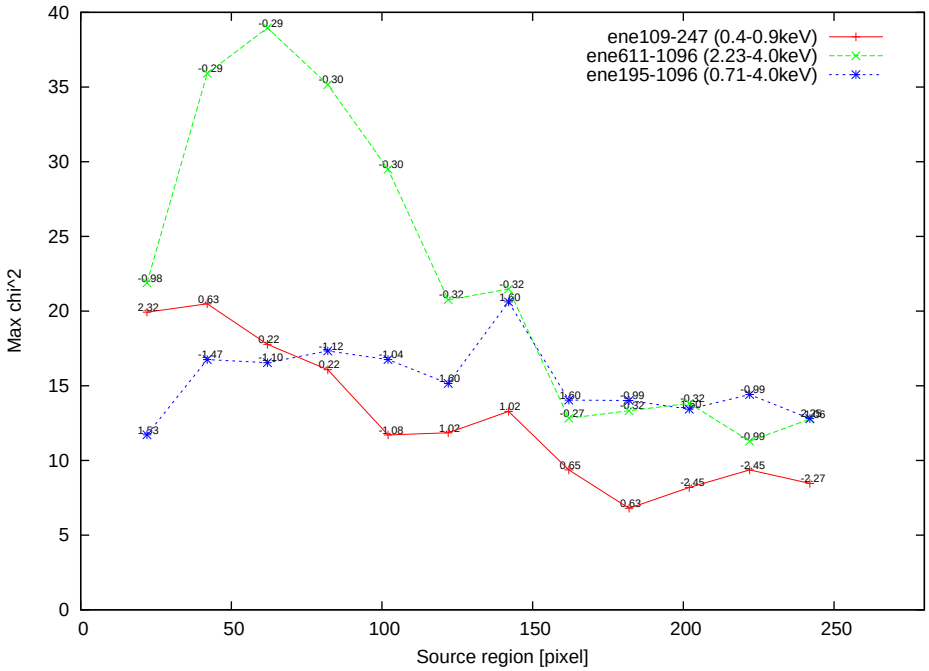

図 2.78: 2007 年の観測データについて、各エネルギー幅ごとに、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 χ^2 の値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

efsearch の結果からは 2006、2007 年共に *Shallow1st* 高温側 (0.71-4.0keV) でソース領域幅が 142pixel の場合が良い。ただし、2007 年は *Deep1st* 高温側 (2.23-4.0keV) でソース領域幅が 62pixel でも chi2 の値が大きくなっている。周期もずれておらず、誤差の範囲となった。

2.8.3 Ztest

2006、2007 年それぞれについて各エネルギーごと、各ソース幅ごとの Ztest の結果を以下の図にまとめた。

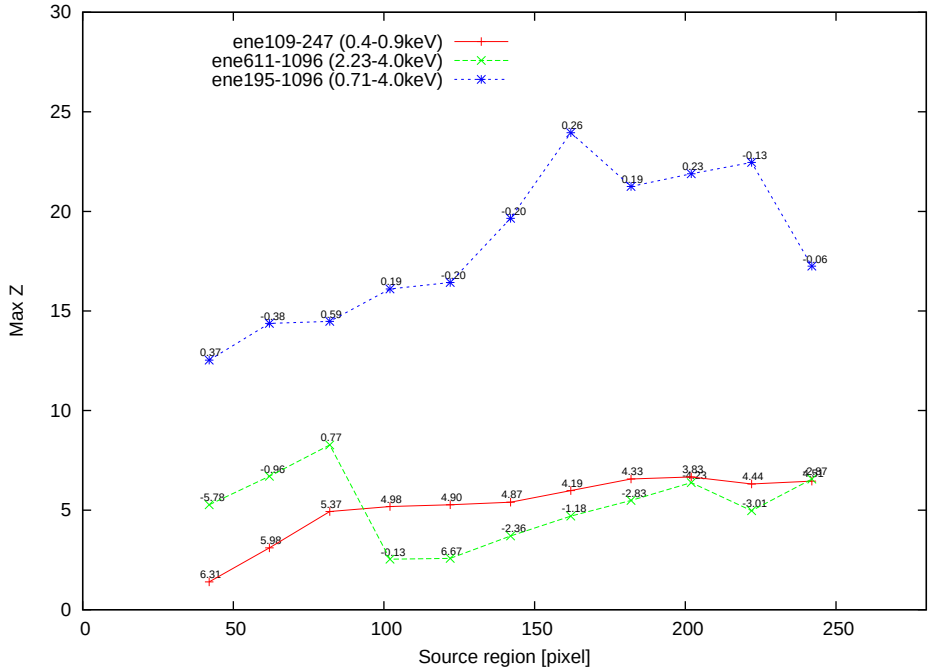

図 2.79: 2006 年の観測データについて、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 Z 値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

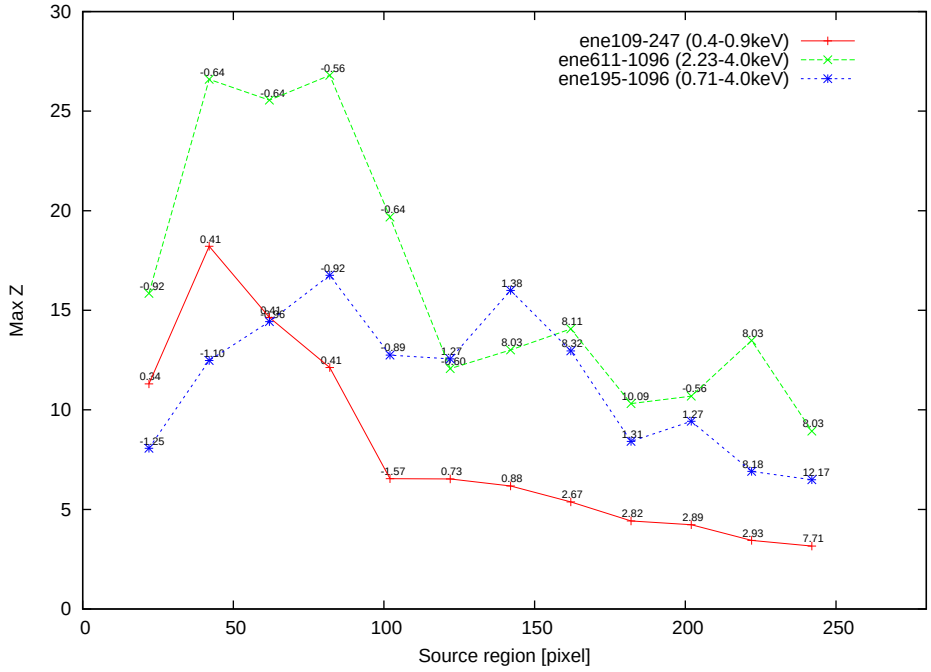

図 2.80: 2007 年の観測データについて、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 Z 値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

Ztest の結果から、2006 年については *Shallow1st* 高温側 (0.71-4.0keV) でソース領域幅が 162pixel が最も良い。2007 年の 0.71-4.0keV の中では 142pixel の方が良い。162pixel ではピークの周期がずれており、Z の値も小さい。また、Ztest についても 40-82pixel に Z の値の高いピークがある。ただし周期が多少ずれている。

efsearch、Ztest の結果を踏まえると、タイミング解析に使用するエネルギーとソース領域幅は両年とも *Shallow1st* 高温側 (0.71-4.0keV)、ソース領域幅 142pixel が良いと判断した。ただし、2007年のデータに関しては *Deep1st* 高温側 (2.23-4.0keV)、ソース領域幅 62pixel についてもタイミング解析を行うことにした。

2.8.4 タイミング解析

前サブセクションで決まったエネルギー範囲、ソース領域の幅でイベントファイルを再び作成し、タイミング解析をやり直した。これまでのタイミング解析と同様に 1 回目の XIS023 を合わせたもの、2 回目の XIS03、そして全て合わせたもの 3 グループ (グループ 1-3) に分けて解析した。

パワースペクトル

まず、パワースペクトルを作成した。各グループごとのパワースペクトルを図 2.81 から 2.84 に示す。

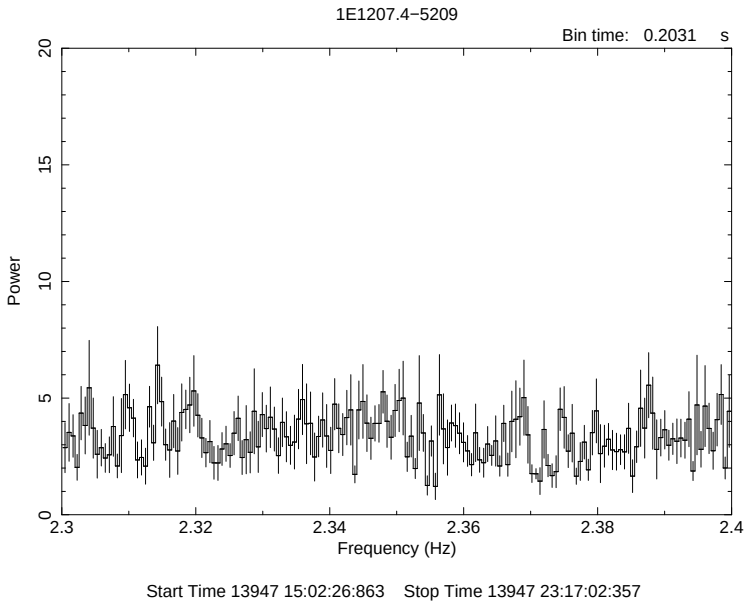

図 2.81: グループ 1(2006 年の XIS0123 を合わせたもの))、エネルギー領域が 0.71-4.0keV の場合のパワースペクトル。2.3∼2.4Hz までを表示 (周期 0.424130 秒=2.357768Hz)。

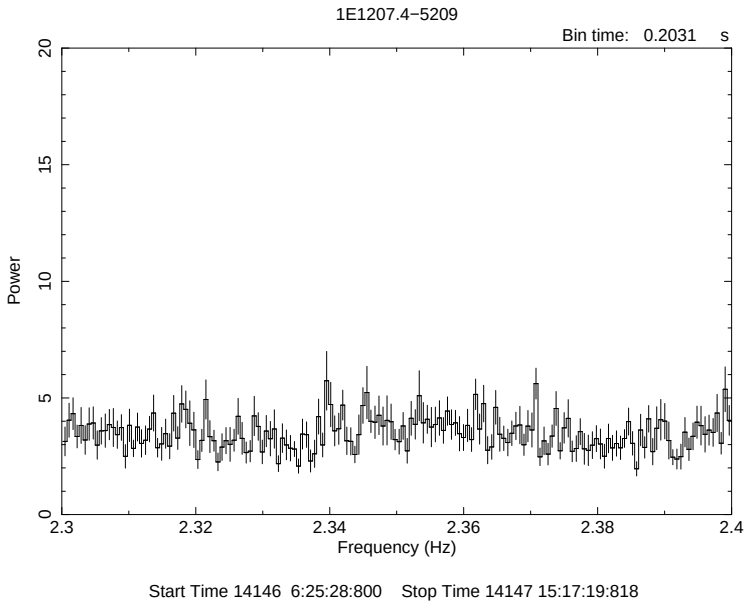

図 2.82: グループ 2(2007 年の XIS1)、エネルギー領域が 0.71-4.0keV の場合のパワースペクトル。

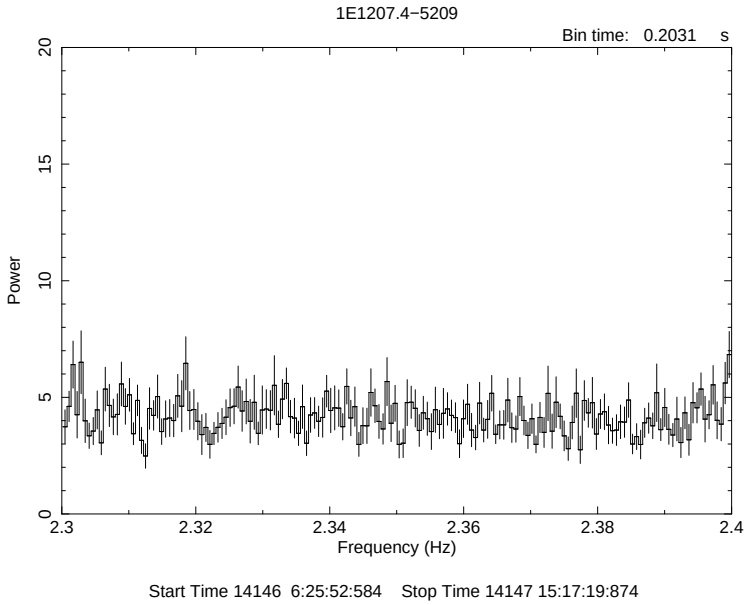

図 2.83: グループ 2(2007 年の XIS1)、エネルギー領域が 2.23-4keV の場合のパワースペクトル。

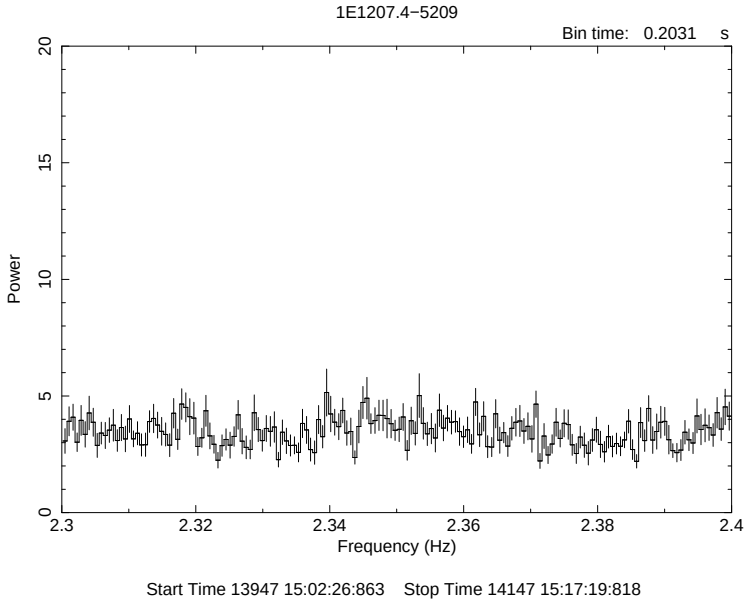

図 2.84: グループ 3(全て合わせたもの))、エネルギー領域が 0.71-4.0keV の場合のパワースペクトル。

どのグループでも予想した周波数 (2.3578Hz) 付近にピークを確認出来なかった。

efsearch(畳み込みライト カーブの χ^2 検定)

次に efsearch を行った。各グループでの結果を図 2.85 から図 2.89 に示す。グループ 1 については 0.424130 秒付近にピークを確認した。周期分解能 1×10^{-9} 秒で 20000step、efsearch をした場合、一番 χ^2 が大きいのは 0.424129829 秒でその時の χ^2 の値は 33.15。広い周期範囲で見てもこれ以上のピークは確認出来なかった。

グループ 2 については 0.71-4.0keV の場合、目立ったピークは確認できない。拡大するとある程度の大きさのピークを確認した。周期分解能 1×10^{-9} 秒で 10000step の efsearch をした場合、一番 χ^2 が大きいのは 0.42413160 秒でその時の χ^2 の値は 20.61。しかし、ene611_1096(2.23-4keV) の場合、先行研究で見つかった周期付近 (0.424131 秒) にピークを確認した。周期分解能 1×10^{-9} 秒で 20000step の efsearch をした場合、一番 χ^2 が大きいのは 0.424129709 秒でその時の χ^2 の値は 39.42。

グループ 3 については周期分解能を細かくしていくと先行研究で見つかった周期付近 (0.42413123 秒) にピークを確認した。周期分解能 1×10^{-9} 秒で 20000step の efsearch をした場合、一番 χ^2 が大きいのは 0.424129166 秒でその時の χ^2 の値は 33.92。

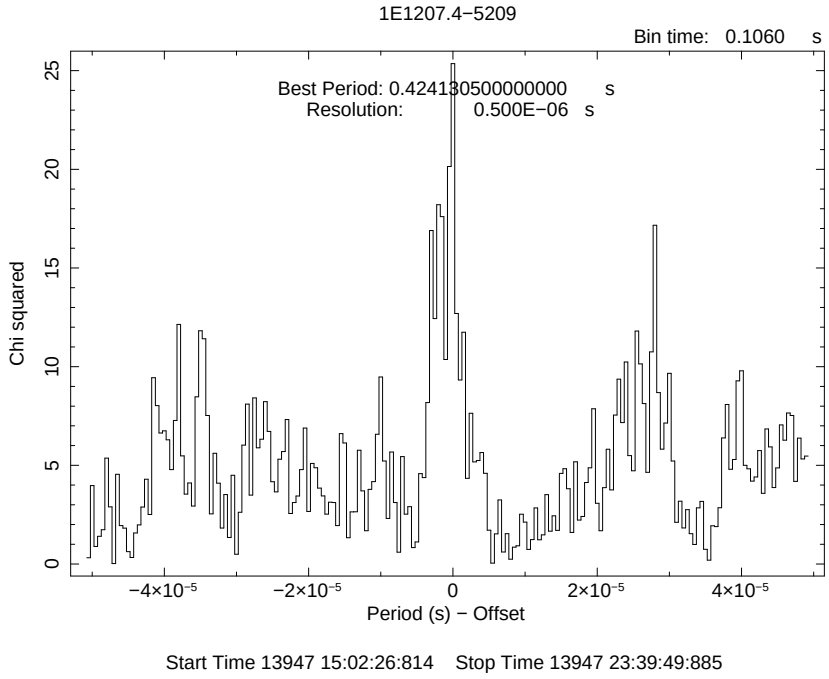

図 2.85: グループ 1(2006 年の XIS023 を合わせたもの))、エネルギー領域が 0.71-4.0keV の場合の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 5×10^{-7} で 200step。

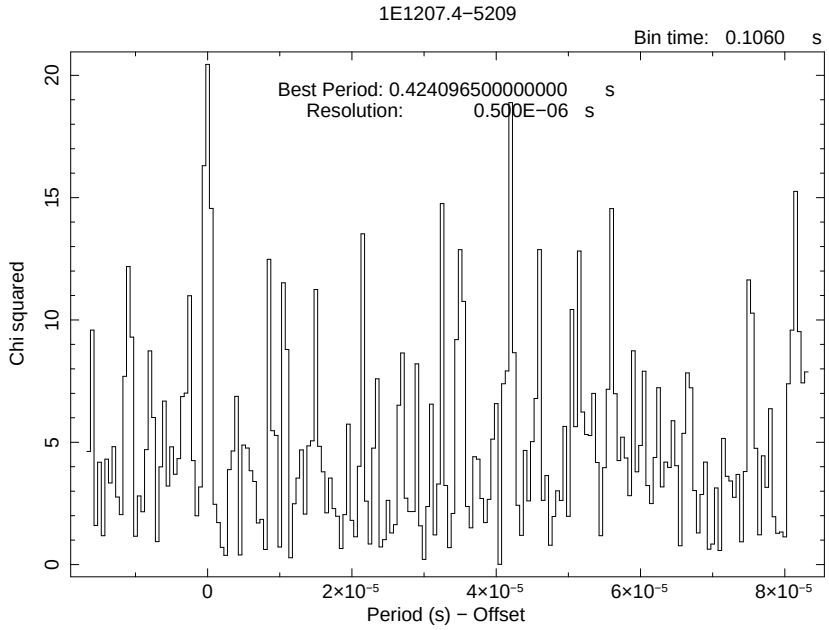

図 2.86: グループ 2(2007 年の XIS03 を合わせたもの)、エネルギー領域が 0.71-4.0keV の場合の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 5×10^{-7} 秒で 200step。

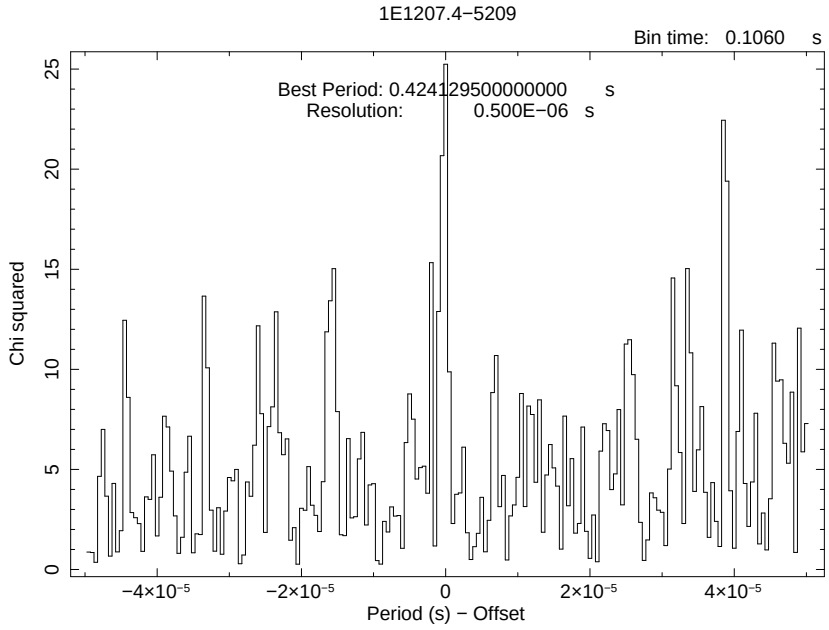

図 2.87: グループ 2(2007 年の XIS03 を合わせたもの)、エネルギー領域が 2.23-4.0keV の場合の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 5×10^{-7} 秒で 200step。

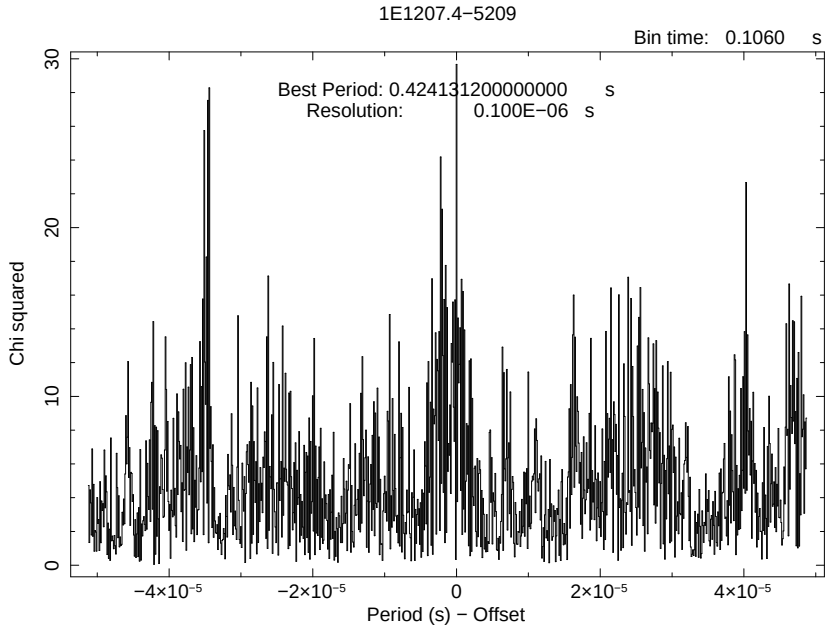

図 2.88: グループ 3(全てを合わせたもの))、エネルギー領域が 0.71-4.0keV の場合の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 1×10^{-7} 秒で 1000step。

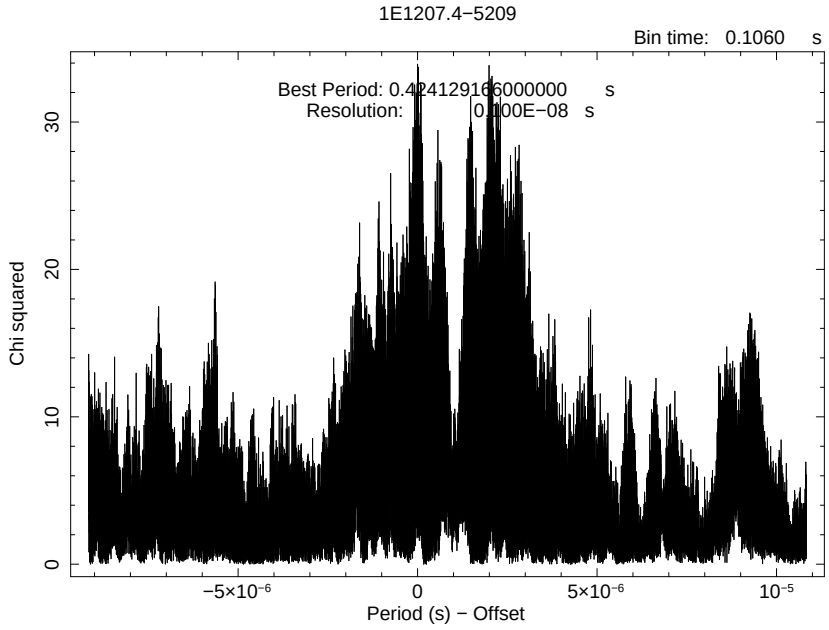

図 2.89: グループ 3(全てを合わせたもの))、エネルギー領域が 0.71-4.0keV の場合の efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 1×10^{-9} 秒で 20000step。

最後に efsearch の結果をまとめる。それぞれのグループについての 0.424130 秒付近における efserch の結果を χ^2 と自由度から求めたピークの有意水準と共にまとめると表 2.21 の様になった。最初の 3 行が前セクションの結果。その次の 4 行が本セクションの結果である。

表 2.21: 各グループにおける 0.424130 秒付近における efserch の結果とピークの有意水準。

group	χ^2	P center [s]	ΔP [s]	bin	peak P [s]	dof	Prob.(right-tail)
G1(0.4-2.5keV)	24.55	0.424130	10^{-9}	20000	0.424135204	3	1.92×10^{-5}
G2(0.4-2.5keV)	19.00	0.424130	10^{-9}	20000	0.424130724	3	2.73×10^{-4}
G3(0.4-2.5keV)	36.53	0.424130	10^{-9}	20000	0.424131157	3	6.00×10^{-8}
G1(0.71-4.0keV)	33.15	0.424130	10^{-9}	20000	0.424129829	3	3.00×10^{-7}
G2(0.71-4.0keV)	20.61	0.424130	10^{-9}	10000	0.42413160	3	1.26×10^{-4}
G2(2.23-4keV)	39.42	0.424130	10^{-9}	20000	0.424129709	3	1.00×10^{-8}
G3(0.71-4.0keV)	33.92	0.424130	10^{-9}	20000	0.424129166	3	2.10×10^{-7}

efold(畳み込みライト カーブ)

各グループの efsearch で見つかった主なピークに対して畳み込みライトカーブを作成し、周期内での変動を確認した。各畳み込みライトカーブを図 2.90 から図 2.93 に示す。efseach で決まった 0.424130 秒付近のピークで畳み込みライトカーブを描いた結果、全てのグループについて変動を持った一山構造の folded ライトカーブが得られた。ただしグループ 2(2007 年) の *Deep1st* 高温側 (2.23-4.0keV) では大きな振幅にはならなかった。

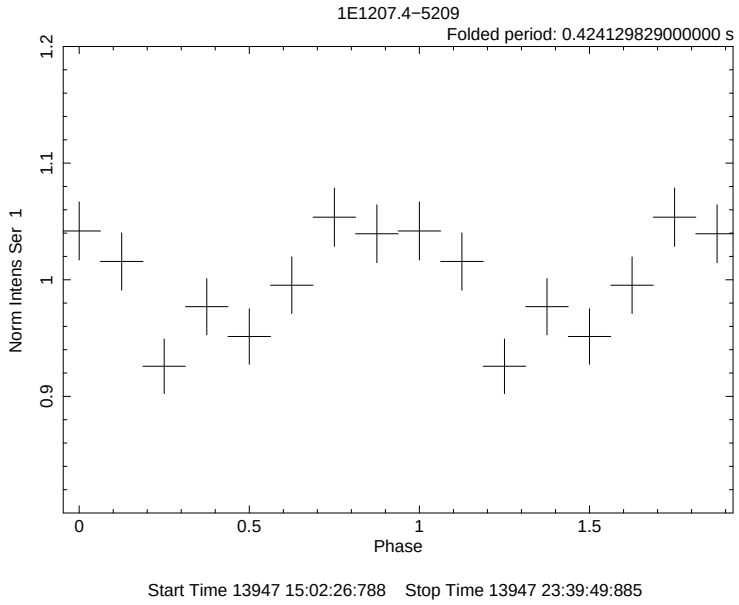

図 2.90: グループ 1(2006 年の XIS023 を合わせたもの))、エネルギー領域が 0.71-4.0keV のデータについて 0.424129829 秒で efold した結果。

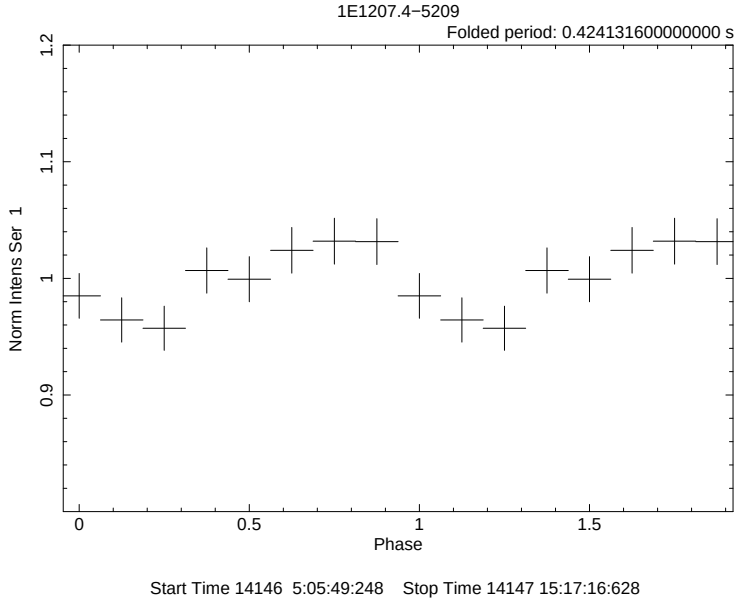

図 2.91: グループ 2(2007 年の XIS03)、エネルギー領域が 0.71-4.0keV のデータについて 0.42413160 秒で efold した結果。

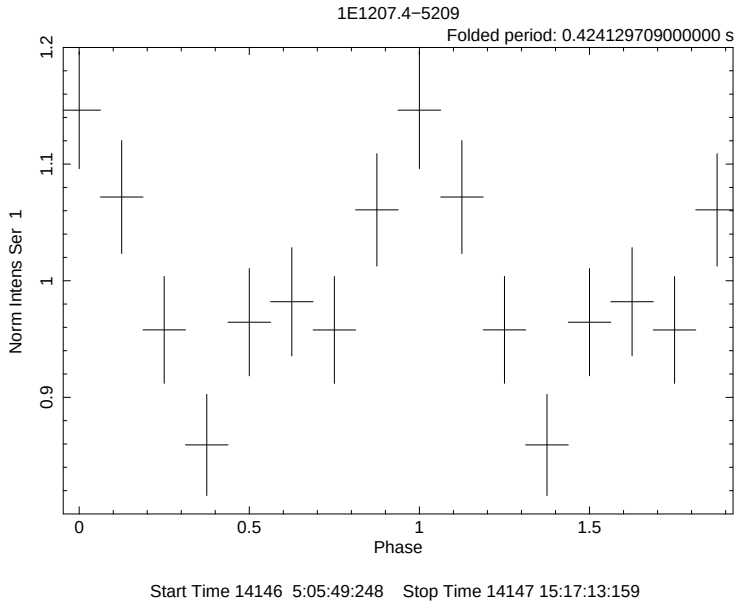

図 2.92: グループ 2(2007 年の XIS03)、エネルギー領域が 2.23-4.0keV のデータについて 0.424129709 秒で efold した結果。

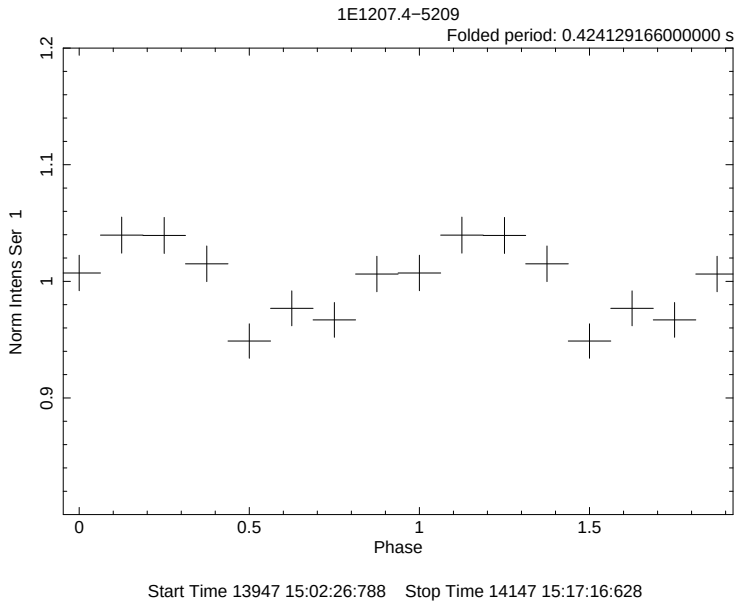

図 2.93: グループ 3(全てを合わせたもの)、エネルギー領域が 0.71-4.0keV のデータについて 0.424129166 秒で efold した結果。

Ztest

各グループの Ztest の結果を図 2.94 から図 2.97 に示す。先行研究で見つかった周期付近で efsearch と同じ部分にピークを検出したが、他にも同程度かまたはそれ以上のピークが確認された。ただし、グループ 3 については 2 回の観測を合わせたためか、efsearch 同様に Z の値がバタついていた。これらのピークに対し、ガウス関数でフィッティングを行い、中心とその 90%エラーを求めた。ただし、グループ 3 についてはフィッティングを行っていない。フィッティング結果をまとめると表 2.22 の様になった。最初の 3 行が前セクションの結果。その次の 4 行が本セクションの結果である。

表 2.22: 各グループにおけるピークのフィッティングパラメータ。

group	center[s]	sigma [s]	90%err [s]	Z
G1(0.4-2.5keV)	0.42413133	2.37×10^{-6}	3.90×10^{-6}	18.00
G2(0.4-2.5keV)	0.42413113	5.27×10^{-7}	8.67×10^{-7}	14.67
G3(0.4-2.5keV)	0.42413116	7.93×10^{-7}	1.30×10^{-6}	30.32
G1(0.71-4.0keV)	0.42412981	2.19×10^{-6}	3.60×10^{-6}	19.66
G2(0.71-4.0keV)	0.42413139	6.29×10^{-7}	1.03×10^{-6}	15.95
G2(2.23-4.0keV)	0.42412937	5.49×10^{-7}	9.03×10^{-7}	25.67
G3(0.71-4.0keV)	0.42413132	—	—	30.983 (最大値)

Ztest の結果をまとめると、*Deep1st* の場合、低温側、高温側共に大きなピークは検出できなかった。*Shallow1st* 高温側 (0.71-4.0keV) ではピークを確認し、Z は 20 程度で周期は先行研究から予想される周期と良く合っている。

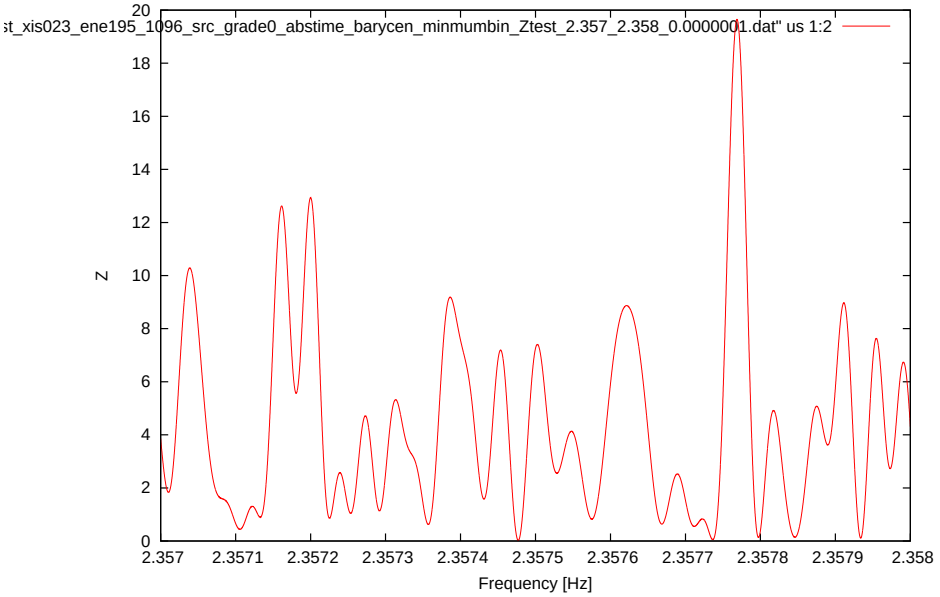

図 2.94: グループ 1(2006 年の XIS023 を合わせたもの)、エネルギー領域が 0.71-4.0keV のデータについて 2.357 から 2.358 Hz を 1×10^{-7} Hz の分解能で Ztest した結果。

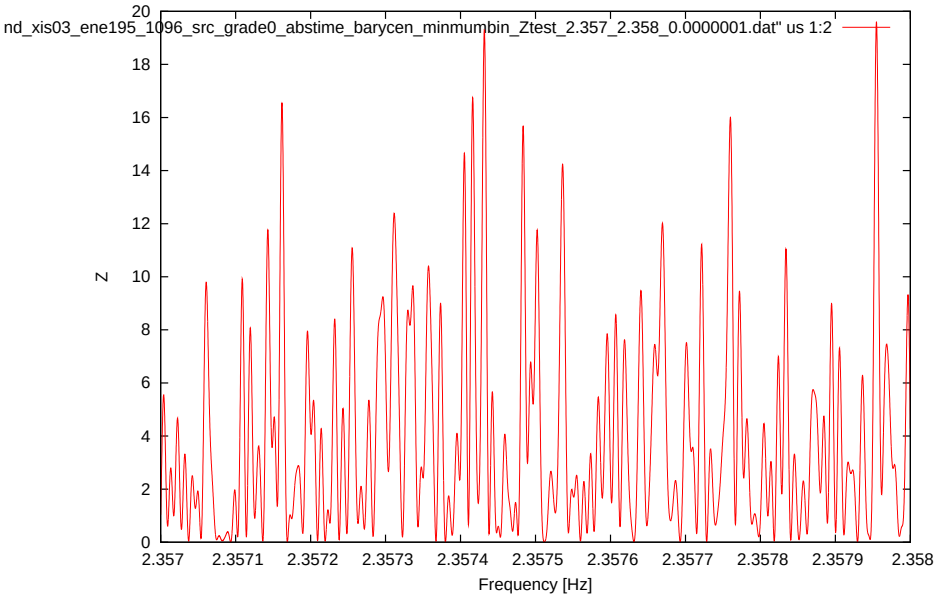

図 2.95: グループ 2(2007 年の XIS03)、エネルギー領域が 0.71-4.0keV のデータについて 2.357 から 2.358 Hz を 1×10^{-7} Hz の分解能で Ztest した結果。

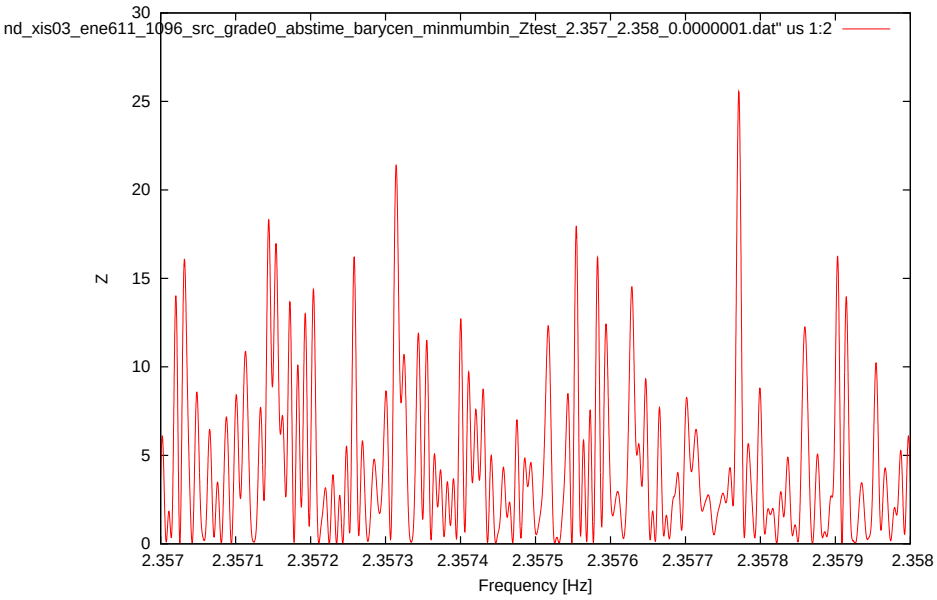

図 2.96: グループ 2(2007 年の XIS03)、エネルギー領域が 2.23-4.0keV のデータについて 2.357 から 2.358 Hz を 1×10^{-7} Hz の分解能で Ztest した結果。

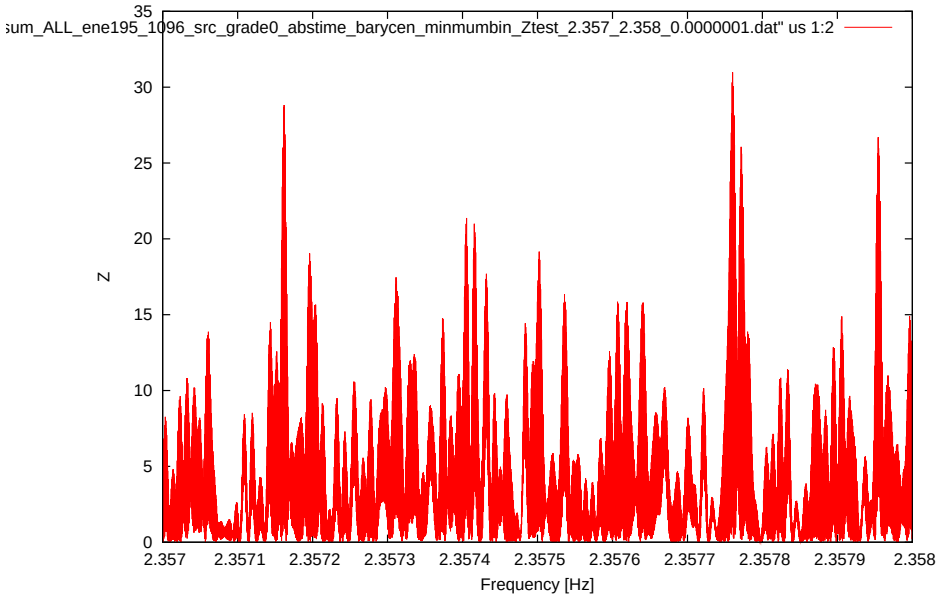

図 2.97: グループ 3(全てを合わせたもの)、エネルギー領域が 0.71-4.0keV のデータについて 2.357 から 2.358 Hz を 1×10^{-7} Hz の分解能で Ztest した結果。

2.8.5 Ztest で見つかったピークの efold

最後に Ztest で見つかったピークの周期で efold を行い、畳み込みライトカーブを描いた。また、同じ周期で他のエネルギーバンドについても描いた。この際のソース領域幅は元のものと同じにしている。各グループの結果を図 2.98 から図 2.109 に示す。

結果をまとめると、どのグループでも基本のエネルギーバンド以外では振幅はそれほど大きくならず、特に低温側の振幅は小さかった。また、それぞれのグループ内では畳み込みライトカーブの位相は変わらなかった。

グループ 1(2006 年の XIS0123 を合わせたもの)

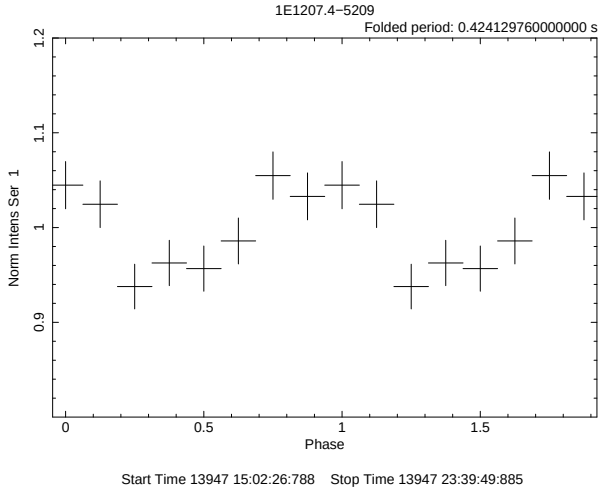

図 2.98: *Shallow1st* の高温側 (0.71-4.0keV) について、0.4241297600 秒で efold した結果。

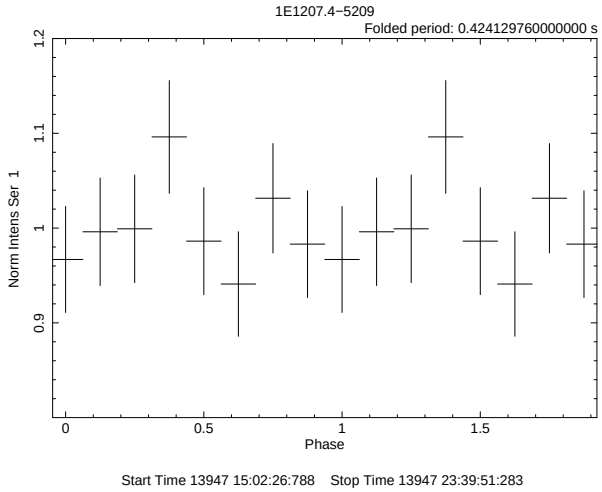

図 2.99: *Deep1st* の低温側 (0.4-0.9keV) について、0.4241297600 秒で efold した結果。

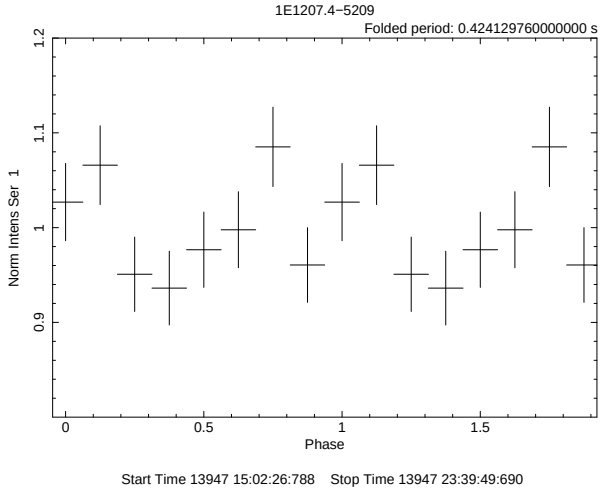

図 2.100: *Deep1st* の高温側 (2.23-4.0keV) について、0.4241297600 秒で efold した結果。

グループ 2(2007 年の XIS03 を合わせたもの)、エネルギー領域が 0.71-4.0keV

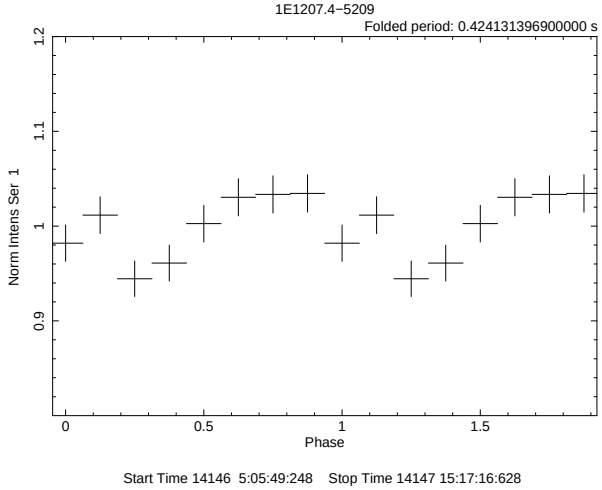

図 2.101: *Shallow1st* の高温側 (0.71-4.0keV) について、0.4241313969 秒で efold した結果。

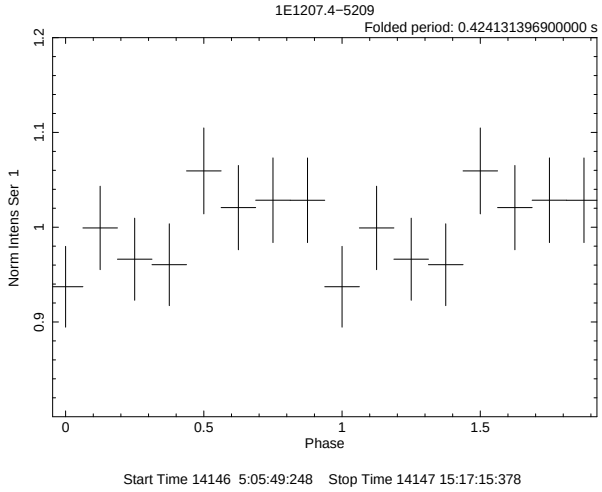

図 2.102: *Deep1st* の低温側 (0.4-0.9keV) について、0.4241313969 秒で efold した結果。

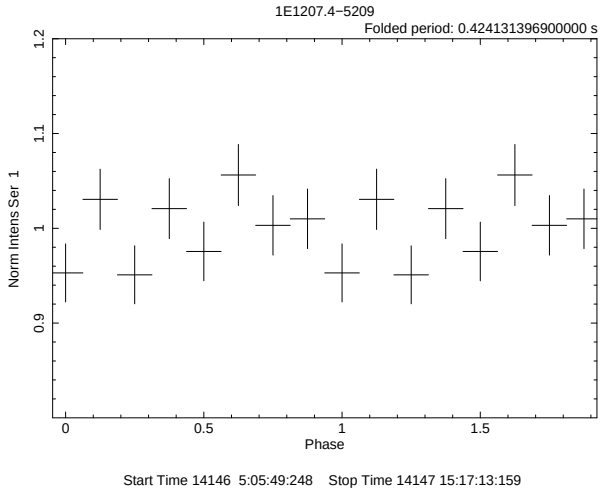

図 2.103: *Deep1st* の高温側 (2.23-4.0keV) について、0.4241313969 秒で efold した結果。

グループ 2(2007 年の XIS03 を合わせたもの)、エネルギー領域が 2.23-4.0keV

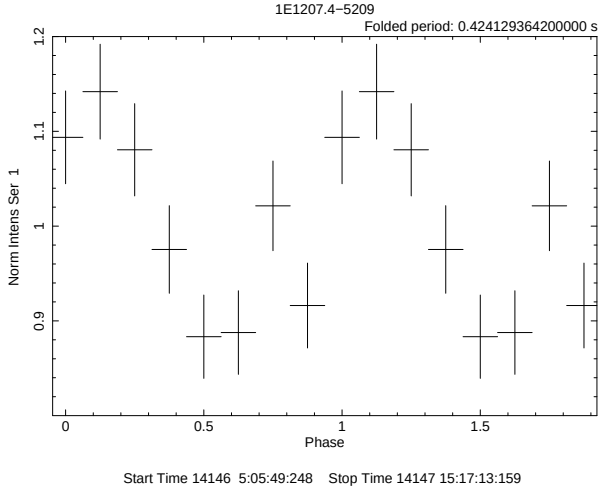

図 2.104: *Deep1st* の高温側 (2.23-4.0keV) について、0.4241293642 秒で efold した結果。

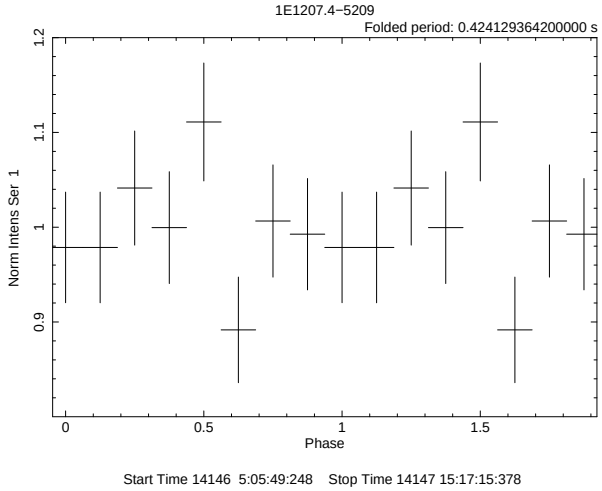

図 2.105: *Deep1st* の低温側 (0.4-0.9keV) について、0.4241293642 秒で efold した結果。

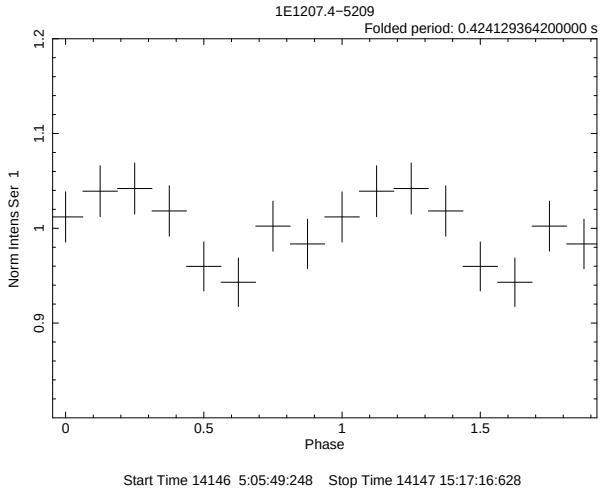

図 2.106: *Shallow1st* の高温側 (0.71-4.0keV) について、0.4241293642 秒で efold した結果。

グループ 3(全て)

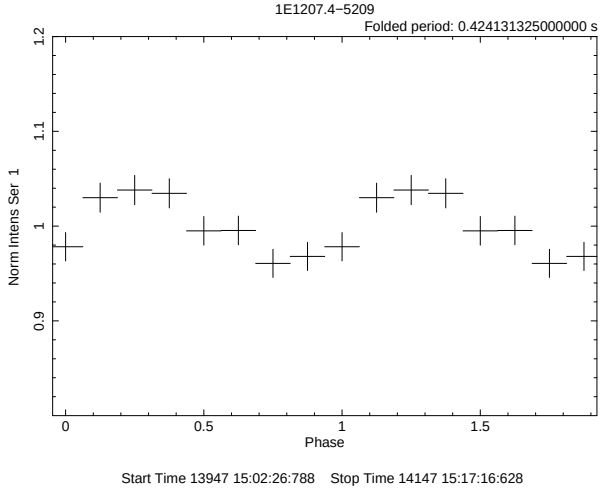

図 2.107: *Shallow1st* の高温側 (0.71-4.0keV) について、0.4241313250 秒で efold した結果。

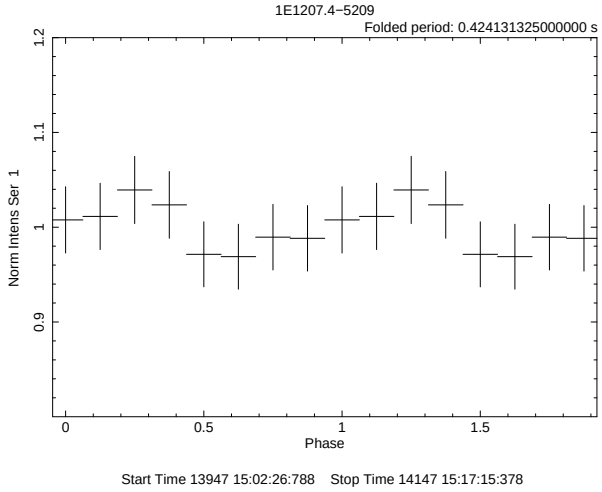

図 2.108: *Deep1st* の低温側 (0.4-0.9keV) について、0.4241313250 秒で efold した結果。

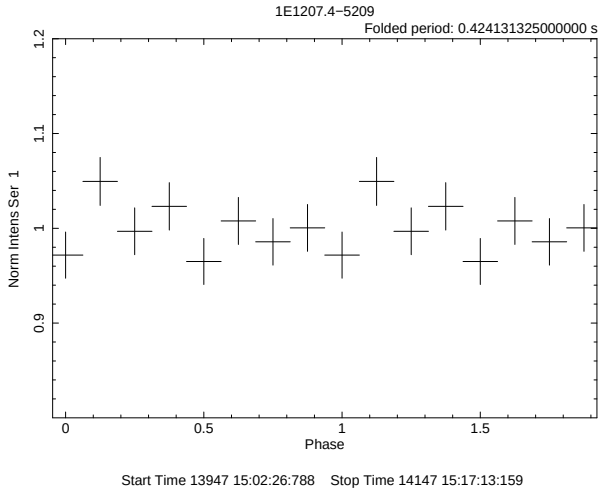

図 2.109: *Deep1st* の高温側 (2.23-4.0keV) について、0.4241313250 秒で efold した結果。

2.8.6 まとめ

スペクトル解析の結果から、連続成分として 2 温度黒体放射が最も良くスペクトルを説明できる事が分かった。そこで各黒体放射成分ごとの周期的変動を調査するため、できるだけ片方の黒体放射成分を抑えたエネルギー分けをしてからタイミング解析 (efsearch、Ztest、efold) を行った。

まず、適切なエネルギー範囲の決定を行った。*Deep1st* と *Shallow1st*、2 つのモデルを仮定し、片方の黒体放射成分の寄与を少なくなるエネルギーを検証したところ、*Deep1st* では低温側が 0.4-0.9keV、高温側が 2.23-4.0keV となり、また、*Shallow1st* モデルの場合、高温側のみで 0.71-4.0keV となった。

次にこれらのエネルギー範囲についてソース領域の幅を変えながら efsearch と Ztest を行い、どの場合が最も良い結果になるか検証した。その結果、2006、2007 両年とも *Shallow1st* モデル高温側 (0.71-4.0keV) のソース幅 142pixel が良いと分かった。なお、*Deep1st* 低温側 (0.4-0.9keV) は efsearch、Ztest 共に大きなピークを得られなかった。また、*Deep1st* 高温側 (2.23-4.0keV) については 2006 年では efsearch、Ztest 共に大きなピークを得られなかったが、2007 年の 62pixel 付近では efsearch、Ztest 共に大きなピーク (142pixel の場合以上のもの) を得られた。

そこで *Shallow1st* 高温側 (0.71-4.0keV) のソース幅 142pixel を基本の条件として詳しいタイミング解析を行い、2007 年に限り、*Deep1st* 高温側 (2.23-4.0keV) の 62pixel の条件についてもタイミング解析を行った。

結果を以前のタイミング解析の結果 (0.4-2.5keV) と比較しながらまとめると表 2.23、2.24 の様になった。高温成分の寄与が高い *Shallow1st* 高温側 (0.71-4.0keV) のデータを使用したタイミング解析の方が広いエネルギー領域を使用した場合より大きなピークを検出している。

表 2.23: 各グループにおける 0.424130 秒付近における efserch の結果とピークの有意水準。

group	χ^2	P center [s]	ΔP [s]	bin	peak P [s]	dof	Prob.(right-tail)
G1(0.4-2.5keV)	24.55	0.424130	10^{-9}	20000	0.424135204	3	1.92×10^{-5}
G2(0.4-2.5keV)	19.00	0.424130	10^{-9}	20000	0.424130724	3	2.73×10^{-4}
G3(0.4-2.5keV)	36.53	0.424130	10^{-9}	20000	0.424131157	3	6.00×10^{-8}
G1(0.71-4.0keV)	33.15	0.424130	10^{-9}	20000	0.424129829	3	3.00×10^{-7}
G2(0.71-4.0keV)	20.61	0.424130	10^{-9}	10000	0.42413160	3	1.26×10^{-4}
G2(2.23-4keV)	39.42	0.424130	10^{-9}	20000	0.424129709	3	1.00×10^{-8}
G3(0.71-4.0keV)	33.92	0.424130	10^{-9}	20000	0.424129166	3	2.10×10^{-7}

表 2.24: 各グループにおける Ztest で見つかったピークのフィッティングパラメータ。

group	center[s]	sigma [s]	90%err [s]	Z
G1(0.4-2.5keV)	0.42413133	2.37×10^{-6}	3.90×10^{-6}	18.00
G2(0.4-2.5keV)	0.42413113	5.27×10^{-7}	8.67×10^{-7}	14.67
G3(0.4-2.5keV)	0.42413116	7.93×10^{-7}	1.30×10^{-6}	30.32
G1(0.71-4.0keV)	0.42412981	2.19×10^{-6}	3.60×10^{-6}	19.66
G2(0.71-4.0keV)	0.42413139	6.29×10^{-7}	1.03×10^{-6}	15.95
G2(2.23-4.0keV)	0.42412937	5.49×10^{-7}	9.03×10^{-7}	25.67
G3(0.71-4.0keV)	0.42413132	—	—	30.983 (最大値)

先行研究との比較

最後に先行研究 (Gotthelf and Halpern 2007) の結果と比べすざくデータから求めた周期の値はどの程度かまとめると表 2.25 の様になった。この表を使用し、横軸に観測日 (MJD:修正ユリウス日)、縦軸に Ztest で決まった周期をプロットしたものが次のグラフである。

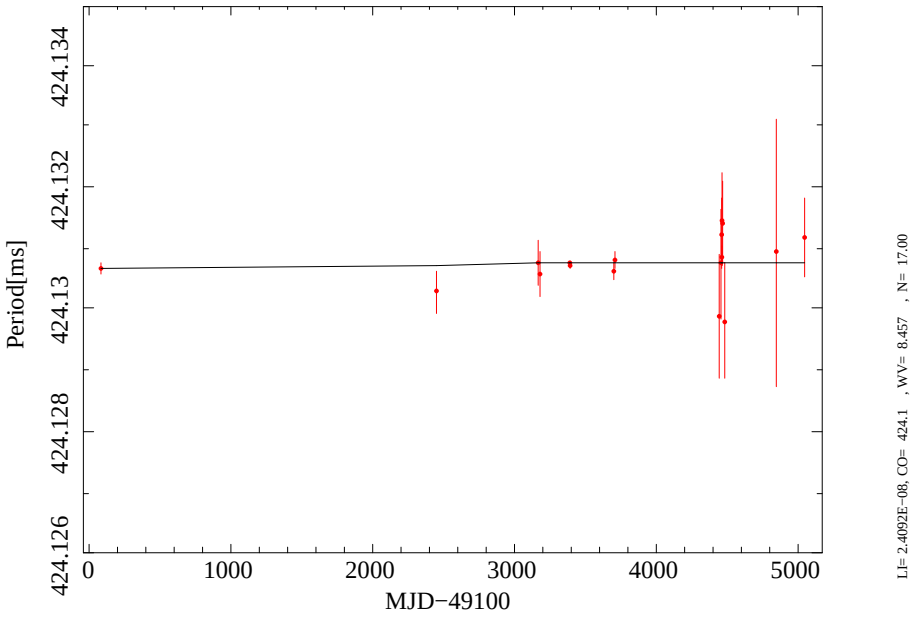

図 2.110: 各観測データの Ztest で決まった周期。

一次関数でフィッティングした結果、周期変化率は $\dot{P} = 2.891 \times 10^{-16}$ s/s となり 90%エラーの範囲は (-2.872×10^{-16} s/s から 5.763×10^{-16} s/s)。これは先行研究 (Gotthelf+ 2007) の結果と誤差の範囲で一致していた。

これまでの結果をまとめると、*Deep1st*が正しいと仮定した場合、低温成分では efsearch、Ztest 共に周期ピークを確認出来なかった。また、高温成分では一部のソース幅で efserch、Ztest 共に大きなピークを確認できた。しかし、*Shallow1st* モデルが正しいと仮定した場合、高温側では efsearch、Ztest 共にピークを確認した。しかもその値は以前 0.4-2.5keV でタイミング解析を行った場合より大きい。また、efold にも以前よりはっきりとした変動を確認した。ただし、低温側は分解でき無かった。各グループで大きなピークが見つかったエネルギーレンジ以外のレンジでも efold を描いたところ、それぞれのグループで低温は振幅が小さく、高温側は振幅が大きい。また位相は変わらなかった。

表 2.25: 過去の観測のタイミング解析結果をまとめた論文 (Gotthelf and Halpern 2007) のデータにすざくの解析結果を追加したもの。

Set	衛星	検出器/モード	観測 ID/Sequence No.	日時 (UT)	期間 (ks)	開始時刻 (MJD)	周期[1](ms)	Z_1^2	参考文献
1 . .	*ROSAT*	PSPC	500239500243	1993 Jul 15-25	836.7	49,183.452	424.13071(10)	15.9	
2 . .	*Chandra*	ACIS-S/CC	0751/500047	2000 Jan 06	32.5	51,549.625	424.13030(34)	73.8	1, 2, 3
3 . .	*XMM*	EPIC-pn/SW	0113050501	2001 Dec 23	26.8	52,266.799	424.13076(36)	113.1	4, 3
	Chandra	ACIS-S/CC	2799/500249	2002 Jan 05	30.4	52,279.952	424.13062(38)	62.2	2, 3
				Combined[2]	1167.3	52,266.799	424.130749(16)	169.6	
4 . .	*XMM*	EPIC-pn/SW	0155960301	2002 Aug 04	128.0	52,490.306	424.130769(41)	352.6	5, 6, 3
	XMM	EPIC-pn/SW	0155960501	2002 Aug 06	128.4	52,492.309	424.130749(40)	363.3	5, 6, 3
				Combinedb	302.0	52,490.306	424.130748(11)	712.7	
5 . .	*Chandra*	ACIS-S/CC	3915/500394	2003 Jun 10	155.7	52,800.443	424.13064(13)	26.9	3 †
	Chandra	ACIS-S/CC	4398/500394	2003 Jun 18	115.1	52,808.369	424.13083(16)	29.3	3 †
				Combined[2]	799.9	52,800.443	424.130733(12)	53.3	
6 . .	*XMM*	EPIC-pn/SW	0304531501	2005 Jun 22	14.9	53,543.515	424.1299(10)	41.7	7
	XMM	EPIC-pn/SW	0304531601	2005 Jul 05	18.0	53,556.038	424.13078(92)	47.5	7
	XMM	EPIC-pn/SW	0304531701	2005 Jul 10	20.4	53,561.280	424.13126(59)	58.7	7
	XMM	EPIC-pn/SW	0304531801	2005 Jul 11	63.0	53,562.090	424.13088(15)	135.7	7
	XMM	EPIC-pn/SW	0304531901	2005 Jul 12	13.8	53,563.283	424.13150(75)	42.2	7
	XMM	EPIC-pn/SW	0304532001	2005 Jul 17	16.5	53,568.016	424.13145(66)	91.2	7
	XMM	EPIC-pn/SW	0304532101	2005 Jul 31	17.6	53,582.587	424.12910(96)	32.3	7
				Combined[2]	3393.6	53,543.515	424.1307496(40)	411.9	
Set	衛星	検出器/モード	観測 ID/Sequence No.	日時 (UT)	期間 (ks)	開始時刻 (MJD)	周期[1](ms)	Z21	
7 . .	*Suzaku*	XIS/P-sum	401030010	2006 Jul 30 - Aug 1	17.9	53,946.568	424.12981	19.7	
	Suzaku	XIS/P-sum	401030020	2007 Feb 15-16	43.9	54,146.209	424.13139	15.9	
				Combined[2]	61.8	53,946.568	424.13132	31.0	

[0]参考文献 — (1) Zavlin et al. 2000; (2) Pavlov et al. 2002; (3) Zavlin et al. 2004, (4) Mereghetti et al. 2002a, (5) Bignami et al. 2003, (6) Luca et al. 2004, (7) Woods et al. 2007

[1]Z_n^2 テストから求めた周期。 誤差は 1σ。

[2]足し合わせたデータは中性子星の自転周期の位相を合わせている。

2.9 HXDデータ解析

ここでは HXD の解析についてまとめる。解析方法は標準的な方法を取った。

2.9.1 PINデータ

以下に PIN データの解析結果をまとめる

ライトカーブ

PIN のライトカーブは図 2.111 の様になった。

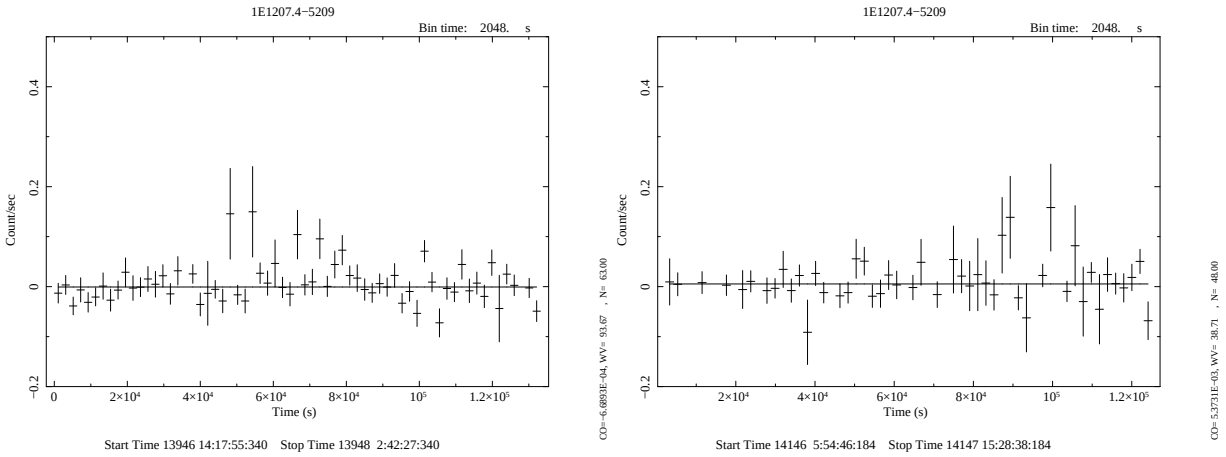

図 2.111: PIN のライトカーブ。バックグラウンドは減算してある。左側が 2006 年の観測、右側が 2007 年の観測。

どちらも有意な検出はできなかった。ライトカーブを定数でフィッティングをした結果以下の様になった。誤差は 90%誤差を表す。

```
1st: -0.0007 +/-0.0047 counts/sec
2nd:  0.0054 +/-0.0067 counts/sec
```

スペクトル

PIN のスペクトルデータと検出器由来のバックグラウンド (NXB)、宇宙から等方的にやってくる X 線放射である Cosmic X-ray Background(CXB) を一緒に表示すると次の図 2.112 の様になった。

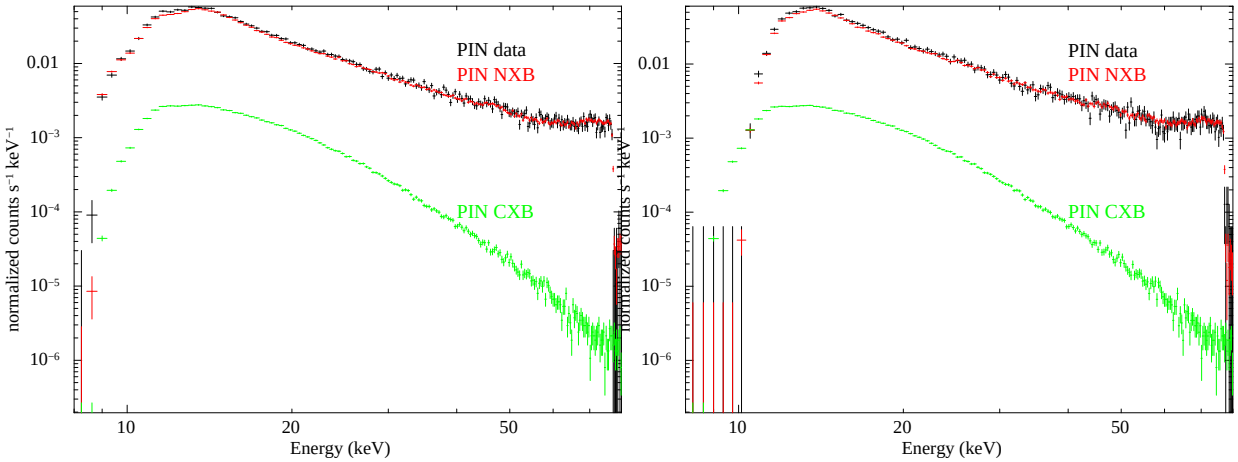

図 2.112: PIN のスペクトル。Data、NXB、CXB をそれぞれ表示。左側が 2006 年の観測、右側が 2007 年の観測。

Data から NXB と CXB を引いたスペクトルと NXB の 5,3,1%を一緒に表示すると次の図 2.113 の様になった。

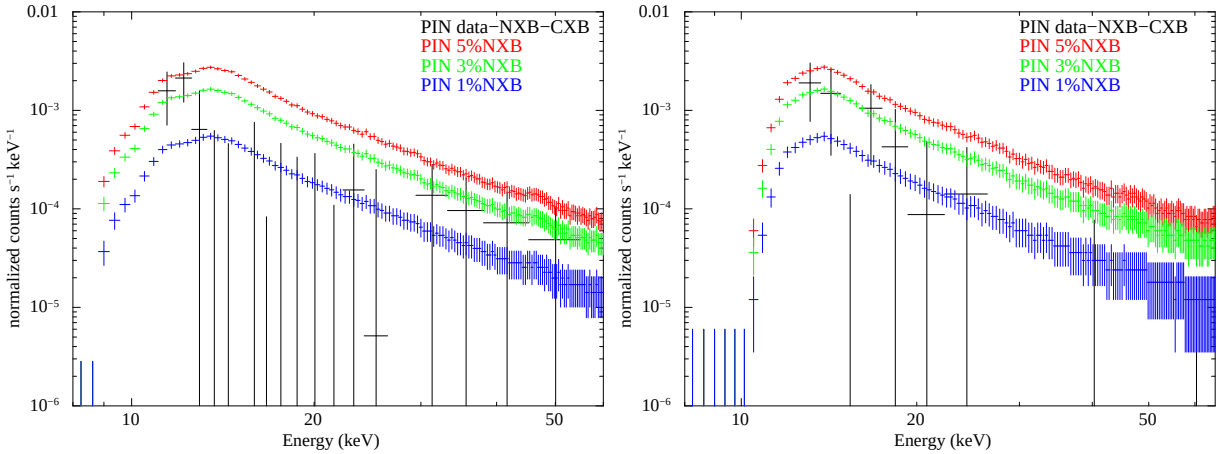

図 2.113: PIN の Data から NXB と CXB を引いたスペクトルと NXB の 5,3,1%。左側が 2006 年の観測、右側が 2007 年の観測。

系統誤差となる NXB の 5%以上のカウントを持つビンが見られないので PIN では有意なカウントが得られなかったと言える。

2.9.2 GSO データ

以下に GSO データの解析結果をまとめる

スペクトル

GSO のスペクトルデータと NXB を一緒に表示すると次の図 2.114 の様になった。

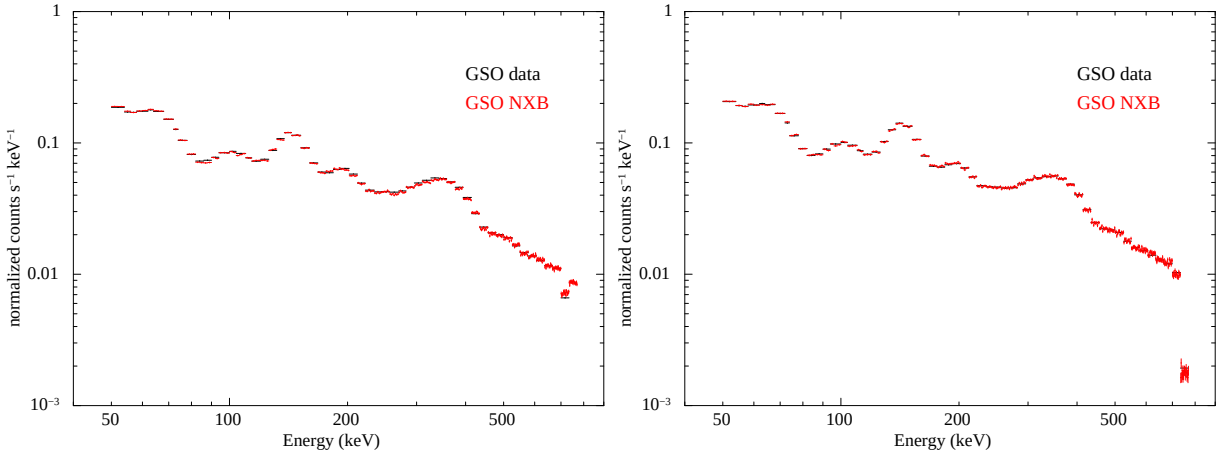

図 2.114: GSO のスペクトル。Data と NXB をそれぞれ表示。左:1 回目の観測。右:2 回目の観測。

Data から NXB を引いたスペクトルと NXB の 3,2,1%を一緒に表示すると次の図 2.115 の様になった。

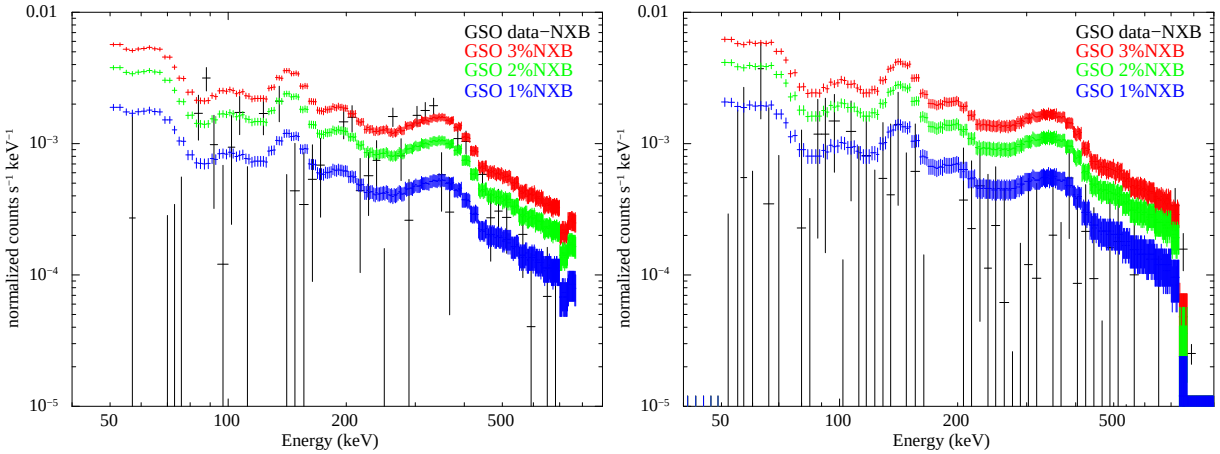

図 2.115: GSO の Data から NXB を引いたスペクトルと NXB の 3,2,1%。左:1 回目の観測。右:2 回目の観測。

系統誤差となる NXB の 3%以上のカウントを持つビンが見られないので GSO では有意なカウントが得られなかったと言える。

2.9.3 まとめ

ライトカーブ及びスペクトルをチェックしたところ、PIN、GSO 共に有意な光子は検出できなかった。

第3章　XMM-Newton衛星による観測とスペクトルの時間変化

すざく衛星で見つかった *Shallow1st* パラメータを検証するために欧州の X 線観測衛星である XMM-Newton 衛星の観測データを解析した。本章ではその解析についてまとめている。

3.1　XMM-Newton 衛星

ここでは XMM-Newton 衛星についてまとめている。

XMM-Newton 衛星はは欧州宇宙期間 (ESA) が開発した X 線天文衛星で、1999 年 12 月 10 日に打ちあげられた。図 3.1 に XMM-Newton の外観図を示す。

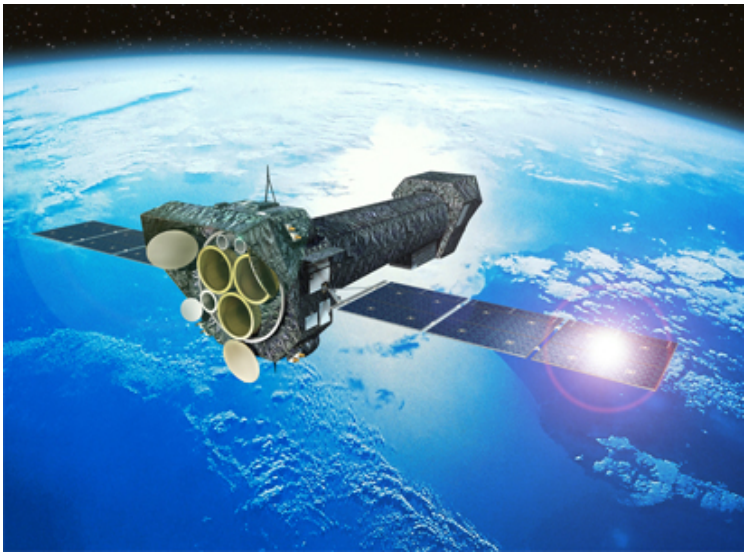

図 3.1: XMM-Newton 衛星の外観図。

この衛星は 2 種類の望遠鏡を持ち、1 つ目が XMM-Newton の主要な望遠鏡である 3 本の大きな Wolter タイプ X 線望遠鏡で、その焦平面に 2 種類の検出器が搭載されている。2 つ目が 30cm 可視光/UV 望遠鏡で CCD と分光器が搭載されている。これらの望遠鏡と検出器を使用して、X 線と可視光/UV のスペクトルを同時に取得できる。XMM-Newton の軌道は遠地点が 115000km で近地点が 6000km の高楕円軌道を持ち、南天の空を全てカバー出来る。

XMM-Newton の基本的な性能を次にまとめる。

高感度

大きい有効面積 (検出器 1 台あたり、1550cm^2@1.5keV、全部で 4650cm^2)

良い角度分解能

Point spread function(PSF) は FWHM(Full Width Half Maximum) で 6 秒のオーダーとなり、全エネルギーの 50%が収まる HEW(Half Energy Width) は約 15 秒角。

適度で高いスペクトル分解能

IC は E/Δ E が約 20-50、つまり 2-5%。RGS はより高く 200-800 つまり 0.125-0.5%

可視光/UV の同時観測

望遠鏡の視野と周辺で同時にモニターし対応天体を同定できる。

ターゲットの長時間可視性

楕円軌道によって観測に適した高度の 46000km 以上での観測を約 40 時間以上連続して行える。これはソースの変動を見たり、高い観測効率を得るのに役立つ。

3.1.1 検出器

XMM-Newton には 3 種類の検出器が搭載されている。

European Photon Imaging Camera (EPIC)

2 種類 3 つの CCD でイメージングとスペクトルを取得可能。

Reflection Grating Spectrometer (RGS)

2 つの同じ分光器が搭載されており、X 線高精度分光と分光測光用がある。

Optical Monitor (OM)

可視光/UV のイメージングとグリズム分光を行う。

合計 6 台の機器が載っており、各機器は同時にそして異なるデータ取得モードで観測が可能である。これらの基本性能を表 3.1 にまとめた。

表 3.1: XMM-Newton に搭載された各機器の基本性能。

検出器	EPIC MOS	EPIC pn	RGS	OM
エネルギー領域	0.15-12 keV	0.15-12 keV	0.35-2.5 keV	180-600 nm
軌道中の観測可能時間	5-135 ks	5-135 ks	5-135 ks	5-145 ks
感度 [erg s^{-1} cm^{-2}]	$\sim 10^{-14}$	$\sim 10^{-14}$	8×10^{-5}	20.7 mag
視野	30’	30 ’	∼5’	17’
PSF (FWHM/HEW)	5”/14”	6”/15”	N/A	1.4”-2.0”
時間分解能	1.75 ms	0.03 ms	0.6 s	0.5 s
スペクトル分解能	∼70 eV	∼80 eV	0.04/0.025°	350 ($\lambda/\delta\Lambda$)

3.1.2 EPIC カメラ

本論文では XMM-Newton の検出器のうち EPIC カメラを主に使用したので、ここに詳細をまとめる。

Newton EPIC カメラは 0.15keV から 12keV のエネルギーレンジで 30 分角の視野のとても良い感度でイメージングを行う。また、良いスペクトル分解能 ($E/\Delta E$ ∼20-50) で角度分解能は ∼6”FWHM ∼15”HEW である。3 本の X 線望遠鏡の内、2 本には EPIC MOS(Metal Oxide Semiconductor) CCD が装備されており、3 本目には異なる EPIC pn と呼ばれる CCD カメラが装備されている。pn タイプカメラはタイミングモードでは 0.03ms 以下というとても高い時間分解能を持ち、バーストモードでは (3%と時間比率は低いが)0.007ms と精細な時間分解能を有する。図

3.2 は両タイプの EPIC カメラの検出器レイアウトと望遠鏡の視野を示す。全てのカメラについて感度を持つエリアは約一辺が 30 分角。

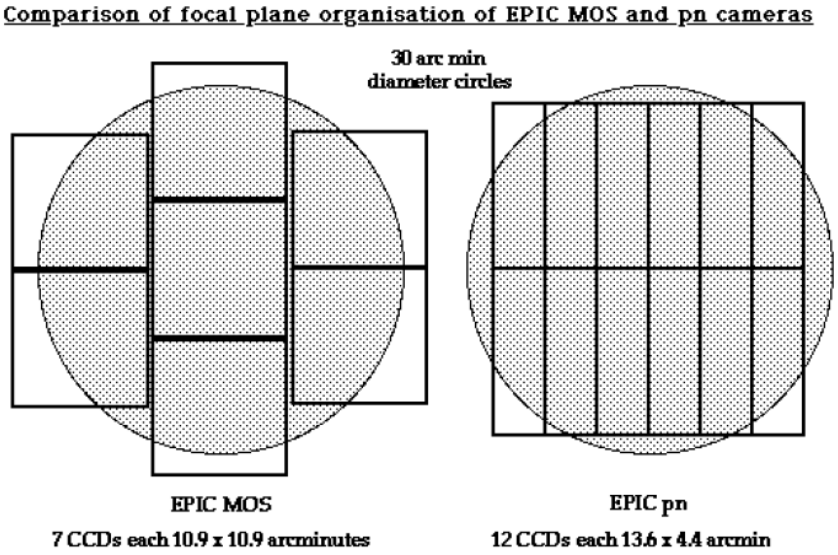

図 3.2: EPIC カメラの検出器レイアウトと望遠鏡の視野。

全ての EPIC CCD は光子カウントモードで動いており、同時イメージングと各画素固有のエネルギー分解能によった無分散スペクトルデータの取得が可能である。

EPIC の 2 タイプのカメラは基本的な構造、動作が異なる。このためチップの配置だけで無く読み出し時間などの性能が異なる。pn のそれぞれのピクセル列が自分の読み出しノードをもっているため、読み出し速度は MOS より速い。他の重要な違いは MOS チップは front-illuminate(FI) で pn チップは back-illuminated(BI) であり、これは検出器の量子効率に大きく影響する。MOS チップは 7 つの同じもので FI である。それぞれの CCD は同じ平面上には無く、それぞれがずれており、望遠鏡の焦点曲面のわずかな湾曲に続いている。

MOS カメラは X 線望遠鏡にマウントされて、かつ RGS もあるので反射光の 44%しか受けられない。pn カメラは 12 個の CCD チップが積まれた単一のウエハー (半導体インゴットから切り出した薄い板) で出来ている。

EPIC にはデータ取得にいくつかのモードが存在する。CCD 毎に全ての時間で個別の観測モードで観測できる。pn の CCD はフルフレーム、拡張したフルフレーム、および large window モードか、CCD1 枚での small window で使用するモードと、タイミングとバーストモードなどのいくつかの共通モードで観測できる。MOS と pn の大きな違いの一つは pn が高時間分解能を持つことである。高速変動のターゲットに対してタイミングモードで 30 マイクロ秒、バーストモードで 7 マイクロ秒以下の高速測光が可能である。

EPIC の角度分解能は MOS と pn のピクセルサイズがそれぞれ 40 と 150 マイクロメートルであることからミラーの PSF で決まる。X 線望遠鏡の焦点距離 (7.5m) に対してこれらは 1.1”(4.1”) に対応する。

EPIC の CCD 画素はエネルギー感度が高いので無散乱分光が可能である。そのため、これらのカメラの分解能は各画素個別のエネルギー分解能で決まる。エネルギー分解能は 2002 年の 11 月から 12 月に行われた冷却により打ち上げ時の値に戻った。これにより MOS の分解能は基本的に一定になり、pn については 2.5eV/yr というほぼ一定の割合で劣化している。

EPIC の検出限界は空の面積つまり正味の X 線バックグラウンドと、非 X 線 (すなわち粒子) バッ

クグラウンドの状態、そして観測されたソースの角度構造とスペクトル的特徴にも依存している。現在、EPICの検出限界で最も統計的な結果は、0.5-2 keVで0.19×10^{-15}erg cm^{-2} s^{-1}、2-10 keVで0.9×10^{-15}erg cm^{-2} s^{-1}、5-10 keVで1.8×10^{-15}erg cm^{-2} s^{-1} (Hasinger et al., 2001, A&A 365, L45; Brunner et al. 2008, A&A, 479, 283) である。

観測されたX線イベントの内、使えるデータだけ転送するためにイベントセレクションは機上で行なわれる。X線イベントのほとんどは複数のピクセルに分かれると期待され、EPICでもすざく衛星と同様にイベントのグレーディングが行われる。ただし、MOSとpnのイベントのプロセス方法が異なり、MOSはイベントパターン認証図を使い、全ての検出されたイベントはパターン区別は既に行なわれて地上へ転送される。pnは反対にある閾値以上のすべてのピクセルを転送し、X線イベントセレクションとプロセスはSASを使用して全て地上で行なわれる。

3.1.3 XMM-Newton衛星の特徴

ここではXMM-Newtonの一番の特徴である。有効面積について他のX線天文衛星と比較する。

ここで言う有効面積とは望遠鏡と検出器の性能によって決まるX線の検出感度の事で、EPICの高い量子効率とX線望遠鏡の大きな口径により他のX線観測衛星に比べとても大きな有効面積を持つ。EPICの量子効率はMOSは高エネルギー側で上限値があるが、pnは15keVまで高い効率で光子を検出できる。また、特に低エネルギー側はoptical blocking filterの選択によって有効面積を稼ぐことが出来る。EPIC CCDはX線だけでなくIR、可視光、UVに感度を持っているためこれらのフィルターを使用しなければならない。EPICにはアルミメッキされた可視光ブロックフィルター等がある。フィルターはその遮光性能の違いでで3種類 (thick、medium、thin) 存在する。thinフィルターを使用すれば、有効面積が大きくなるが、その分可視光の汚染が起こりやすい。thickフィルターを使用すると、全ての検出器について最もソフトなレスポンスに必要な上限まで可視光の汚染を最小化できる。

XMM-Newton衛星はすざくに比べ低エネルギー側 (2keV以下) で有効面積が大きく、低エネルギー側の放射が強い1E1207.4−5209の観測に向いている。図3.3は様々な衛星の有効面積を比較したグラフである。

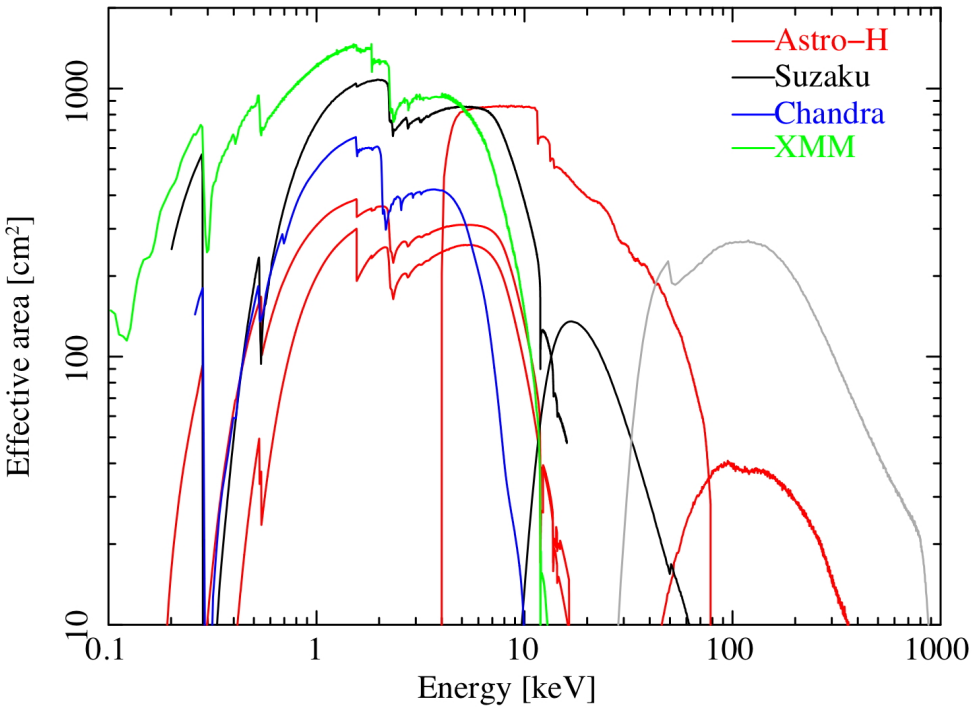

図 3.3: 様々な X 観測衛星の有効面積を比較したグラフ。横軸にエネルギー、縦軸に有効面積が取ってある。すざく衛星が黒、XMM-Newtonが緑の線 (`http://astro-h.isas.jaxa.jp/researchers/sim_back_2010Feb23/` より)。

特に、吸収構造が存在する 0.7keV 付近ではすざく衛星の 2 倍以上の有効面積を持つ。すざく衛星の観測で見つかった *Shallow1st* パラメータを検証するためにはこの衛星の観測データを解析するべきである。

3.2 観測データ

2002/08/04 に XMM-Newton が観測した 128ksec のデータ (Obs.ID:0155960301) を解析した。このデータはこれまでの XMM-Newton による 1E1207 の観測の中で最も長時間であり、先行研究 (Luca et al. 2004) で使用されたものである。

3.3 解析用データの抽出

観測データを解析するにあたり、以下の作業を行った。

- リダクション
  - データ準備
  - リプロセス
  - GTI 補正
  - region 抽出
  - スペクトル (Sorce,BackGround)、ライトカーブ抽出
  - スペクトルの面積補正
  - パイルアップのチェック
  - ARF、RMF 作成
- イメージ解析
- タイミング解析
- スペクトル解析

以降ではイメージ解析、タイミング解析、スペクトル解析と、それぞれの解析の結果をまとめる。

3.4　イメージ解析

まず、リダクションを行ったデータを 3 つのエネルギーバンドに分けてからそれらのイメージを合成し、擬似カラーイメージを作成した。先行研究 (Luca et al. 2004、同じデータを使用) では、エネルギーを赤: 0.3 − 0.6 keV、緑:0.6 − 1.5 keV、青:1.5 − 8 keV と分けているので同じ様にエネルギーを分割した。図 3.4、3.5 が MOS と pn それぞれの擬似カラーイメージを示す。MOS イメージ中央の天体と pn イメージ中の明るい天体が 1E1207.4−5209 である。

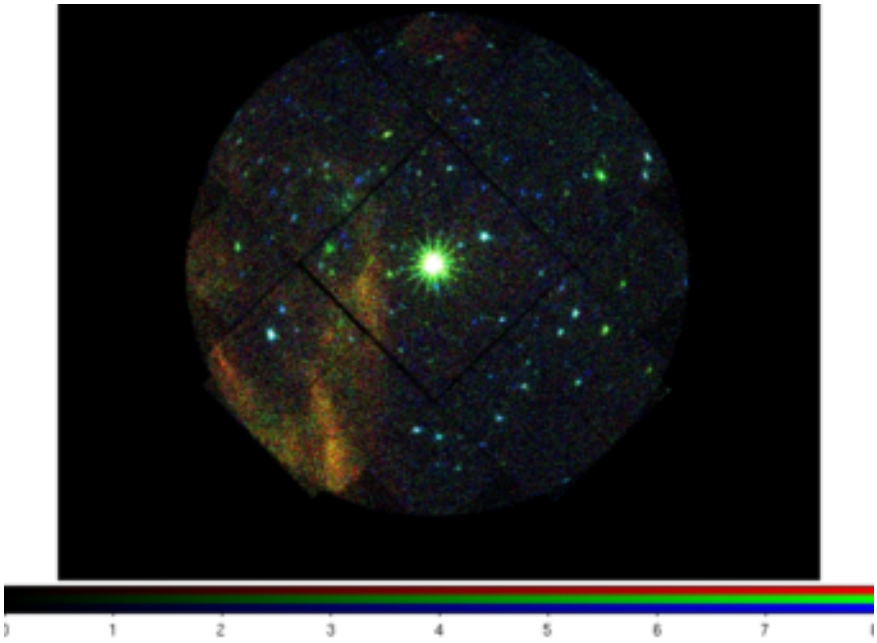

図 3.4: MOS の擬似カラーイメージ、MOS1 と MOS2 のイベントを足し合わせて作成している。向かって左が東、上が北。

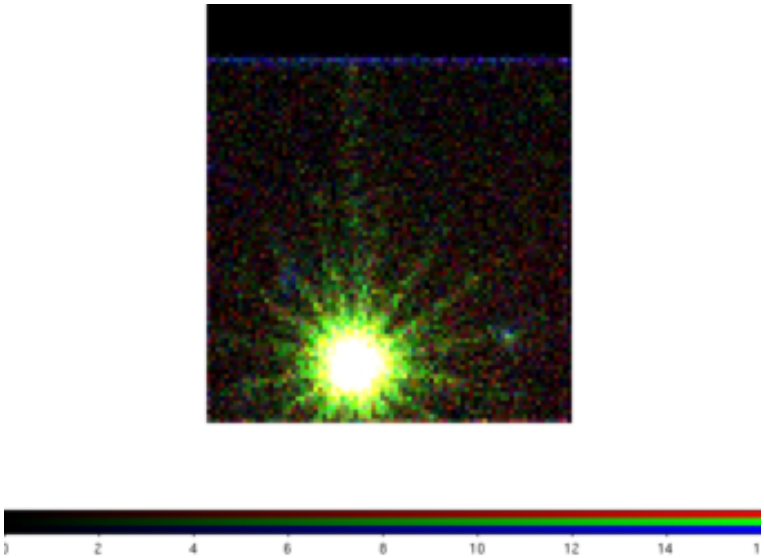

図 3.5: pn の擬似カラーイメージ。向かって右が DETX、上が DETY 方向。

3.5　タイミング解析

3.5.1　解析領域の決定

ライトカーブやスペクトルを作成するためのソース領域とバックグラウンド領域は以下の図 3.6、3.7、3.8 の様に決めた。すざくの場合と同様に天体領域を円で囲み、そのまわりにドーナツ上にバックグラウンド領域を取っている。ただし、他の天体や超新星残骸の寄与が考えられる部分は使用しないようにしている。赤の斜線が入っている部分がそれに当たる。

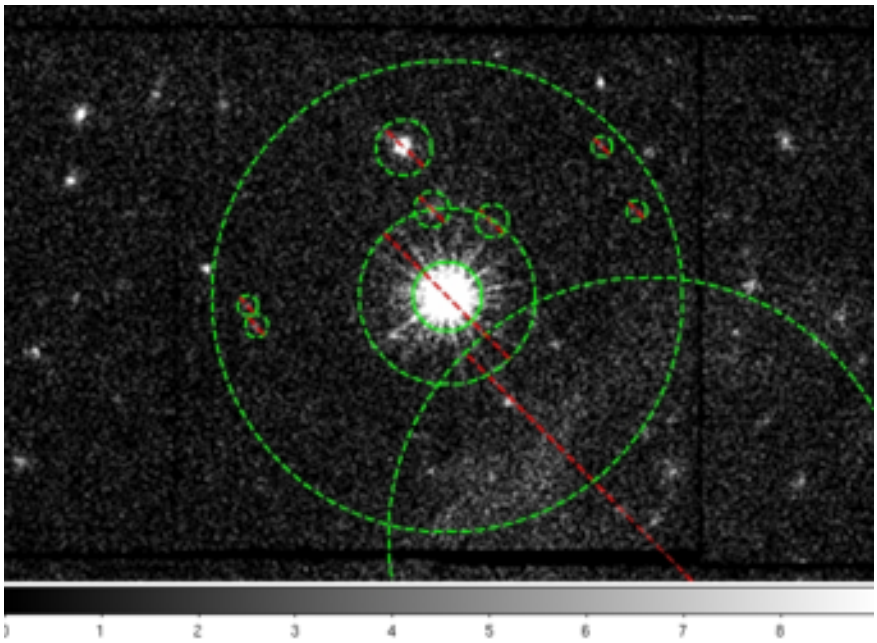

図 3.6: MOS1 の解析領域の取り方。

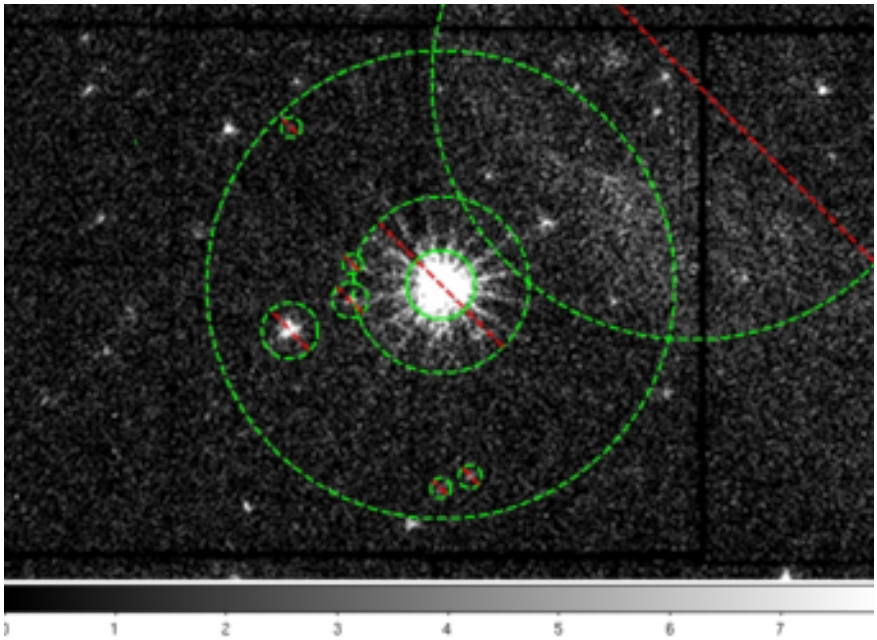

図 3.7: MOS2 の解析領域の取り方。

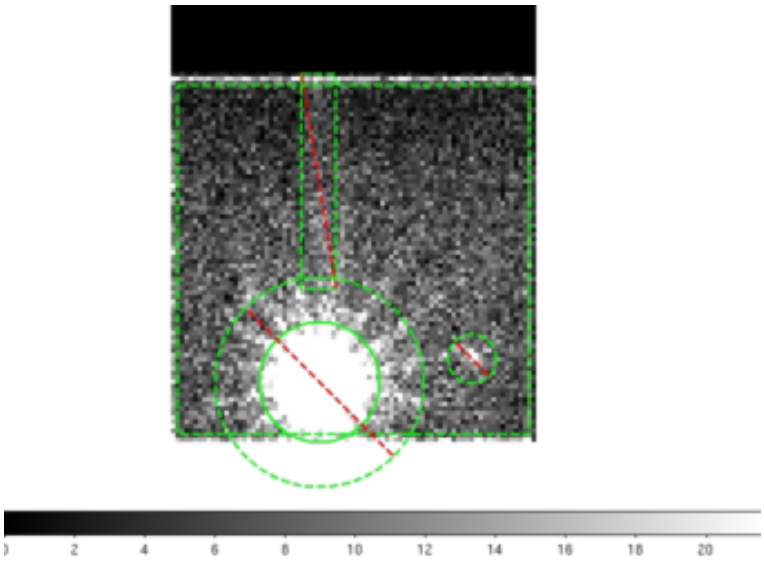

図 3.8: pn の解析領域の取り方。

3.5.2 ライトカーブ

まず、ライトカーブを作成し、すざく衛星の場合と同様にライトカーブに長期的な変動が無いか確認した。なお、使用したエネルギーは先行研究と合わせるために

- 0.2-5keV
- 5-12keV [MOS1,MOS2]
- 5-15keV [pn]

また Hardness Ratio 用に

- 0.2-2keV
- 2-12keV [MOS1,MOS2]
- 2-15keV [pn]

と分けてイベントファイルを用意した。このイベントファイルを使用し、各 EPIC カメラの 1024 秒ビンでのライトカーブと Hardness ratio を作成した。それらを図 3.9、3.10、3.11 に示す。なおこのライトカーブはバックグラウンド成分を引いている。各ライトカーブの RMS(二乗平均平方根) と統計誤差を表 3.2 にまとめた。これを見ると、全ての場合に置いて、RMS が統計誤差を下回る。これによりこの時間ビン (1024 秒) において全エネルギー領域のライトカーブと Hardness ratio が変動していないことを確認した。

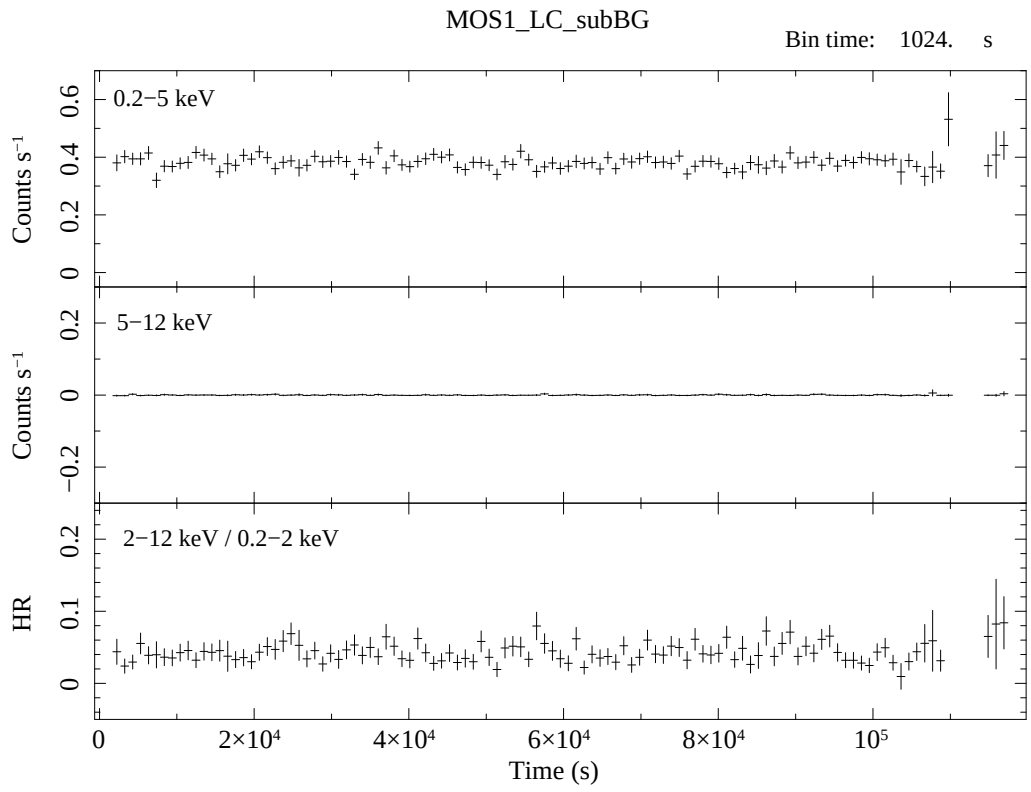

図 3.9: MOS1 のライトカーブ。

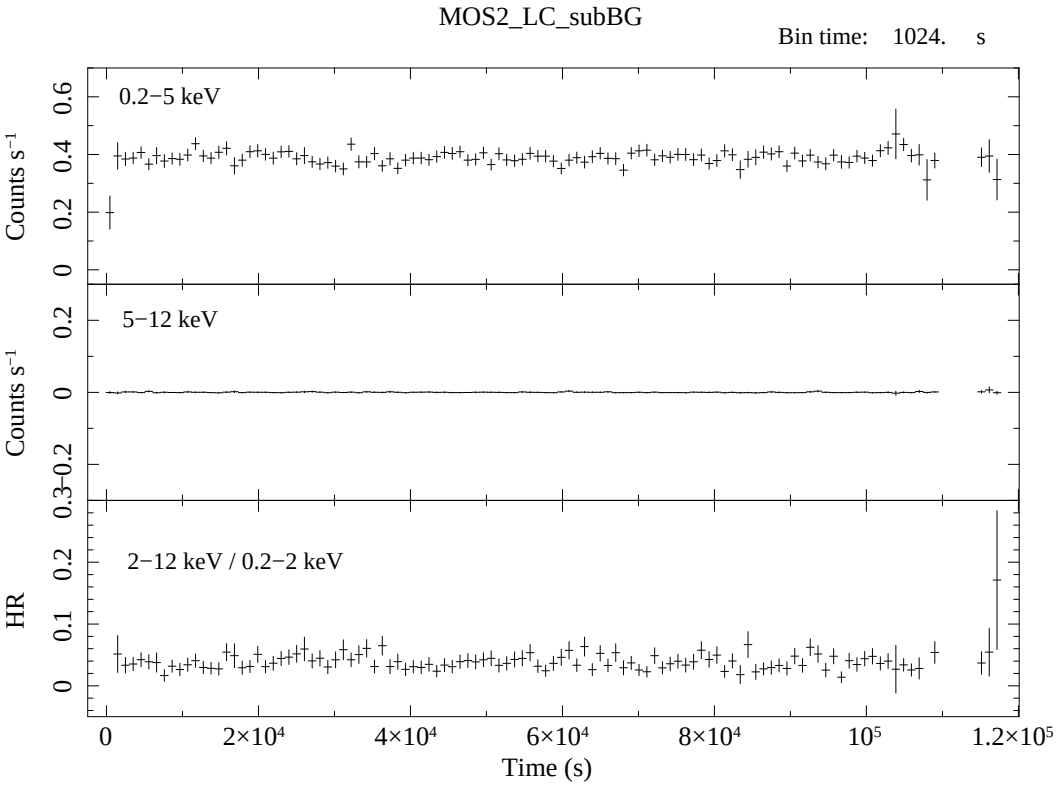

図 3.10: MOS2 のライトカーブ。

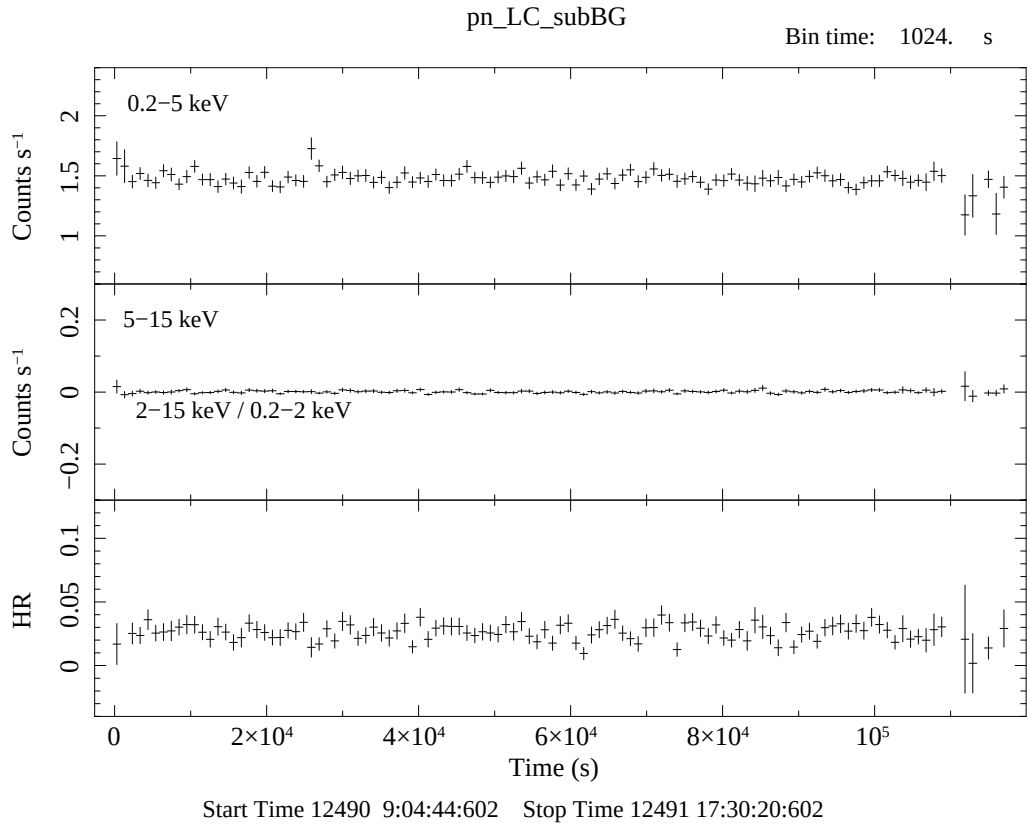

図 3.11: pn のライトカーブ。

表 3.2: lcstats の結果

Obs.	MOS1		MOS2		pn	
Detector	0.2-5keV LC	HR	0.2-5keV LC	HR	0.2-5keV LC	HR
No. of Newbins	109	108	110	108	112	110
Average (c/s)	0.383±0.002	0.043±0.002	0.387±0.003	0.040±0.002	1.474±0.006	0.026±0.001
Standard Deviation (c/s)	0.025	0.014	0.029	0.017	0.066	0.007
Minimum (c/s)	0.320	0.010	0.199	0.014	1.174	0.002
Maximum (c/s)	0.531	0.084	0.471	0.171	1.726	0.040
Variance (1E-03(c/s)**2)	0.630±0.086	0.190±0.026	0.818±0.110	0.286±0.039	4.380±0.590	0.045±0.006
Expected Variance (1E-03(c/s)**2)	0.645±0.088	0.242±0.033	0.675±0.091	0.298±0.041	3.675±0.490	0.069±0.009
Chi-Square/d.o.f.	63.1/108	84.9/107	60.7/109	103.96/107	63.28/111	70.63/109
Chi-Square Prob of constancy	0.99983	0.94300	0.99995	0.56520	0.99992	0.99836
RMS fractional variation	< 0.046	< 0.294	< 0.033	< 0.305	< 0.021	< 0.288
RMS	< 0.018	< 0.013	< 0.013	< 0.012	< 0.031	< 0.007
Statistical error (3σ)	0.075	0.042	0.087	0.051	0.198	0.021

3.5.3 パワースペクトル

各データについて barycentric 補正を行ってからパワースペクトルを作成した。なお使用したエネルギーは Luca et al. 2004 と同じで、0.2keV から 3.5keV である。MOS データについてはピークを検出できなかったが、pn データについてピークが見つかった。図 3.12 に pn の結果を示す。

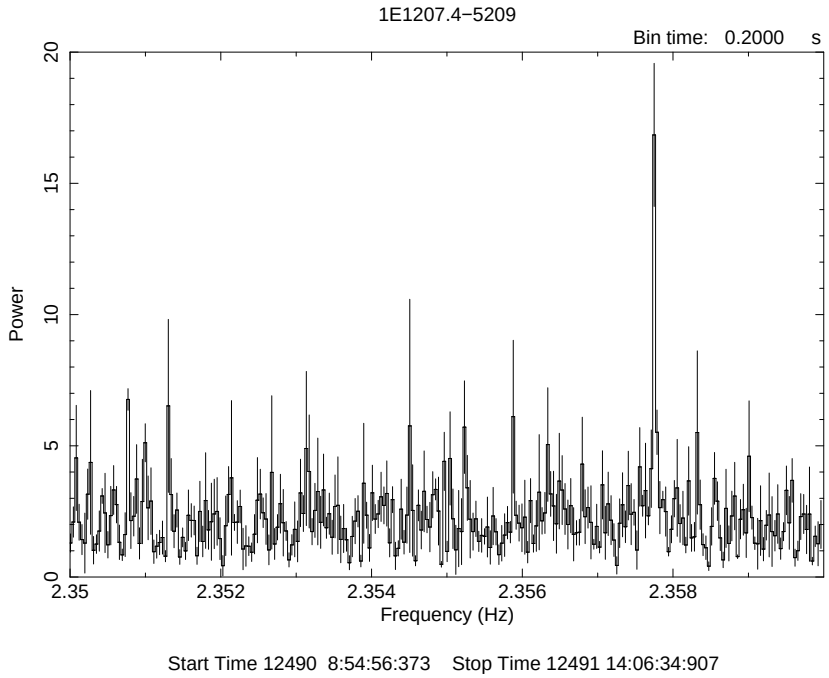

図 3.12: pn データのパワースペクトル。2.3577Hz=0.42414 秒付近にピークを確認

3.5.4 efsearch(畳み込みライトカーブの χ^2 検定)

powspec と同様、pn データで大きなピークが見つかった。図 3.13 に pn の結果を示す。

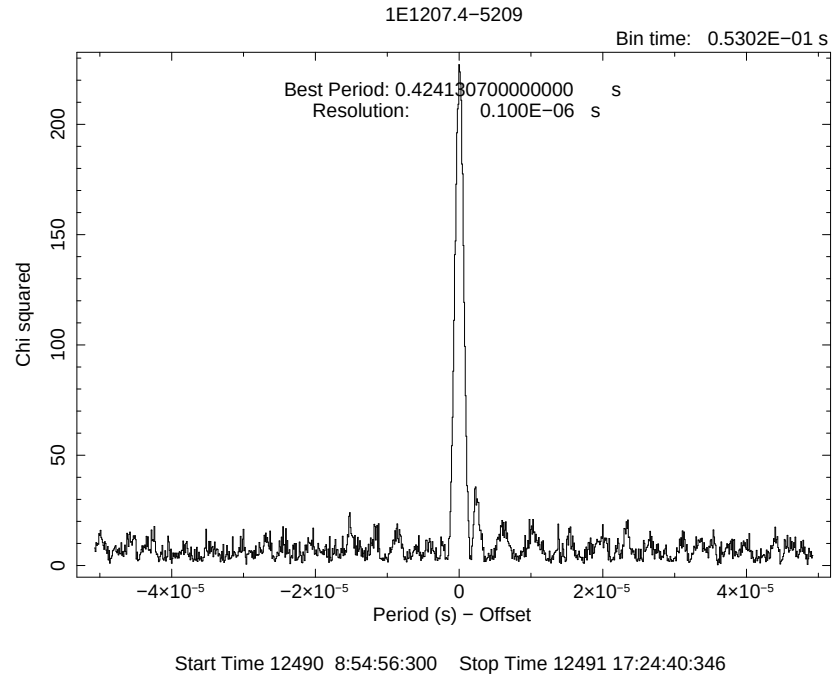

図 3.13: pn データのパワースペクトル。0.4241307 秒付近に大きなピークを確認

3.5.5 efold(畳み込みライト カーブ)

efsearch で見つかったピーク (0.4241307 秒) で folded ライト カーブ (図 3.14) を作成した。

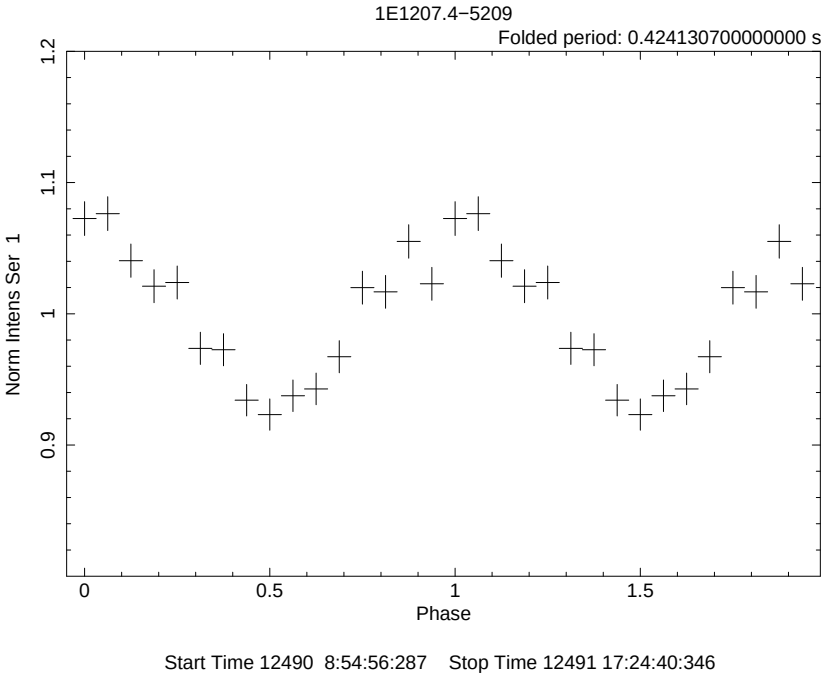

図 3.14: pn データの efsearch の結果。20%程度の変動を確認。

3.5.6 Ztest

Ztest の結果をここでは述べる。観測されている周期は 0.424130 秒、すなわち 2.357768 Hz なので 2.35 から 2.36 Hz を 2×10^{-6} Hz の分解能で Ztest を行ったところ図 3.15 の結果を得た。

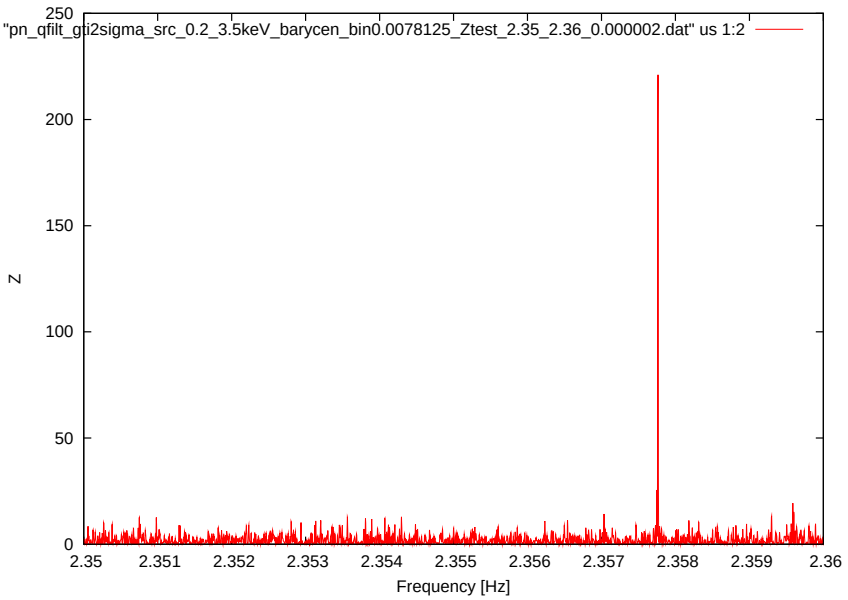

図 3.15: pn データについて 2.35 から 2.36 Hz を 2×10^{-6} Hz の分解能で Ztest した結果。

大きなピークが 2.3577 Hz 付近で検出された。より狭い範囲をチェックするために 2.357 から 2.358 Hz を 2×10^{-6} Hz の分解能で Ztest を行うと図 3.16 の様になった。

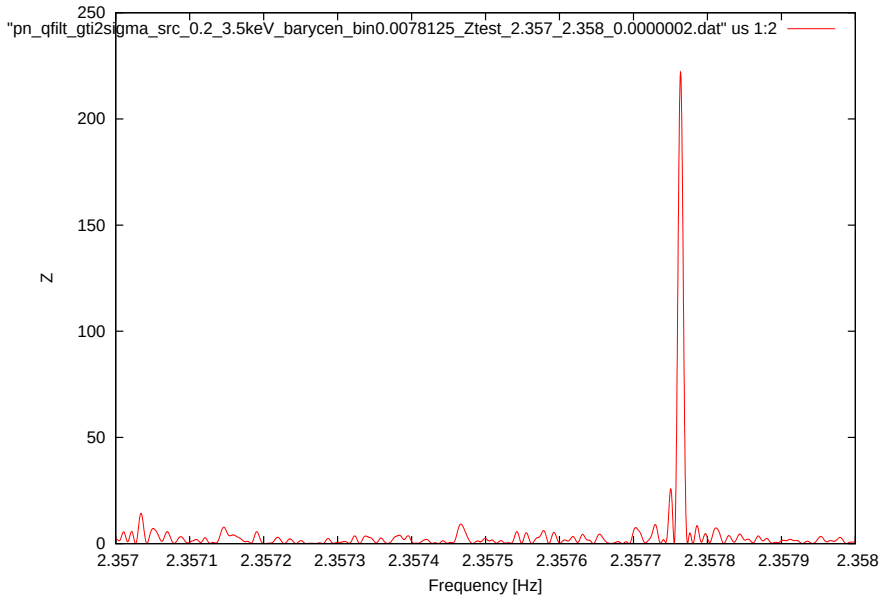

図 3.16: pn データについて 2.357 から 2.358 Hz を 2×10^{-6} Hz の分解能で Ztest した結果。

最高ピークの周波数は 2.3577636 Hz、すなわち 0.424130731 秒で Z=222.1。またこのピークをガウス関数でフィットしたところ中心は 2.3577638 Hz(0.424130695 秒)、1σ は 3.384×10^{-06} Hz、最大値は 223.1 となった。これは先行研究 (Luca et al. 2004) の結果と一致している。

3.6　時間平均スペクトル解析

EPIC カメラの時間平均スペクトルの解析を行った。使用したエネルギー領域は先行研究 (Luca et al. 2004) と同じ 0.3-4.0keV と、それより広く取った 0.3-10.0keV の 2 種類。使用したモデルはすざく衛星のスペクトルをもっとも良く説明できた星間吸収と 2 成分黒体放射、3 本の吸収構造 (wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs*gabs) である。ただし、pn に関しては吸収構造を 4 本 (2.8keV を追加) にした場合も試した。以下に、各カメラのフィッティング結果を示す。

3.6.1　MOS1

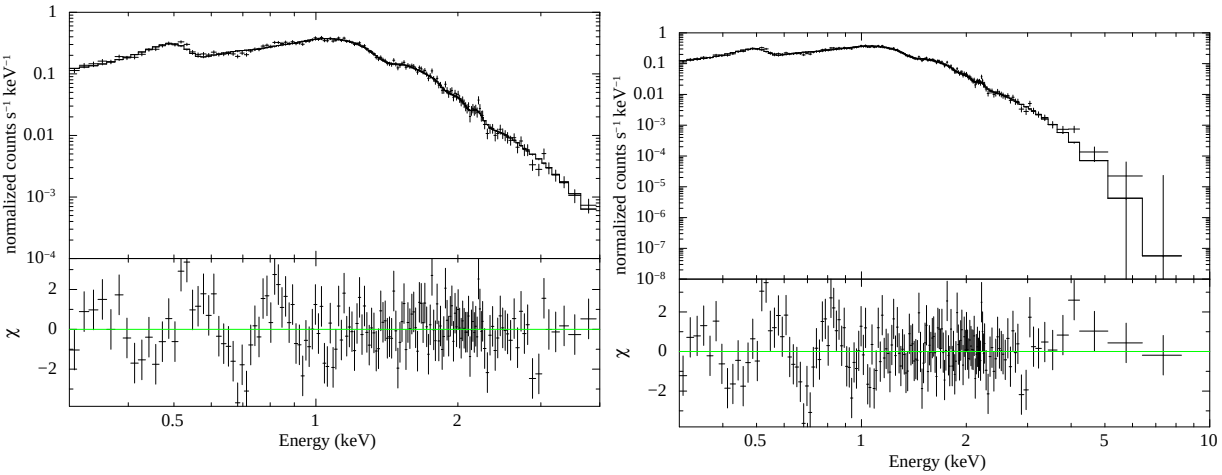

図 3.17: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

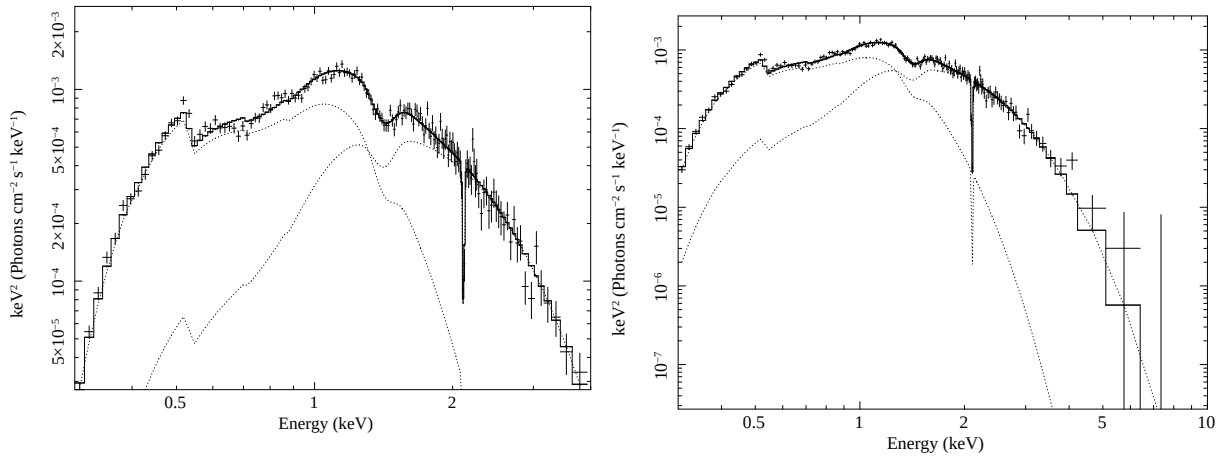

図 3.18: $\nu F\nu$ スペクトル。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

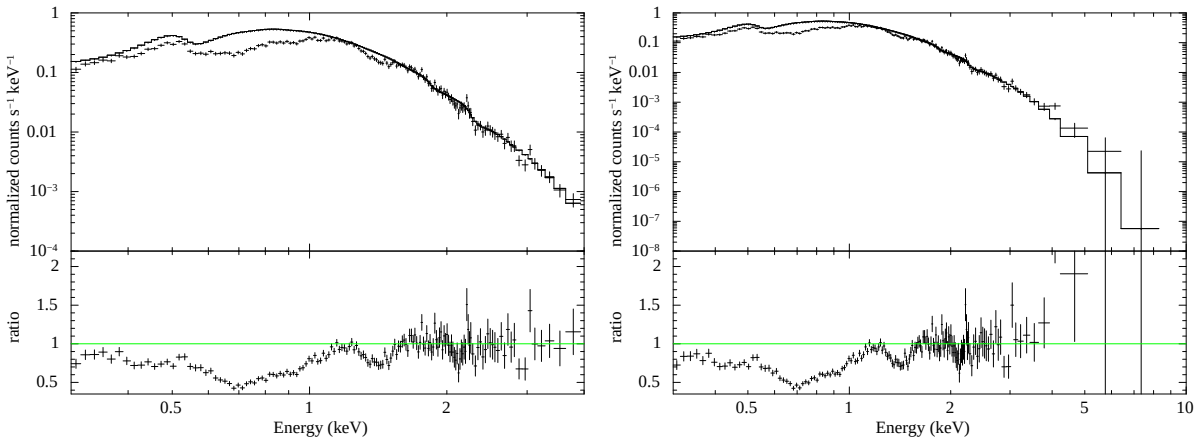

図 3.19: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

表 3.3: MOS1 スペクトルのフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	0.3-4.0keV	0.3-10.0keV
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.126\ ^{+0.003}_{-0.004}$	$0.121\ ^{+0.003}_{-0.003}$
bbodyrad	kT	keV	$0.162\ ^{+0.001}_{-0.002}$	$0.162\ ^{+0.001}_{-0.002}$
bbodyrad	norm	—	$676.5\ ^{+10.6}_{-11.1}$	$656.3\ ^{+10.7}_{-11.7}$
		km♯	$5.20\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$5.12\ ^{+0.04}_{-0.05}$
bbodyrad	kT	keV	$0.338\ ^{+0.002}_{-0.002}$	$0.331\ ^{+0.002}_{-0.002}$
bbodyrad	norm	—	$9.9\ ^{+0.3}_{-0.2}$	$11.4\ ^{+2.00}_{-0.8}$
		km♯	$0.629\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.68\ ^{+0.06}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$0.754\ ^{+0.007}_{-0.006}$	$0.750\ ^{+0.008}_{-0.006}$
gabs	Sigma	keV	$0.177\ ^{+0.007}_{-0.005}$	$0.180\ ^{+0.007}_{-0.005}$
gabs	Tau	—	$0.32\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.32\ ^{+0.04}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.41\ ^{+0.01}_{-0.48}$	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$2.11\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$2.10\ ^{+0.03}_{-0.08}$
gabs	Sigma	keV	$0.009\ ^{+0.020}_{-0.005}$	$0.007\ ^{+0.042}_{-0.005}$
gabs	Tau	—	$0.05\ ^{+0.12}_{-0.03}$	$0.08\ ^{+0.40}_{-0.06}$
$\chi^2/d.o.f$			212.63/141(1.51)	216.71/145(1.49)
Null hypothesis probability			9.17E-05	1.06E-04
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.23E-12 $^{+2.16E-14}_{-5.13E-13}$	2.23E-12 $^{+5.00E-16}_{-3.86E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.22E-12 $^{+1.81E-14}_{-6.79E-13}$	2.23E-12 $^{+1.10E-15}_{-2.35E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

3.6.2 MOS2

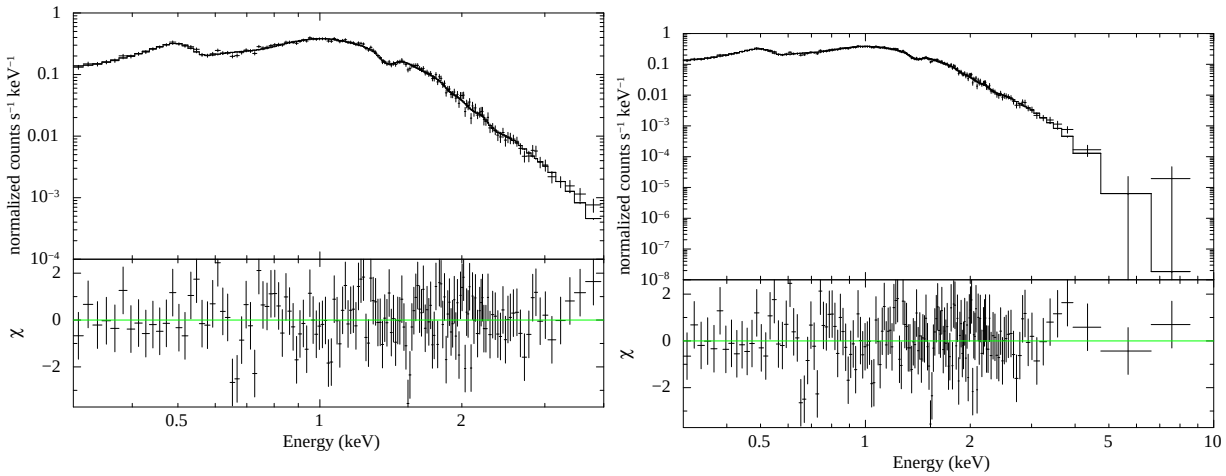

図 3.20: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

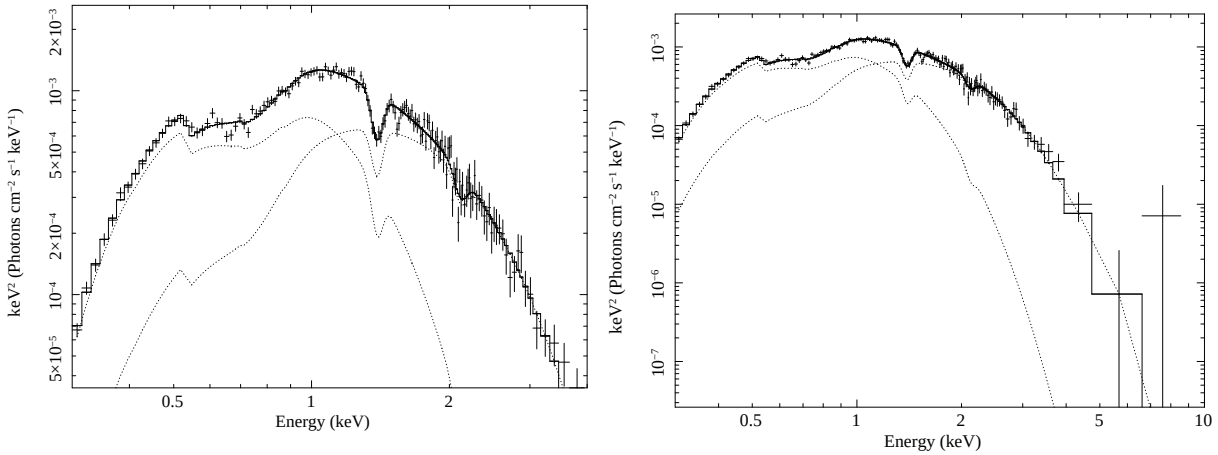

図 3.21: $\nu F\nu$ スペクトル。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

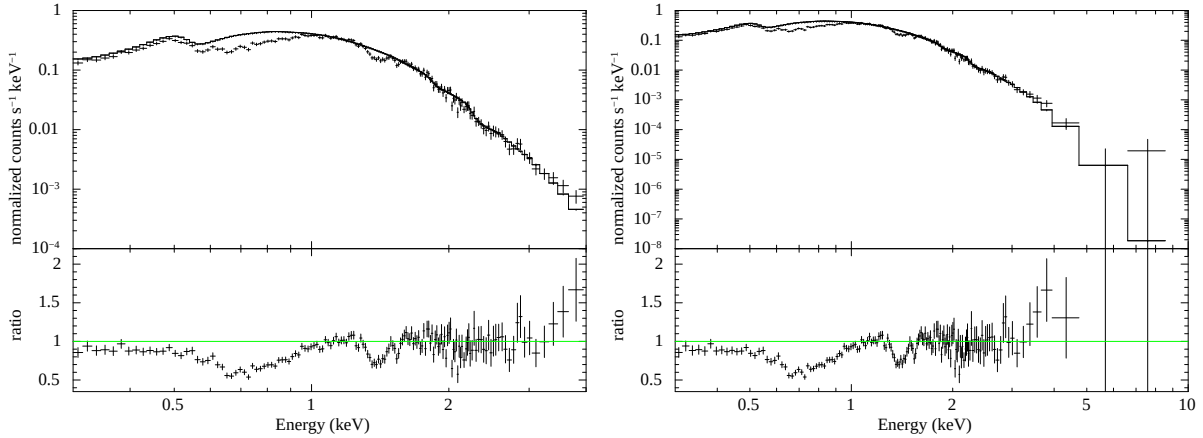

図 3.22: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

表 3.4: MOS2 スペクトルのフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	0.3-4.0keV	0.3-10.0keV
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.077\ ^{+0.003}_{-0.003}$	$0.077\ ^{+0.003}_{-0.003}$
bbodyrad	kT	keV	$0.171\ ^{+0.002}_{-0.007}$	$0.171\ ^{+0.007}_{-0.007}$
bbodyrad	norm	—	$313.6\ ^{+73.8}_{-7.5}$	$312.9\ ^{+6.3}_{-6.5}$
		km♯	$3.54\ ^{+0.40}_{-0.04}$	$3.54\ ^{+0.04}_{-0.04}$
bbodyrad	kT	keV	$0.320\ ^{+0.007}_{-0.001}$	$0.320\ ^{+0.007}_{-0.002}$
bbodyrad	norm	—	$13.7\ ^{+2.6}_{-0.3}$	$13.7\ ^{+0.3}_{-0.3}$
		km♯	$0.740\ ^{+0.067}_{-0.008}$	$0.741\ ^{+0.009}_{-0.009}$
gabs	LineE	keV	$0.731\ ^{+0.009}_{-0.008}$	$0.731\ ^{+0.009}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.126\ ^{+0.009}_{-0.006}$	$0.126\ ^{+0.009}_{-0.006}$
gabs	Tau	—	$0.171\ ^{+0.011}_{-0.009}$	$0.171\ ^{+0.011}_{-0.010}$
gabs	LineE	keV	$1.391\ ^{+0.014}_{-0.006}$	$1.394\ ^{+0.010}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.04\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.04\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.051\ ^{+0.008}_{-0.007}$	$0.051\ ^{+0.008}_{-0.006}$
gabs	LineE	keV	$2.12\ ^{+0.04}_{-0.05}$	$2.12\ ^{+0.04}_{-0.05}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.06}_{-0.06}$	$0.07\ ^{+0.06}_{-0.06}$
gabs	Tau	—	$0.05\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.05\ ^{+0.02}_{-0.02}$
$\chi^2/d.o.f$			161.96/139(1.17)	162.43/142(1.14)
Null hypothesis probability			8.90E-02	1.16E-01
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.35E-12 $^{+3.80E-14}_{-2.81E-13}$	2.35E-12 $^{+2.39E-14}_{-3.07E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.33E-12 $^{+2.62E-14}_{-2.79E-13}$	2.33E-12 $^{+2.71E-14}_{-2.59E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

3.6.3 pn

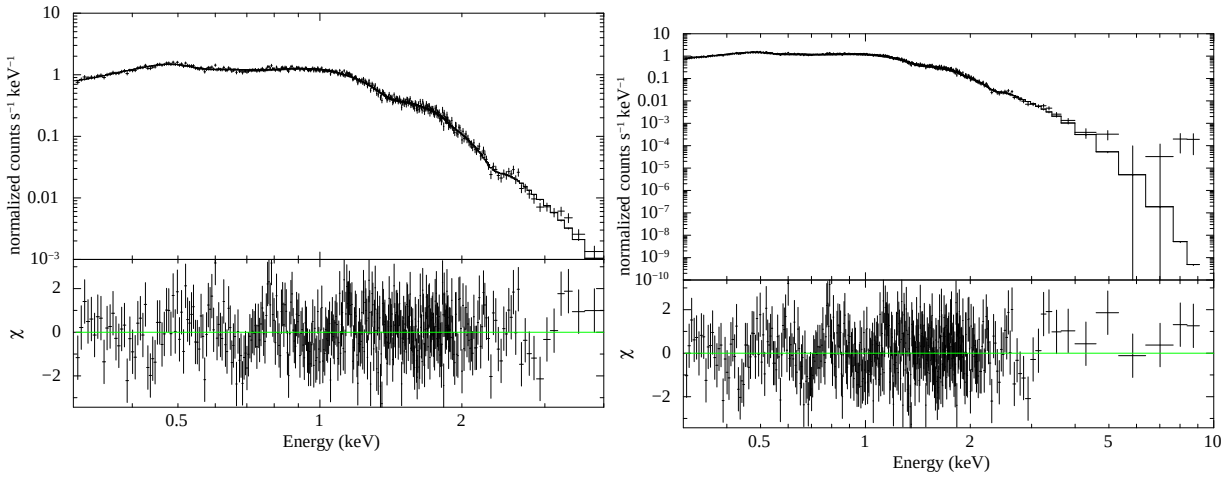

図 3.23: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

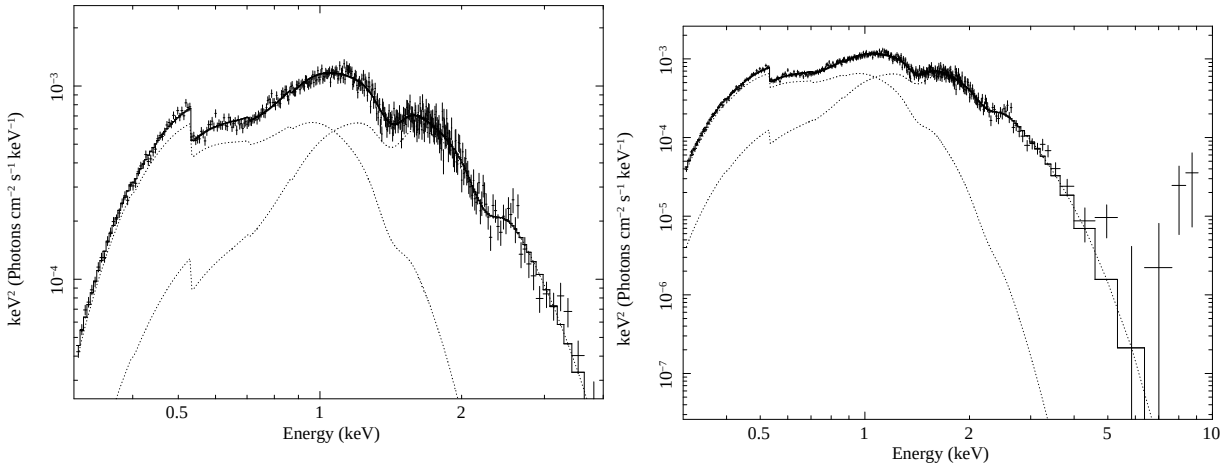

図 3.24: $\nu F\nu$ スペクトル。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

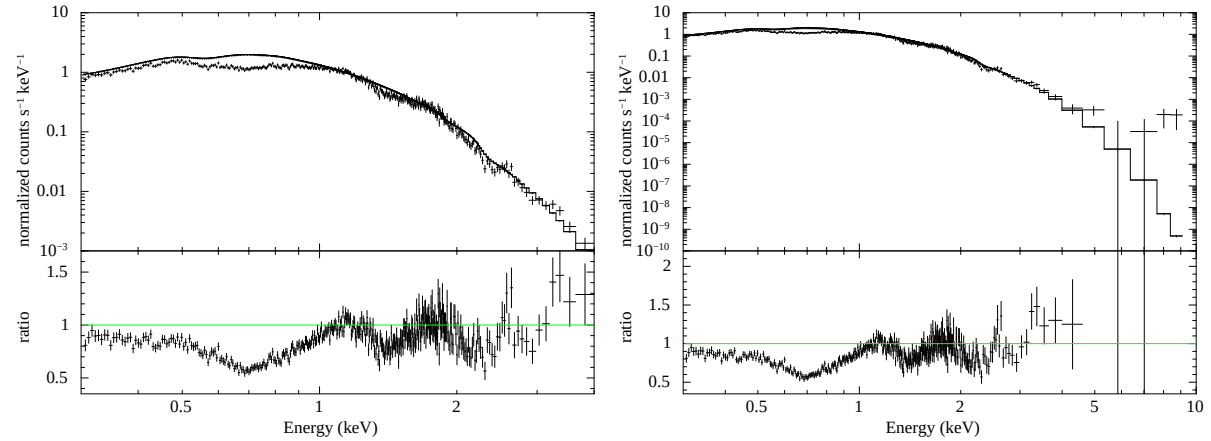

図 3.25: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

表 3.5: pn スペクトルのフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	0.3-4.0keV	0.3-10.0keV
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.100\ ^{+0.002}_{-0.002}$	$0.105\ ^{+0.002}_{-0.002}$
bbodyrad	kT	keV	$0.156\ ^{+0.001}_{-0.001}$	$0.154\ ^{+0.001}_{-0.001}$
bbodyrad	norm	—	$517.2\ ^{+401.1}_{-5.9}$	$567.7\ ^{+6.1}_{-11.8}$
		km♯	$4.55\ ^{+1.51}_{-0.03}$	$4.77\ ^{+0.03}_{-0.05}$
bbodyrad	kT	keV	$0.314\ ^{+0.001}_{-0.002}$	$0.314\ ^{+0.001}_{-0.005}$
bbodyrad	norm	—	$15.76\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$16.0\ ^{+0.2}_{-0.6}$
		km♯	$0.794\ ^{+0.006}_{-0.006}$	$0.799\ ^{+0.006}_{-0.015}$
gabs	LineE	keV	$0.724\ ^{+0.004}_{-0.005}$	$0.723\ ^{+0.004}_{-0.004}$
gabs	Sigma	keV	$0.137\ ^{+0.005}_{-0.003}$	$0.138\ ^{+0.005}_{-0.003}$
gabs	Tau	—	$0.188\ ^{+0.008}_{-0.010}$	$0.193\ ^{+0.009}_{-0.009}$
gabs	LineE	keV	$1.41\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$1.41\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.077\ ^{+0.007}_{-0.011}$	$0.066\ ^{+0.009}_{-0.006}$
gabs	LineE	keV	$2.24\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.24\ ^{+0.04}_{-0.04}$
gabs	Sigma	keV	$0.15\ ^{+0..05}_{-0.03}$	$0.160\ ^{+0.025}_{-0.001}$
gabs	Tau	—	$0.14\ ^{+0.04}_{-0.02}$	$0.132\ ^{+0.046}_{-0.001}$
$\chi^2/d.o.f$			438.31/364(1.20)	445.76/370(1.20)
Null hypothesis probability			4.52E-03	4.16E-03
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.16E-12 $^{+7.40E-15}_{-2.16E-12}$	2.16E-12 $^{+3.54E-14}_{-3.82E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.15E-12 $^{+3.50E-15}_{-2.15E-12}$	2.15E-12 $^{+2.19E-14}_{-6.26E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

3.6.4 pn(吸収線 4 本)

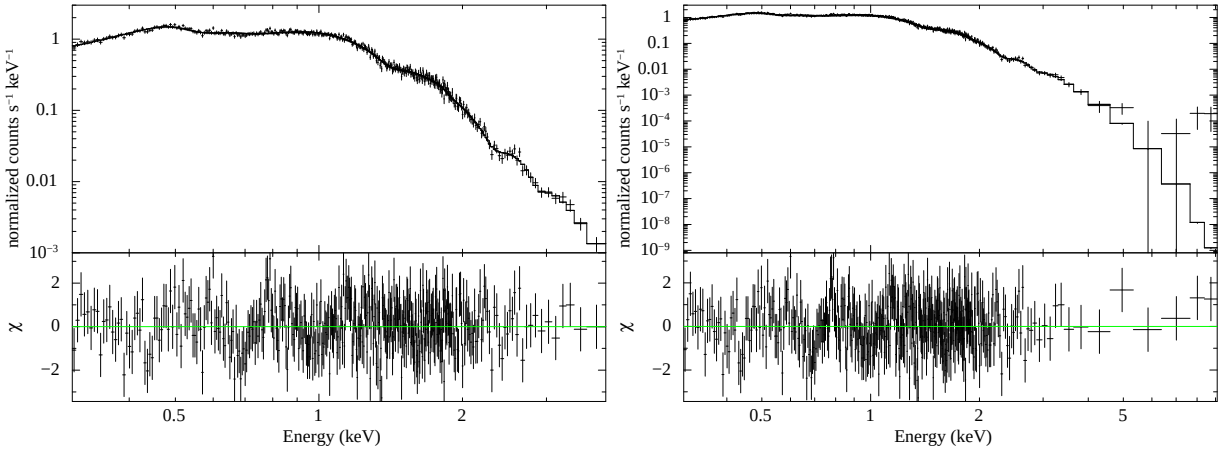

図 3.26: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

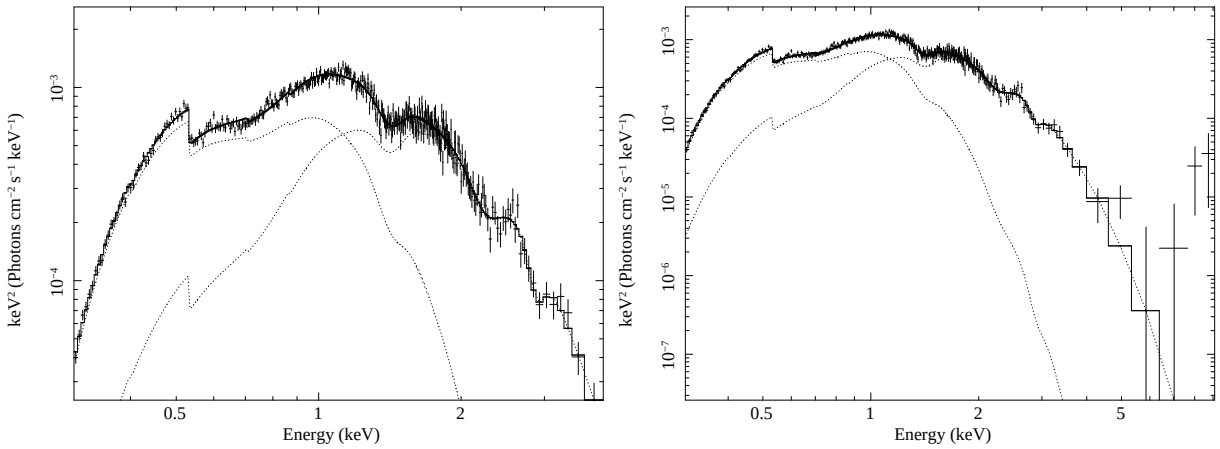

図 3.27: $\nu F\nu$ スペクトル。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

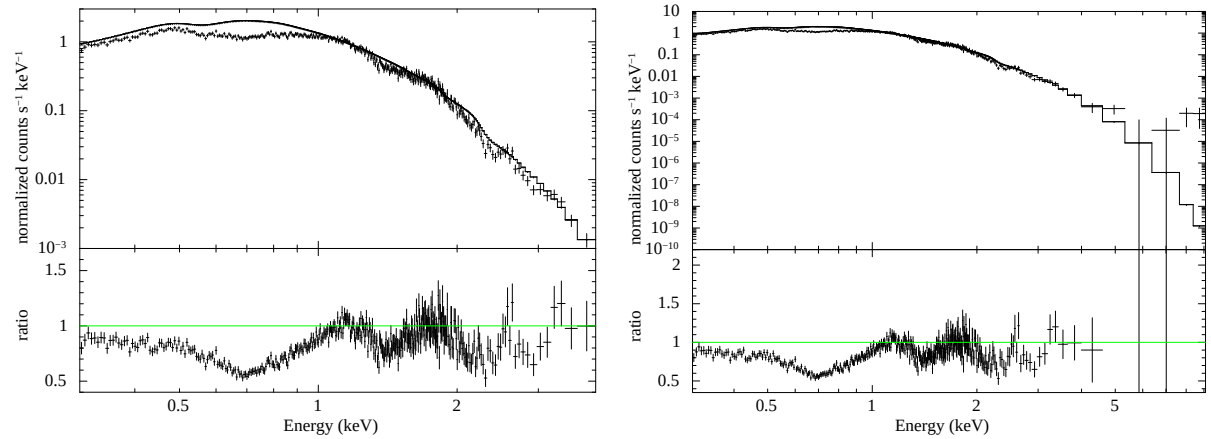

図 3.28: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:0.3-4.0keV。右:0.3-10.0keV。

表 3.6: pn スペクトル (吸収構造 4 本) のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	0.3-4.0keV	0.3-10.0keV
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.104\ ^{+0.007}_{-0.013}$	$0.104\ ^{+0.002}_{-0.001}$
bbodyrad	kT	keV	$0.156\ ^{+0.007}_{-0.002}$	$0.157\ ^{+0.001}_{-0.001}$
bbodyrad	norm	—	$563\ ^{+47}_{-142.}$	$554\ ^{+381}_{-6}$
		km♯	$4.7\ ^{+0.2}_{-0.6}$	$4.71\ ^{+1.41}_{-0.02}$
bbodyrad	kT	keV	$0.327\ ^{+0.003}_{-0.006}$	$0.328\ ^{+0.001}_{-0.001}$
bbodyrad	norm	—	$12.6\ ^{+0.4}_{-0.6}$	$12.3\ ^{+0.2}_{-0.5}$
		km♯	$0.711\ ^{+0.011}_{-0.016}$	$0.702\ ^{+0.005}_{-0.016}$
gabs	LineE	keV	$0.722\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$0.723\ ^{+0.004}_{-0.004}$
gabs	Sigma	keV	$0.142\ ^{+0.014}_{-0.009}$	$0.140\ ^{+0.005}_{-0.003}$
gabs	Tau	—	$0.20\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.20\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.41\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.084\ ^{+0.012}_{-0.004}$	$0.084\ ^{+0.013}_{-0.015}$
gabs	Tau	—	$0.067\ ^{+0.008}_{-0.009}$	$0.065\ ^{+0.006}_{-0.008}$
gabs	LineE	keV	$2.25\ ^{+0.03}_{-0.03}$	$2.25\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.04}_{-0.02}$	$0.17\ ^{+0.02}_{-4.0E-04}$
gabs	Tau	—	$0.18\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.17\ ^{+0.01}_{-1.8E-04}$
gabs	LineE	keV	$2.89\ ^{+0.07}_{-0.06}$	$2.89\ ^{+0.07}_{-0.07}$
gabs	Sigma	keV	$0.11\ ^{+0.08}_{-0.05}$	$0.11\ ^{+0.06}_{-0.06}$
gabs	Tau	—	$0.14\ ^{+0.06}_{-0.06}$	$0.12\ ^{+0.08}_{-0.04}$
$\chi^2/d.o.f$			423.57/361(1.17)	430.77/367(1.17)
Null hypothesis probability			1.29E-02	1.21E-02
Flux@0.4-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.09E-12 $^{+1.61E-12}_{-3.26E-13}$	2.09E-12 $^{+3.54E-14}_{-1.24E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.15E-12 $^{+1.67E-12}_{-3.91E-13}$	2.15E-12 $^{+2.16E-14}_{-1.32E-12}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

0.3-4.0keV のフィッティングパラメータは Luca et al. 2004 のものとほぼ一致した。ただし吸収線のモデルは異なる。

3.6.5 *Shallow1st*パラメータに固定

次にモデルパラメータの一部を 2007 年のすざく衛星のスペクトル解析によって得られた *Shallow1st* パラメータのものに固定した。具体的には wabs の nH、BB の温度、normalization の比率 (BB1 norm/BB2 norm)、吸収線の中心エネルギーを固定しているである。

2007 年すざくのベストフィットデータは以下の通り。

```
wabs:      0.104
BB1 kT:    0.090
BB1 norm: 2110
BB2 kT:    0.301
BB2 norm: 38

BB1 norm/BB2 norm = 55.58

gabs1 lineE: 0.703
gabs1 sigma: 0.033

gabs2 lineE: 1.420
gabs2 sigma: 0.099

gabs3 lineE: 2.149
gabs3 sigma: 0.408
```

フィッティングの結果、MOS、pn 共に acceptable fit は得られなかった。以下に MOS1 と pn についての結果を載せる。MOS2 は MOS1 と同様の結果になったので省略する。

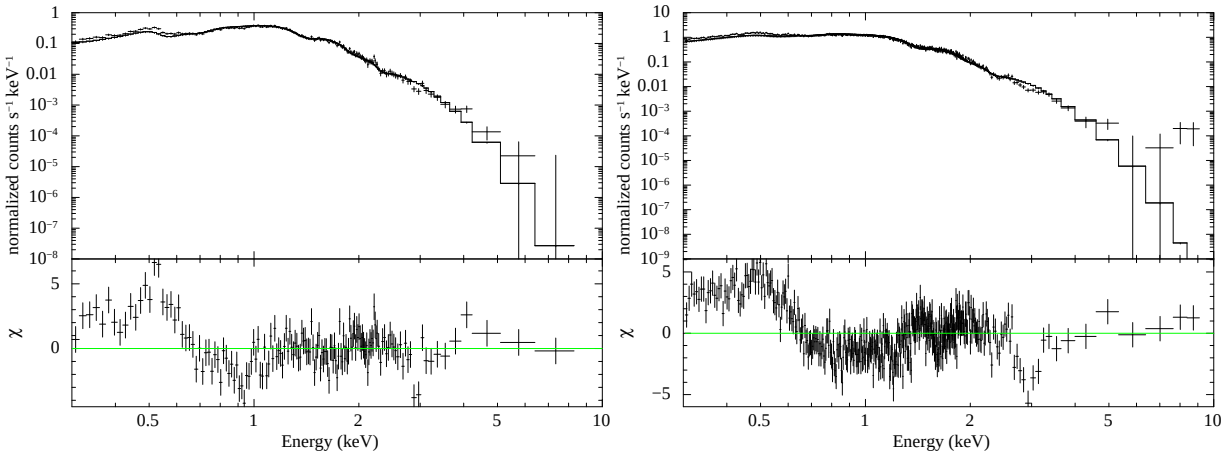

図 3.29: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:MOS1 右:pn

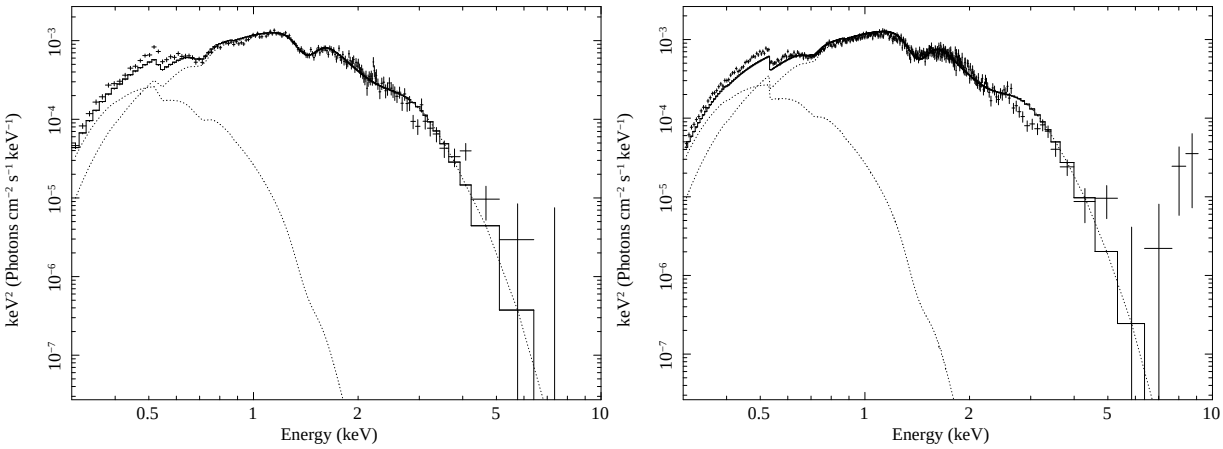

図 3.30: $\nu F\nu$ スペクトル。左:MOS1 右:pn

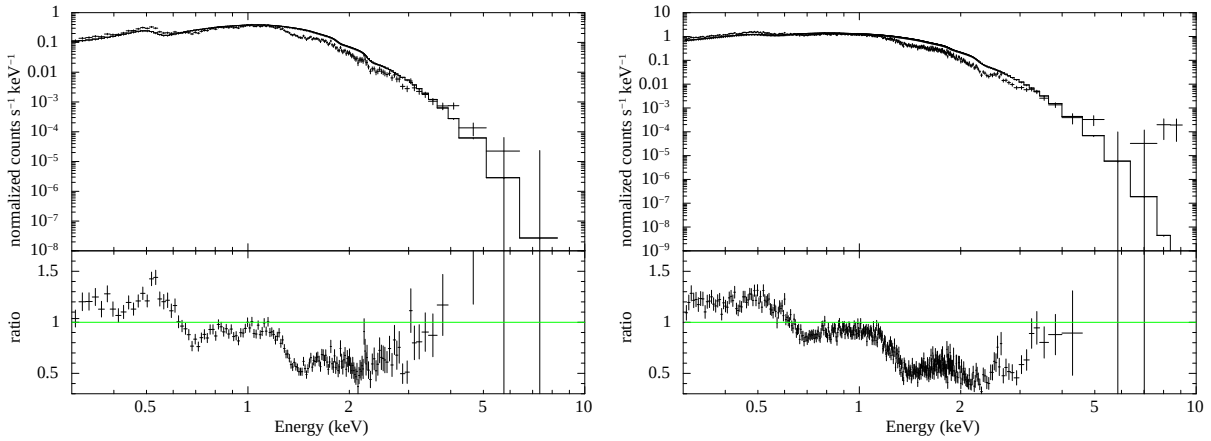

図 3.31: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:MOS1 右:pn

表 3.7: 2007 年のすざくスペクトルで得られた *Shallow1st* パラメータに固定した際のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	MOS1	pn
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	0.104 $^{-----}_{-----}$	0.104 $^{-----}_{-----}$
bbodyrad	kT	keV	0.09 $^{-----}_{-----}$	0.09 $^{-----}_{-----}$
bbodyrad	kT	keV	0.301 $^{-----}_{-----}$	0.301 $^{-----}_{-----}$
bbodyrad	norm	—	38.7 $^{+0.5}_{-0.5}$	39.27 $^{+0.3}_{-0.3}$
		km♯	1.244 $^{+0.008}_{-0.008}$	1.253 $^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	LineE	keV	0.703 $^{-----}_{-----}$	0.703 $^{-----}_{-----}$
gabs	Sigma	keV	0.033 $^{-----}_{-----}$	0.033 $^{-----}_{-----}$
gabs	Tau	—	0.022 $^{+0.006}_{-0.005}$	0.016 $^{+0.003}_{-0.003}$
gabs	LineE	keV	1.420 $^{-----}_{-----}$	1.420 $^{-----}_{-----}$
gabs	Sigma	keV	0.099 $^{-----}_{-----}$	0.099 $^{-----}_{-----}$
gabs	Tau	—	0.135 $^{+0.010}_{-0.010}$	0.164 $^{+0.008}_{-0.007}$
gabs	LineE	keV	2.149 $^{-----}_{-----}$	2.149 $^{-----}_{-----}$
gabs	Sigma	keV	0.408 $^{-----}_{-----}$	0.408 $^{-----}_{-----}$
gabs	Tau	—	0.72 $^{+0.04}_{-0.04}$	0.91 $^{+0.03}_{-0.03}$
$\chi^2/d.o.f$			482.84/155(3.12)	1529.50/380(4.03)
Null hypothesis probability			2.40E-35	1.88E-137
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.20E-12 $^{+2.24E-14}_{-1.86E-14}$	2.16E-12 $^{+1.34E-14}_{-1.26E-14}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.19E-12 $^{+1.20E-14}_{-2.60E-14}$	2.15E-12 $^{+1.22E-14}_{-7.80E-15}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

今度は 4 本目の吸収線を追加して、BB の温度と比率以外フリーにしてフィッティングしなおしたところ MOS、pn 共に acceptable fit を得られた。$\chi^2/d.o.f$ は本セクション前半の吸収線 3 本の場合と比べ同等または小さくなっている。以下に MOS1 と pn についての結果を載せる。MOS2 は MOS1 と同様の結果になったので省略する。

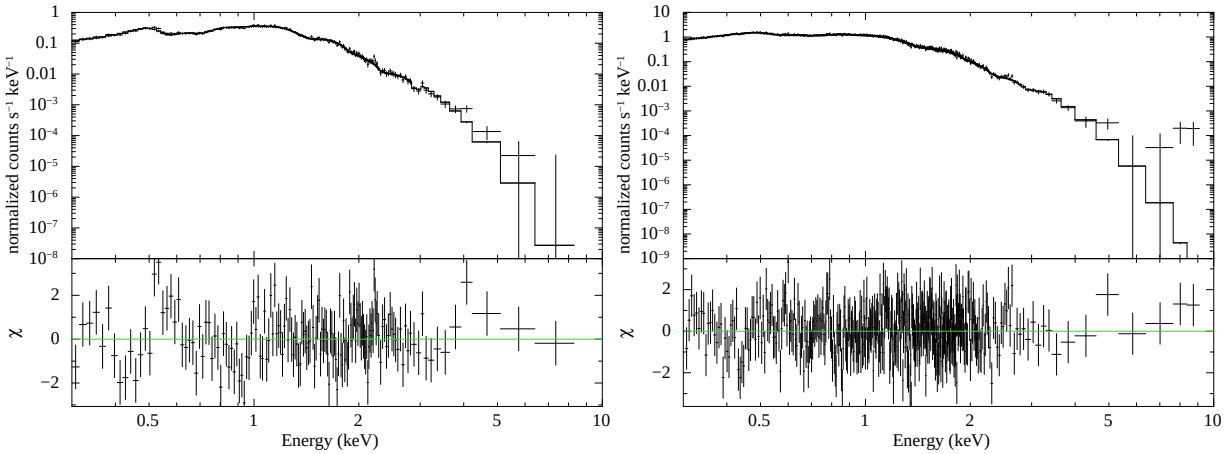

図 3.32: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:MOS1 右:pn

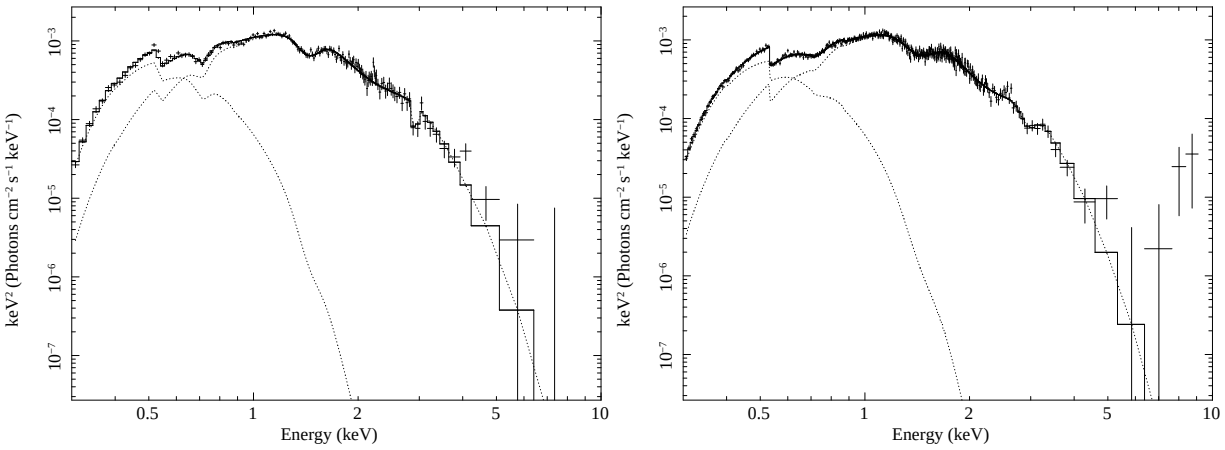

図 3.33: $\nu F\nu$ スペクトル。左:MOS1 右:pn

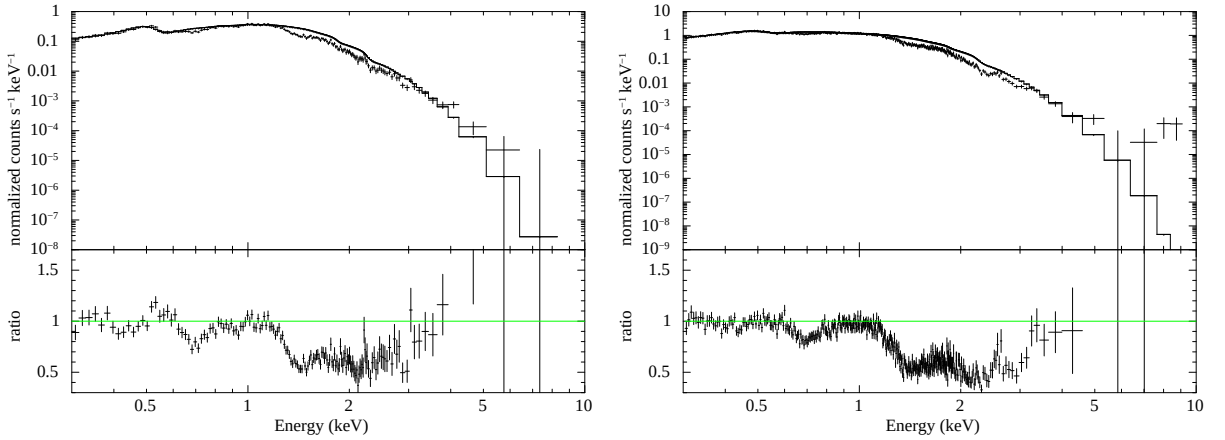

図 3.34: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:MOS1 右:pn

表 3.8: *Shallow1st*で 4 本目の吸収線を追加して、BB の温度と比率以外フリーにした場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	MOS1	pn
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.147\ ^{+0.004}_{-0.003}$	$0.139\ ^{+0.002}_{-0.002}$
bbodyrad	kT	keV	$0.090\ ^{-----}_{-----}$	$0.090\ ^{-----}_{-----}$
bbodyrad	norm	—	$5836\ ^{+189}_{-169}$	$5521\ ^{+99}_{-83}$
		km♯	$15.3\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$14.9\ ^{+0.1}_{-0.1}$
bbodyrad	kT	keV	$0.301\ ^{-----}_{-----}$	$0.301\ ^{-----}_{-----}$
bbodyrad	norm	—	$39.1\ ^{+0.4}_{-0.4}$	$38.8\ ^{+0.3}_{-0.3}$
		km♯	$1.250\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$1.246\ ^{+0.004}_{-0.005}$
gabs	LineE	keV	$0.710\ ^{+0.011}_{-0.010}$	$0.717\ ^{+0.009}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.03\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.05\ ^{+2.46}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.032\ ^{+0.008}_{-0.005}$	$0.034\ ^{+0.003}_{-0.005}$
gabs	LineE	keV	$1.439\ ^{+0.010}_{-0.402}$	$1.430\ ^{+0.008}_{-0.007}$
gabs	Sigma	keV	$0.103\ ^{+1.132}_{-0.009}$	$0.139\ ^{+1.570}_{-0.008}$
gabs	Tau	—	$0.133\ ^{+0.007}_{-0.014}$	$0.183\ ^{+0.008}_{-0.008}$
gabs	LineE	keV	$2.17\ ^{+0.02}_{-0.03}$	$2.22\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Sigma	keV	$0.42\ ^{+0.04}_{-0.01}$	$0.428\ ^{+0.01}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.72\ ^{+0.02}_{-0.08}$	$0.89\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$2.92\ ^{+0.03}_{-0.03}$	$2.95\ ^{+0.07}_{-0.04}$
gabs	Sigma	keV	$0.03\ ^{+0.07}_{-0.01}$	$0.14\ ^{+0.04}_{-0.05}$
gabs	Tau	—	$0.15\ ^{+0.34}_{-0.06}$	$0.19\ ^{+0.07}_{-0.05}$
$\chi^2/d.o.f$			201.37/144(1.40)	420.05/369(1.14)
Null hypothesis probability			1.14E-03	3.41E-02
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.23E-12 $^{+9.48E-13}_{-1.92E-13}$	2.16E-12 $^{+1.48E-12}_{-2.31E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.22E-12 $^{+9.93E-13}_{-8.44E-14}$	2.15E-12 $^{+1.48E-12}_{-4.44E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

最後に全てのパラメータ (17 個) をフリーにしてフィットしたところ MOS、pn 共に acceptable fit を得られた。$\chi^2/d.o.f$ は本セクション前半の吸収線 4 本の場合と比べ同等または小さくなっている。以下に MOS1 と pn についての結果を載せる。MOS2 は MOS1 と同様の結果になったので省略する。

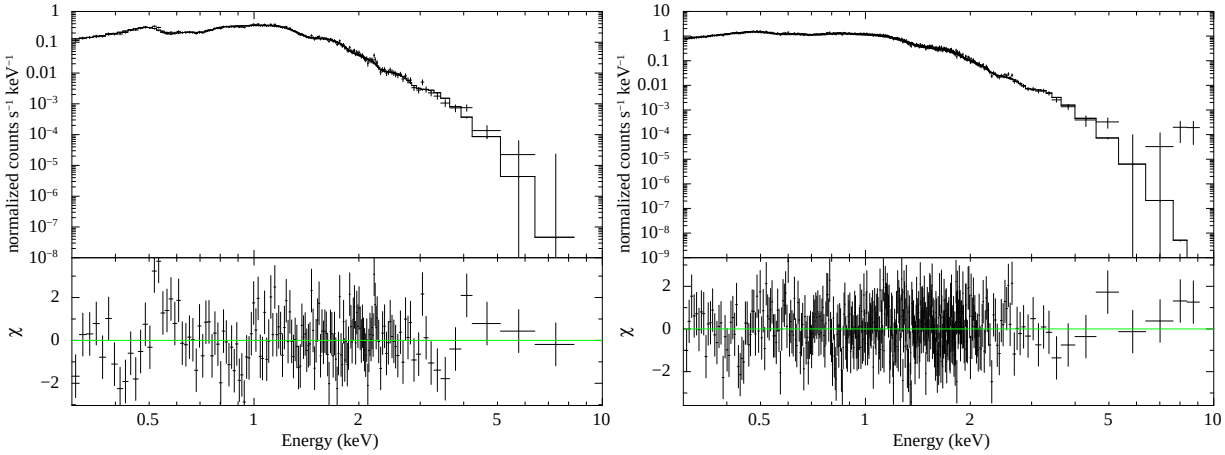

図 3.35: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:MOS1 右:pn

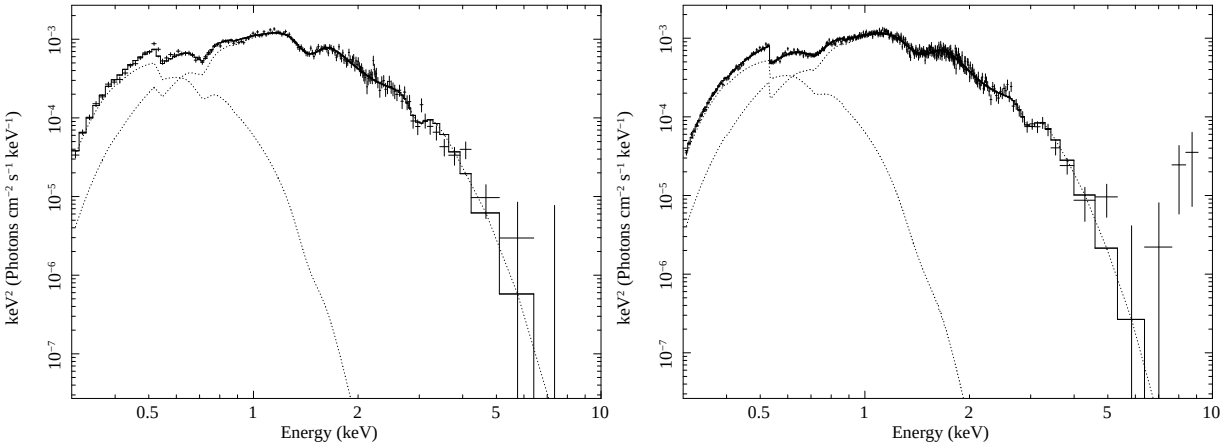

図 3.36: $\nu F\nu$ スペクトル。左:MOS1 右:pn

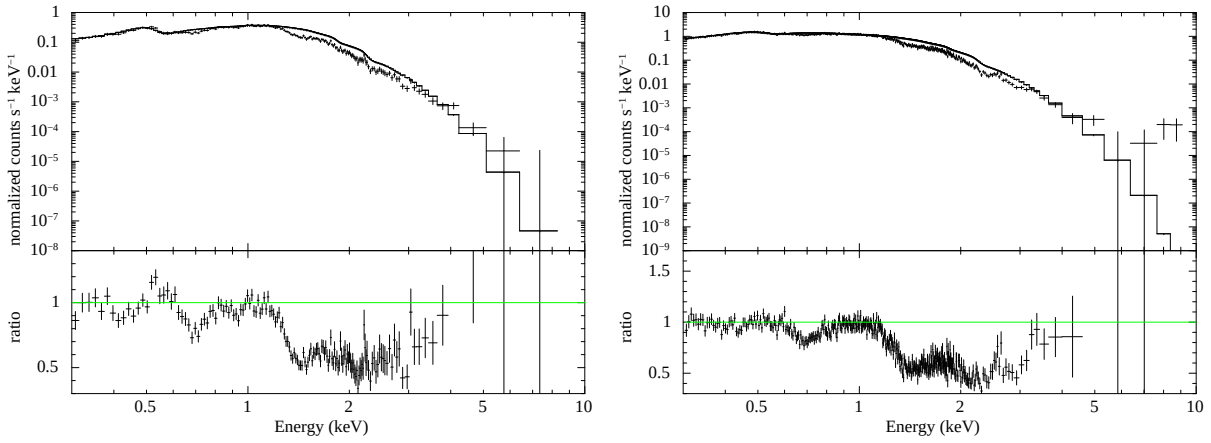

図 3.37: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:MOS1 右:pn

表 3.9: 全てのパラメータをフリーにした場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	MOS1	pn
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.132\ ^{+0.004}_{-0.002}$	$0.131\ ^{+0.002}_{-0.002}$
bbodyrad	kT	keV	$0.0911\ ^{+0.0006}_{-0.0006}$	$0.0919\ ^{+0.0004}_{-0.0004}$
bbodyrad	norm	—	$4752\ ^{+148}_{-151}$	$4590\ ^{+76}_{-75}$
		km♯	$13.8\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$13.6\ ^{+0.1}_{-0.1}$
bbodyrad	kT	keV	$0.311\ ^{+0.002}_{-0.002}$	$0.303\ ^{+0.001}_{-0.001}$
bbodyrad	norm	—	$34.1\ ^{+0.4}_{-0.4}$	$36.5\ ^{+0.3}_{-0.3}$
		km♯	$1.169\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$1.209\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	LineE	keV	$0.710\ ^{+0.011}_{-0.010}$	$0.714\ ^{+0.009}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.033\ ^{+0.012}_{-0.013}$	$0.044\ ^{+0.013}_{-0.009}$
gabs	Tau	—	$0.032\ ^{+0.006}_{-0.006}$	$0.032\ ^{+0.004}_{-0.004}$
gabs	LineE	keV	$1.439\ ^{+0.010}_{-0.416}$	$1.431\ ^{+0.007}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.102\ ^{+1.157}_{-0.010}$	$0.133\ ^{+0.007}_{-0.007}$
gabs	Tau	—	$0.130\ ^{+0.008}_{-0.012}$	$0.176\ ^{+0.007}_{-0.008}$
gabs	LineE	keV	$2.17\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$2.23\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Sigma	keV	$0.43\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.42\ ^{+0.02}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.82\ ^{+0.03}_{-0.06}$	$0.89\ ^{+0.03}_{-0.04}$
gabs	LineE	keV	$2.97\ ^{+0.08}_{-0.06}$	$2.95\ ^{+0.06}_{-0.04}$
gabs	Sigma	keV	$0.15\ ^{+0.11}_{-0.04}$	$0.13\ ^{+0.05}_{-0.05}$
gabs	Tau	—	$0.24\ ^{+0.09}_{-0.06}$	$0.20\ ^{+0.07}_{-0.05}$
$\chi^2/d.o.f$			206.37/142(1.45)	418.66/367(1.14)
Null hypothesis probability			3.40E-04	3.23E-02
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.24E-12 $^{+2.24E-12}_{-1.07E-12}$	2.16E-12 $^{+2.51E-12}_{-1.42E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.23E-12 $^{+2.45E-12}_{-8.75E-13}$	2.15E-12 $^{+2.61E-12}_{-1.83E-12}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

3.6.6　第 3 の連続成分があるか確かめる

前サブセクションでのモデルに加え、高エネルギー側のエクセスを説明するために powerlaw を連続成分として追加し、フィッティングを行った。その結果、MOS2 についてはうまくフィッティングできず、MOS1 と pn についてはフィッティングできたが、エラーを計算すると norm の下限 0 にまで落ち込んでしまう、つまり powerlaw 成分はなくても良いという結果になった。$\chi^2/d.o.f$ の値も入れる前と後で変わらないか大きくなってしまった。以下に解析結果をまとめる。

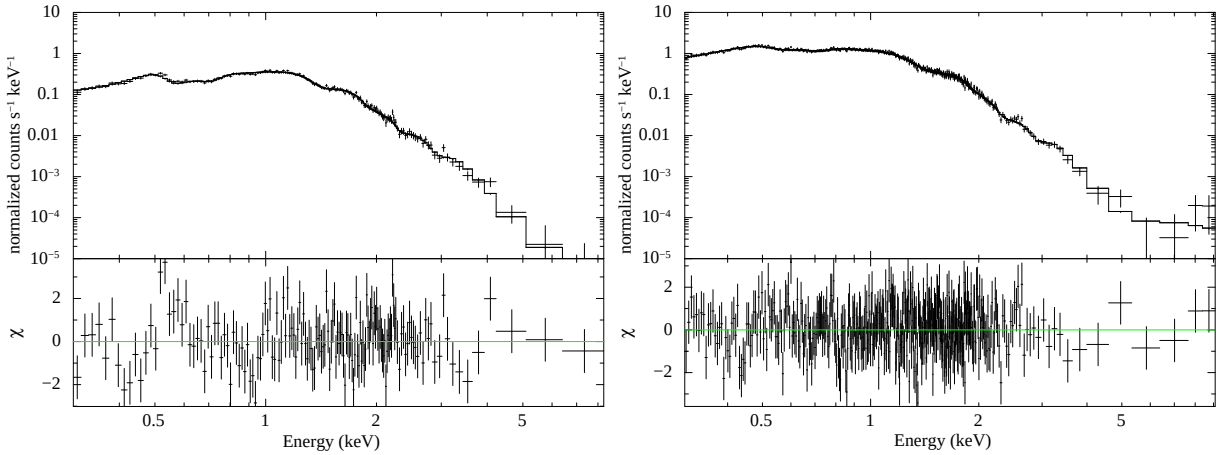

図 3.38: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:MOS1 右:pn

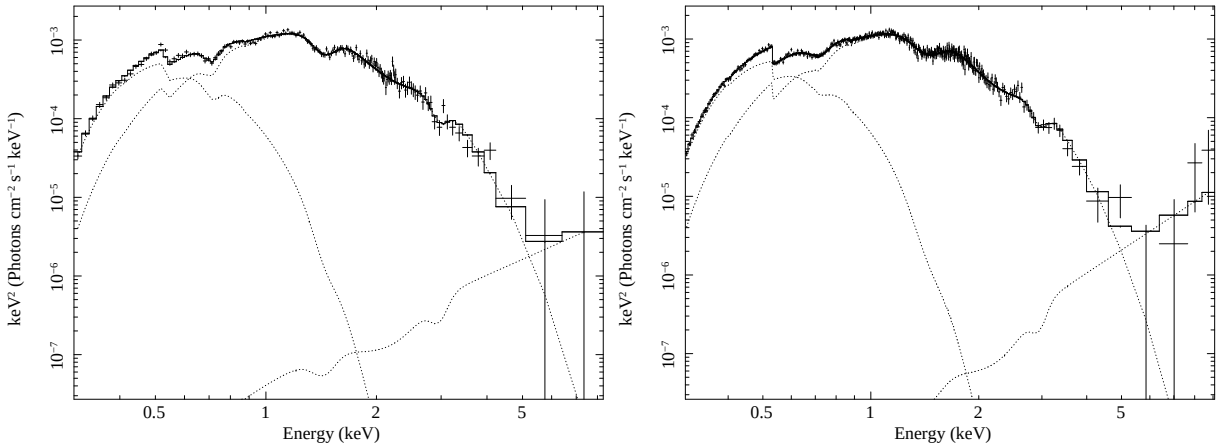

図 3.39: $\nu F\nu$ スペクトル。左:MOS1 右:pn

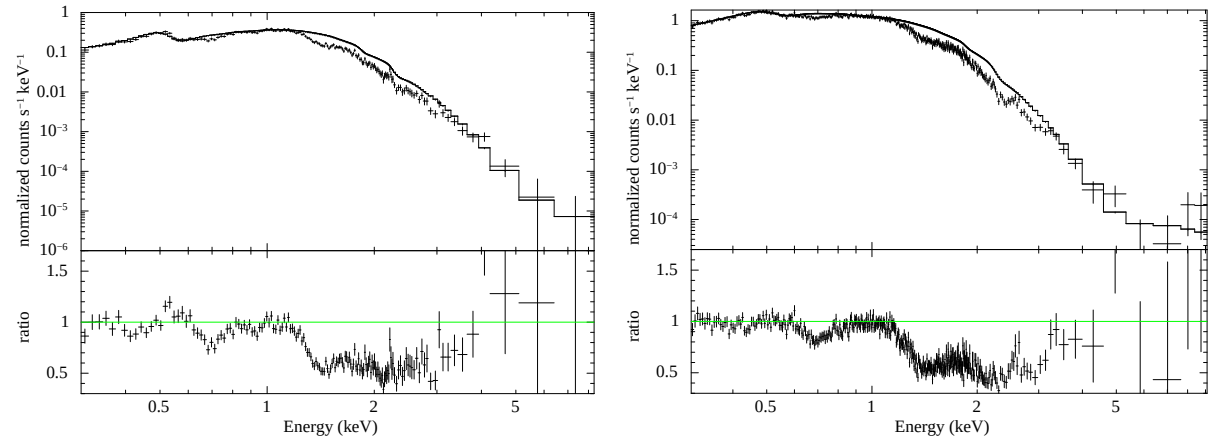

図 3.40: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:MOS1 右:pn

表 3.10: powerlaw を連続成分として追加した場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	MOS1	pn
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.132\ ^{+0.004}_{-0.002}$	$0.131\ ^{+0.002}_{-0.002}$
bbodyrad	kT	keV	$0.0912\ ^{+0.0006}_{-0.0006}$	$0.0919\ ^{+0.0004}_{-0.0003}$
bbodyrad	norm	—	$4746\ ^{+148}_{-150}$	$4589\ ^{+76}_{-74}$
		km♯	$13.8\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$13.6\ ^{+0.1}_{-0.1}$
powerlaw	PhoIndex	—	$-0.09\ ^{+9.2}_{-0.9}$	$-1.01\ ^{+1.01}_{-1.42}$
powerlaw	norm	—	$5.7\text{E-}08\ ^{+1.7E-07}_{-5.7E-08}$	$1.7\text{E-}08\ ^{+1.7E-08}_{-1.7E-08}$
bbodyrad	kT	keV	$0.311\ ^{+0.002}_{-0.002}$	$0.303\ ^{+0.001}_{-0.001}$
bbodyrad	norm	—	$34.1\ ^{+0.4}_{-0.4}$	$36.5\ ^{+0.3}_{-0.3}$
		km♯	$1.168\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$1.209\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	LineE	keV	$0.710\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.714\ ^{+0.009}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.033\ ^{+0.012}_{-0.013}$	$0.044\ ^{+0.013}_{-0.009}$
gabs	Tau	—	$0.032\ ^{+0.006}_{-0.006}$	$0.032\ ^{+0.004}_{-0.004}$
gabs	LineE	keV	$1.439\ ^{+0.009}_{-0.0011}$	$1.431\ ^{+0.007}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.102\ ^{+0.008}_{-0.009}$	$0.133\ ^{+0.007}_{-0.007}$
gabs	Tau	—	$0.130\ ^{+0.008}_{-0.011}$	$0.176\ ^{+0.007}_{-0.008}$
gabs	LineE	keV	$2.17\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$2.23\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Sigma	keV	$0.43\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.42\ ^{+0.02}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.81\ ^{+0.03}_{-0.06}$	$0.89\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$2.97\ ^{+0.08}_{-0.06}$	$2.95\ ^{+0.06}_{-0.04}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.11}_{-0.04}$	$0.13\ ^{+0.05}_{-0.05}$
gabs	Tau	—	$0.25\ ^{+0.09}_{-0.06}$	$0.20\ ^{+0.07}_{-0.05}$
$\chi^2/d.o.f$			205.71/140(1.47)	417.30/365(1.14)
Null hypothesis probability			2.52E-04	3.04E-02
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.24\text{E-}12\ ^{+4.39E-11}_{-3.37E-13}$	$2.17\text{E-}12\ ^{+1.10E-11}_{2.22E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.23\text{E-}12\ ^{+3.83E-11}_{-2.05E-13}$	$2.15\text{E-}12\ ^{+1.04E-11}_{5.38E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

3.6.7　高温側黒体放射成分のみに吸収構造がある場合

これまでは吸収構造が 2 つの黒体放射成分について吸収構造は両方に存在すると仮定してたモデルに基づいてフィッティングを行ってきた。しかし、もし *Shallow1st* が正しく、2 つの黒体放射がそれぞれ星全体と極付近に対応するのであれば、サイクロトロン共鳴を経験する放射は極付近起源と考えられるの高温側の黒体放射成分だけではないのか。実際にすざく衛星でも *Shallow1st* で高温側黒体放射成分のみに吸収構造があるモデルで良くスペクトルを説明できていた。そこで高温側の黒体放射成分のみに吸収構造が存在するモデルでフィッティングを行った。使用したのは pn のみで、0.3-10keV と 0.3-2keV の 2 種類のエネルギー領域でフィッティングした。結果は以下の様になった。

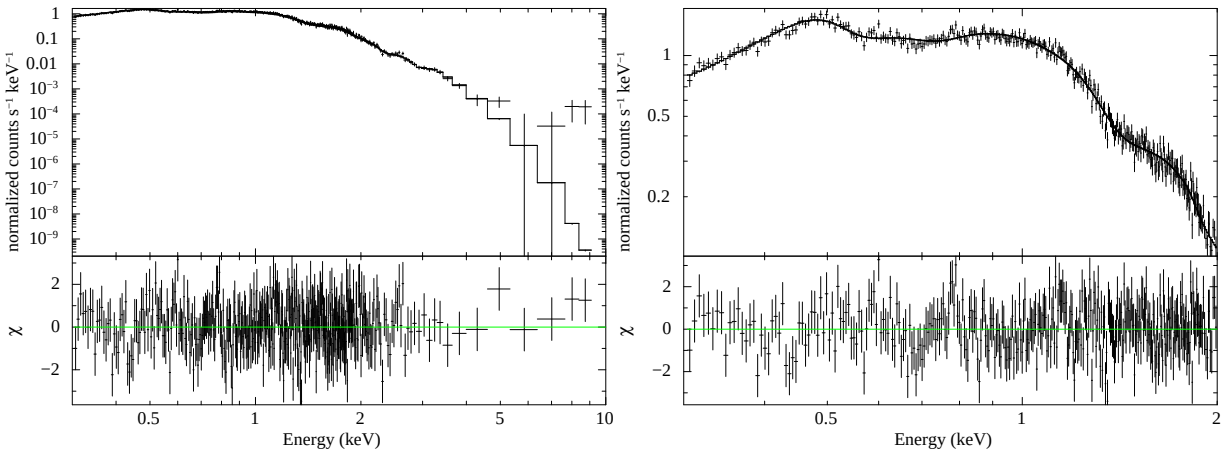

図 3.41: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:0.3-10keV。右:0.3-2keV。

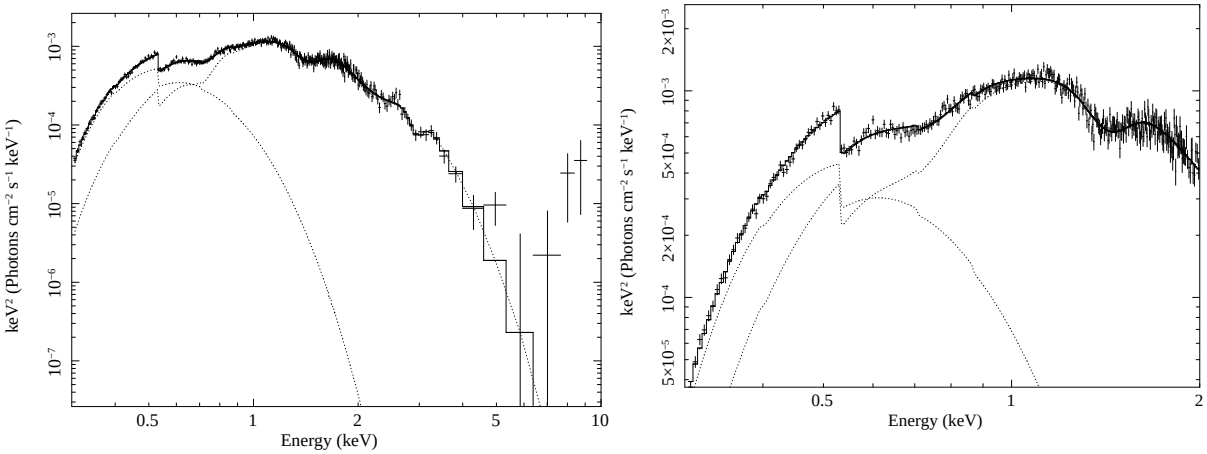

図 3.42: $\nu F\nu$ スペクトル。左:0.3-10keV。右:0.3-2keV。

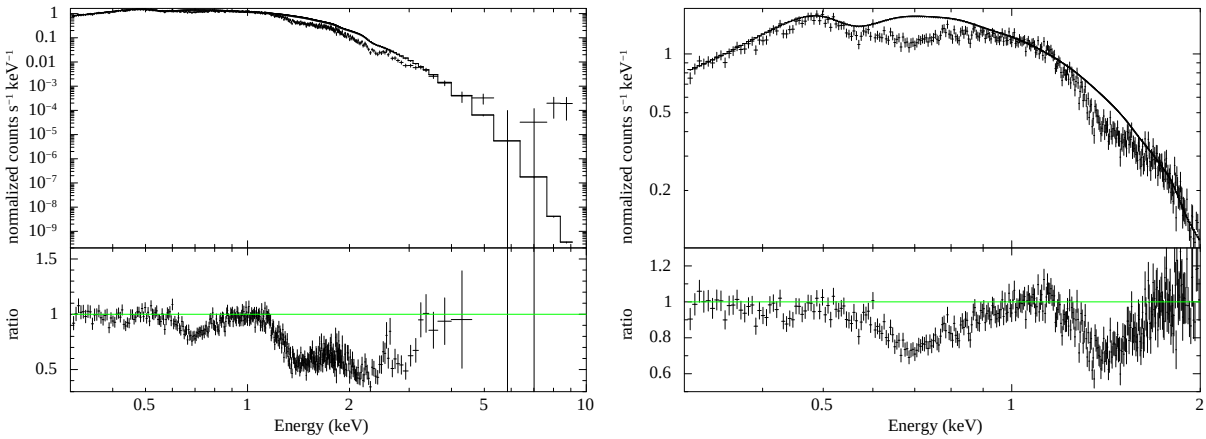

図 3.43: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:0.3-10keV。右:0.3-2keV。

表 3.11: pn スペクトルについて *Shallow1st* で高温側黒体放射成分のみに吸収構造がある場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	0.3-10keV	0.3-2keV
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$0.12\ ^{+0.02}_{-0.01}$
bbodyrad	kT	keV	$0.094\ ^{+0.008}_{-0.006}$	$0.097\ ^{+0.005}_{-0.012}$
bbodyrad	norm	—	$3892\ ^{+2702}_{-2102}$	$2773\ ^{+4021}_{-978}$
		km$^\sharp$	$12.5\ ^{+3.8}_{-4.0}$	$10.5\ ^{+6.0}_{-2.1}$
bbodyrad	kT	keV	$0.301\ ^{+0.006}_{-0.006}$	$0.253\ ^{+0.003}_{-0.005}$
bbodyrad	norm	—	$36.9\ ^{+3.9}_{-3.4}$	$71.1\ ^{+9.7}_{-5.2}$
		km$^\sharp$	$1.22\ ^{+0.06}_{-0.06}$	$1.69\ ^{+0.11}_{-0.06}$
gabs	LineE	keV	$0.710\ ^{+0.008}_{-0.012}$	$0.711\ ^{+0.014}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.05\ ^{+0.02}_{-0.03}$	$0.09\ ^{+0.02}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.06\ ^{+0.03}_{-0.01}$	$0.11\ ^{+0.02}_{-0.05}$
gabs	LineE	keV	$1.433\ ^{+0.014}_{-0.013}$	$1.425\ ^{+0.009}_{-0.010}$
gabs	Sigma	keV	$0.135\ ^{+0.015}_{-0.016}$	$0.111\ ^{+0.008}_{-0.014}$
gabs	Tau	—	$0.179\ ^{+0.032}_{-0.031}$	$0.112\ ^{+0.009}_{-0.014}$
gabs	LineE	keV	$2.21\ ^{+0.04}_{-0.04}$	—
gabs	Sigma	keV	$0.40\ ^{+0.07}_{-0.06}$	—
gabs	Tau	—	$0.78\ ^{+0.17}_{-0.15}$	—
gabs	LineE	keV	$2.94\ ^{+0.07}_{-0.06}$	—
gabs	Sigma	keV	$0.13\ ^{+0.07}_{-0.06}$	—
gabs	Tau	—	$0.20\ ^{+0.11}_{-0.09}$	—
$\chi^2/d.o.f$			417.50/367(1.14)	379.37/322(1.18)
Null hypothesis probability			3.52E-02	1.52E-02
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+6.90E-15}_{-3.13E-13}$	—
Flux@0.3-2.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	—	$2.00\text{E-}12\ ^{+6.50E-15}_{-6.12E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

$\sharp$ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

0.3-10.0keV の結果を見ると両方の吸収構造が存在している場合と同程度かまたは若干良く合っている。

また *Deep1st* で高温側の黒体放射成分のみに吸収構造が存在する場合についてもフィッティングした。ただし、行ったのは 0.3-10.0keV についてである。結果は以下の様になった。

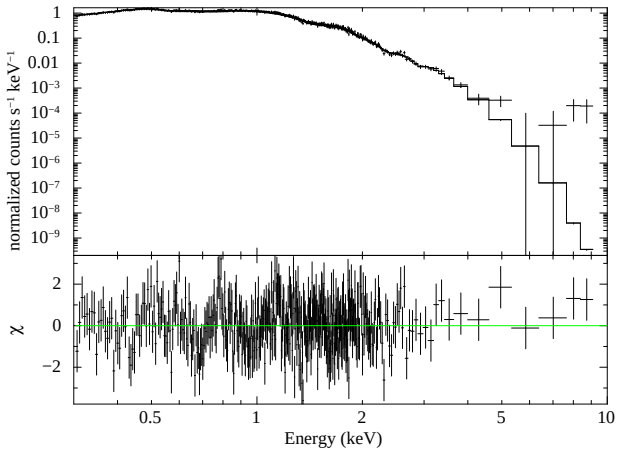

図 3.44: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。

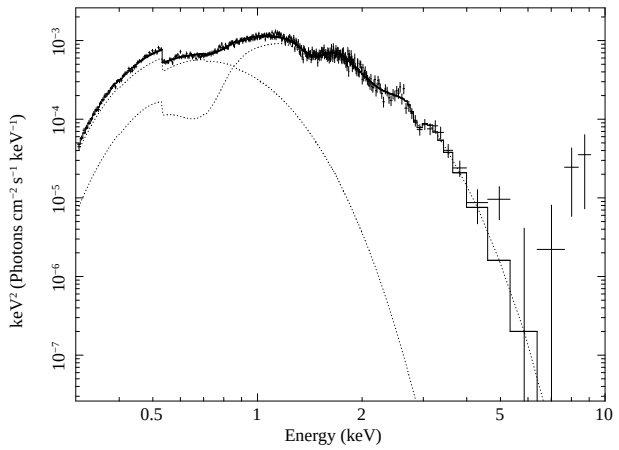

図 3.45: $\nu F\nu$ スペクトル。

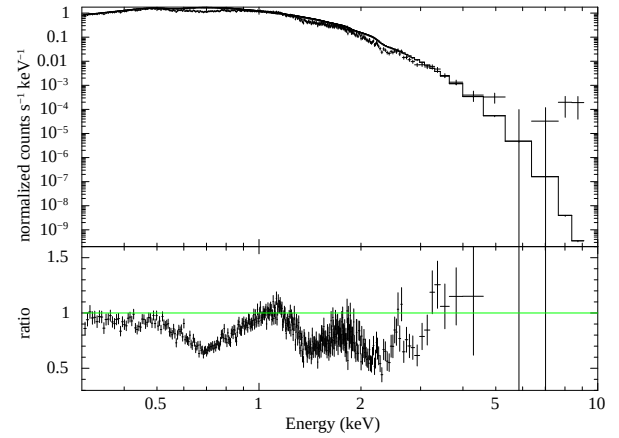

図 3.46: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。

表 3.12: pn スペクトルについて *Deep1st* で高温側黒体放射成分のみに吸収構造がある場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	0.3-10keV
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.098\ ^{+0.002}_{-0.002}$
bbodyrad	kT	keV	$0.134\ ^{+0.001}_{-0.001}$
bbodyrad	norm	—	$690.5\ ^{+126.3}_{-0.6}$
		km$^\sharp$	$5.3\ ^{+0.5}_{-0.2}$
bbodyrad	kT	keV	$0.304\ ^{+0.001}_{-0.001}$
bbodyrad	norm	—	$26.0\ ^{+8.4}_{-0.3}$
		km$^\sharp$	$1.020\ ^{+0.153}_{-0.005}$
gabs	LineE	keV	$0.690\ ^{+0.008}_{-0.006}$
gabs	Sigma	keV	$0.101\ ^{+0.006}_{-0.006}$
gabs	Tau	—	$0.35\ ^{+0.02}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$1.438\ ^{+0.009}_{-0.010}$
gabs	Sigma	keV	$0.116\ ^{+0.007}_{-0.009}$
gabs	Tau	—	$0.132\ ^{+0.010}_{-0.007}$
gabs	LineE	keV	$2.21\ ^{+0.02}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	$0.31\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.41\ ^{+0.04}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.90\ ^{+0.06}_{-0.06}$
gabs	Sigma	keV	$0.09\ ^{+0.07}_{-0.05}$
gabs	Tau	—	$0.12\ ^{+0.07}_{-0.04}$
$\chi^2/d.o.f$			447.58/367(1.22)
Null hypothesis probability			2.52E-03
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.16E-12 $^{+4.39E-13}_{-3.65E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

この輻射モデルは有意な改善をもたらさなかった。

3.6.8 連続成分に NPEX を使用した場合

連星系 X 線パルサー等のスペクトルフィッティングに良く使用されている連続成分のモデルとして NPEX (Negative and Positive power laws with exponential; Mihara 1995) が挙げられる。今回、1E1207.4−5209 のスペクトルについてもこの NPEX モデルを連続成分としてフィッティングした。使用したのは pn のみで、0.3-10keV と 0.3-2keV の 2 種類のエネルギー領域について実行した。

また、NPEX のモデル定義は次の通り。

$$\mathrm{NPEX}(E) = (A \times E^{-\alpha} + B \times E^{+\beta}) \times \exp(-E/kT)$$

フィッティング結果は以下の様になった。

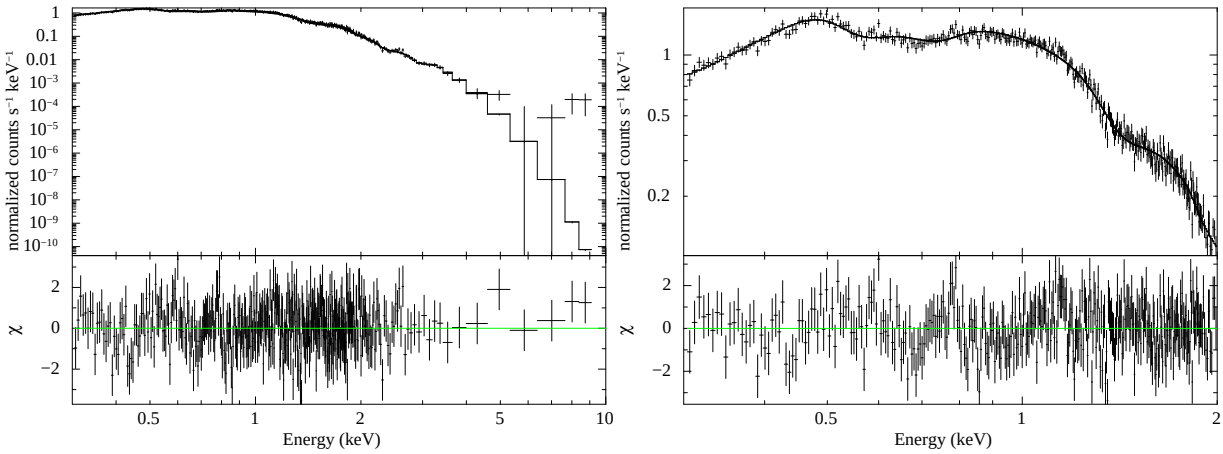

図 3.47: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:0.3-10keV。右:0.3-2keV。

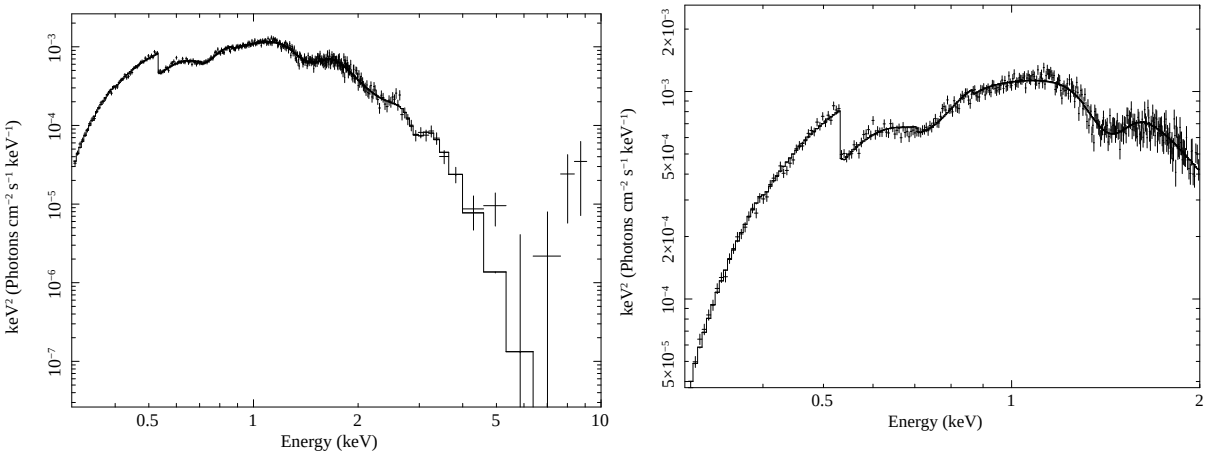

図 3.48: νF_ν スペクトル。左:0.3-10keV。右:0.3-2keV。

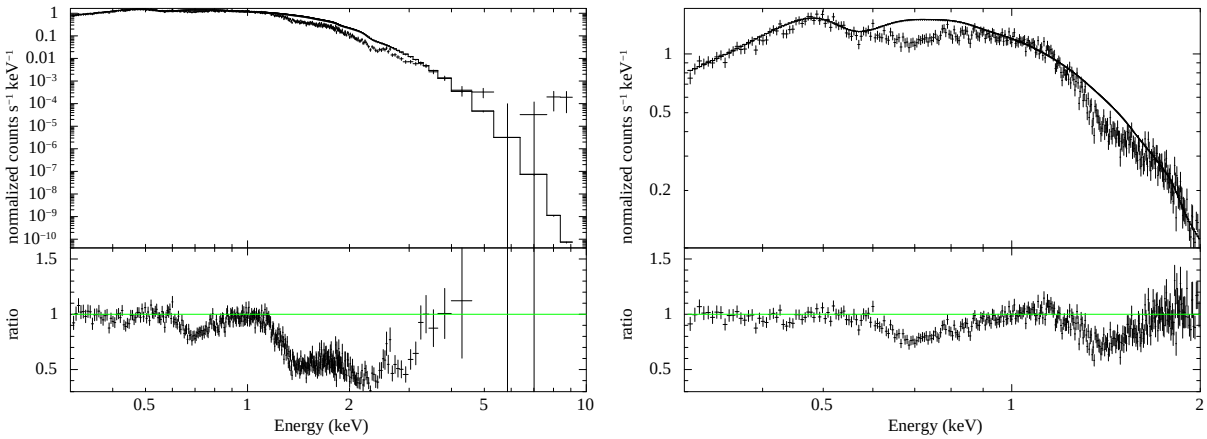

図 3.49: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:0.3-10keV。右:0.3-2keV。

表 3.13: pn スペクトルについて連続成分に NPEX を使用した場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	0.3-10keV	0.3-2keV
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.149\ ^{+0.001}_{-0.003}$	$0.141\ ^{+0.007}_{-0.002}$
npex2	A	—	$0.023\ ^{+0.001}_{-2.5E-04}$	$0.015\ ^{+0.001}_{-0.002}$
npex2	α	—	$1.18\ ^{+0.018}_{-0.018}$	$1.45\ ^{+0.23}_{-0.02}$
npex2	B	—	$0.052\ ^{+0.001}_{-4.7E-04}$	$0.059\ ^{+0.001}_{-0.003}$
npex2	β	—	$3.19\ ^{+0.02}_{-0.04}$	$2.00\ ^{+0.05}_{-0.02}$
npex2	kT	keV	$0.2604\ ^{+0.0004}_{-0.0003}$	$0.2599\ ^{+0.0004}_{-0.0015}$
gabs	LineE	keV	$0.722\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.734\ ^{+0.007}_{-0.007}$
gabs	Sigma	keV	$0.052\ ^{+0.010}_{-0.010}$	$0.069\ ^{+0.011}_{-0.005}$
gabs	Tau	—	$0.035\ ^{+0.003}_{-0.034}$	$0.053\ ^{+0.007}_{-0.002}$
gabs	LineE	keV	$1.436\ ^{+0.006}_{-0.009}$	$1.425\ ^{+0.009}_{-0.010}$
gabs	Sigma	keV	$0.136\ ^{+0.006}_{-0.008}$	$0.100\ ^{+0.010}_{-0.007}$
gabs	Tau	—	$0.180\ ^{+0.016}_{-0.007}$	$0.099\ ^{+0.012}_{-0.006}$
gabs	LineE	keV	$2.21\ ^{+0.01}_{-0.02}$	—
gabs	Sigma	keV	$0.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	—
gabs	Tau	—	$0.94\ ^{+0.05}_{-0.04}$	—
gabs	LineE	keV	$2.95\ ^{+0.05}_{-0.05}$	—
gabs	Sigma	keV	$0.13\ ^{+0.05}_{-0.04}$	—
gabs	Tau	—	$0.21\ ^{+0.06}_{-0.06}$	—
$\chi^2/d.o.f$			427.14/366(1.17)	393.41/321(1.23)
Null hypothesis probability			1.50E-02	3.54E-03
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.15E-12 $^{+3.39E-13}_{-2.44E-13}$	—
Flux@0.3-2.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	—	2.00E-12 $^{+9.87E-13}_{-5.66E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

0.3-10.0keV の結果を見ると連続成分が 2 温度黒体放射の場合に比べ、$\chi^2/d.o.f$ や probability の値は悪くなっている。つまり NPEX モデルでは 1E1207.4−5209 のスペクトルを説明できない。

3.7　位相分割スペクトル解析

これまでは観測時間全体の平均スペクトルを解析してきたが、今度は周期内のスペクトルの変動を確認するために pn データを周期の位相ごとに 4 つに分けて、各部分のスペクトルを作成しフィッティングを行った。各部分は畳み込みライトカーブの最小 (0-0.125,0.875-1.0)、立ち上がり (0.125-0.375)、最大 (0.375-0.625)、立ち下がり (0.625-0.875) を使用した。図 3.50 に畳み込みライトカーブ上に分割した各位相部分を図示した。

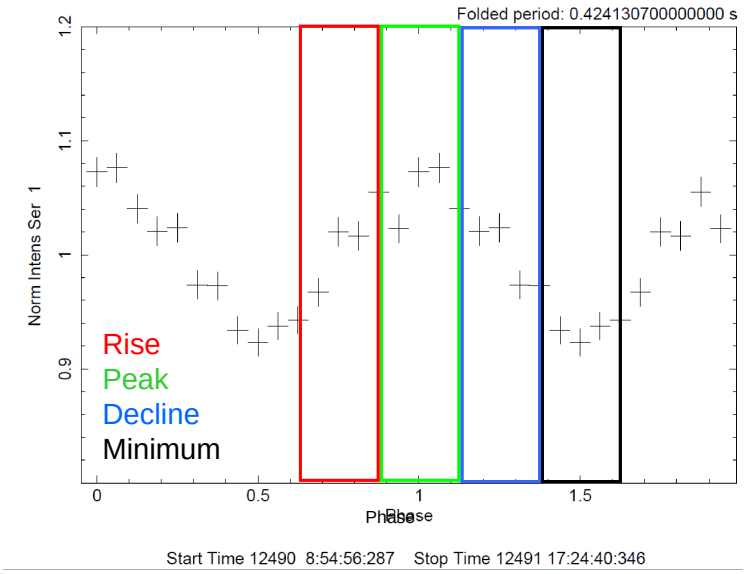

図 3.50: 分割した各位相部分を畳み込みライトカーブ上に示した図。各部分は 1 周期を 4 等分するように選択している。

使用したエネルギー帯域は統計を考慮して 0.3-4.0keV とした。モデルは *Shallow1st* と *Deep1st* 両方で試し、吸収は 3 本でしかもそれぞれをフィットするのではなく wabs の値や吸収線の中心エネルギーを同一として一緒にフィッティングした。また、吸収構造が 2 つの黒体放射成分の内、両方にかかる場合、低温側にかかる場合、高温側にかかる場合の 3 種類について確かめた。もし *Shallow1st* という本論文の解釈が正しく、高温、低温、2 つの黒体放射がそれぞれ星全体と極付近に対応するのであれば、サイクロトロン共鳴が起こるのは一般的に極付近なので吸収構造は高エネルギー側の黒体放射成分にしかかからないはずである。この様な仮説のもと行ったフィッティング結果を次ページ以降にまとめた。

フィッティングの結果、*Shallow1st* については 2 つの黒体放射両方にかかる場合と、高温側の黒体放射にかかる場合はスペクトルを良く説明できている様だった。しかし低温側の黒体放射にかかる場合はフィッティング出来なかった。χ^2/dof の値は 3.38 とまったく合わない。つまり低エネルギー側の黒体放射成分だけには吸収構造は存在しない。また、*Deep1st* については全ての場合でスペクトルを説明できた。ただし、χ^2/dof の値は *Shallow1st* に比べて少しだけ大きい。

このことから XMM-Newton のデータについても吸収構造は少なくとも高エネルギー側の黒体放射成分に存在しており、高エネルギー黒体放射成分のみに存在している可能性が高い。つまり極付近で吸収が起きている事を意味しているのではないかと考えられる。

Shallow1st **wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs*gabs**

Shallow1st で 2 つの黒体放射成分両方に吸収構造がかかっている場合。

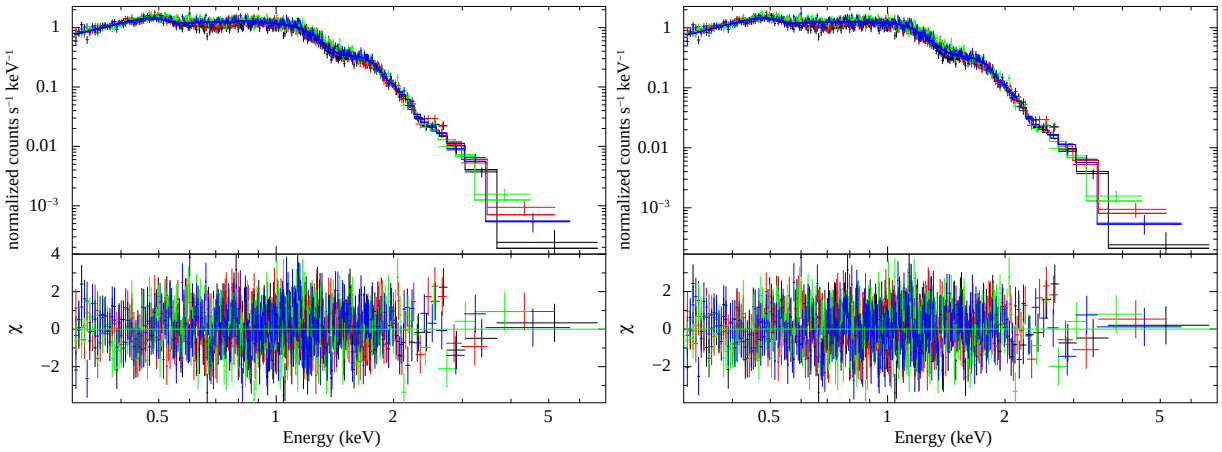

図 3.51: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

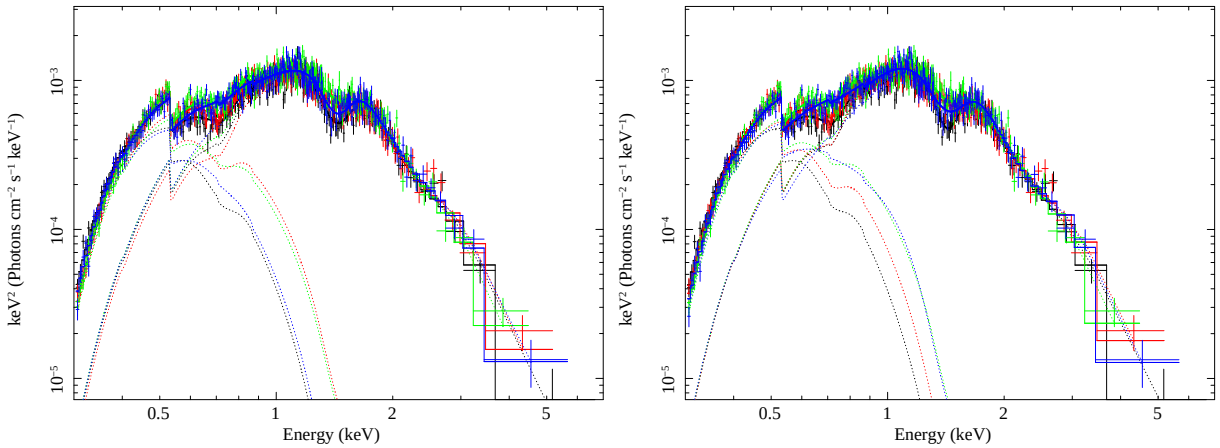

図 3.52: $\nu F\nu$ スペクトル。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

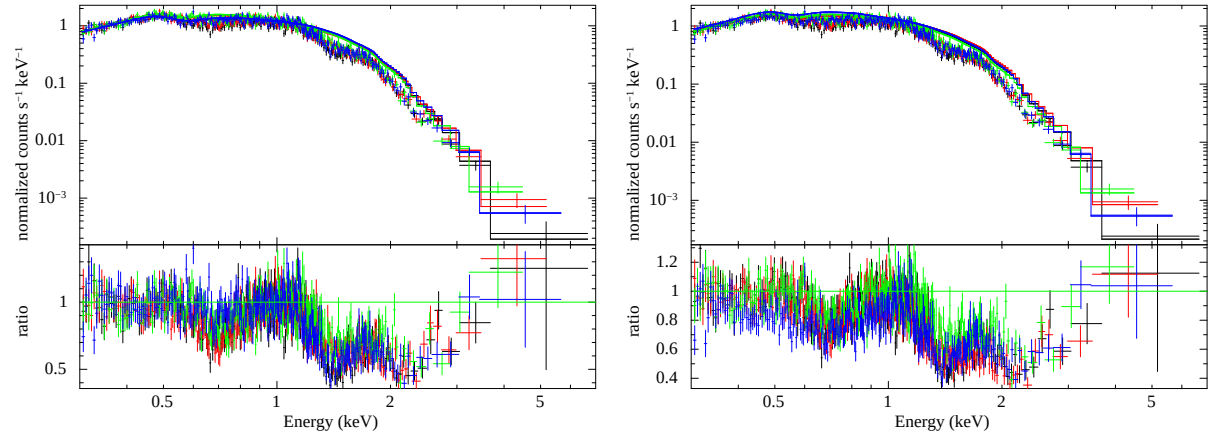

図 3.53: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

表 3.14: *Shallow1st* で 2 つの黒体放射成分両方に吸収構造がかかっている場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	pn (same width)	pn (free width)
Phase Minimum				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.13\ ^{+0.01}_{-0.02}$
bbodyrad	kT	keV	$0.086\ ^{+0.011}_{-0.006}$	$0.086\ ^{+0.011}_{-0.008}$
bbodyrad	norm	—	$6464\ ^{+7350}_{-3564}$	$6403\ ^{+3736}_{-3154}$
		km♯	$16.1\ ^{+7.4}_{-5.3}$	$16.0\ ^{+4.1}_{-4.6}$
bbodyrad	kT	keV	$0.29\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.30\ ^{+0.01}_{-0.01}$
bbodyrad	norm	—	$39.1\ ^{+5.9}_{-5.5}$	$39.1\ ^{+5.1}_{-5.4}$
		km♯	$1.25\ ^{+0.09}_{-0.09}$	$1.25\ ^{+0.08}_{-0.09}$
gabs	LineE	keV	$0.714\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$0.715\ ^{+0.010}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.06\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.06\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.05\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.05\ ^{+0.03}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.12\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.09\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.19\ ^{+0.03}_{-0.03}$	$0.16\ ^{+0.05}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$2.25\ ^{+0.10}_{-0.08}$	$2.27\ ^{+0.10}_{-0.10}$
gabs	Sigma	keV	$0.47\ ^{+0.13}_{-0.10}$	$0.56\ ^{+0.24}_{-0.19}$
gabs	Tau	—	$0.83\ ^{+0.46}_{-0.28}$	$1.06\ ^{+0.95}_{-0.48}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs}(\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1})$	$2.00\text{E-}12\ ^{+1.54E-13}_{-3.32E-13}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+3.90E-15}_{-3.02E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs}(\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1})$	$2.00\text{E-}12\ ^{+1.63E-13}_{-4.03E-13}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+9.00E-16}_{-4.22E-13}$
Phase Rise				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.13\ ^{+0.01}_{-0.02}$
bbodyrad	kT	keV	$0.11\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.10\ ^{+0.02}_{-0.01}$
bbodyrad	norm	—	$2365\ ^{+2828}_{-1050}$	$3810\ ^{+2156}_{-1892}$
		km♯	$9.7\ ^{+4.7}_{-2.5}$	$12.4\ ^{+3.1}_{-3.6}$
bbodyrad	kT	keV	$0.30\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.30\ ^{+0.01}_{-0.01}$
bbodyrad	norm	—	$33.1\ ^{+7.3}_{-6.0}$	$37.8\ ^{+4.0}_{-4.0}$
		km♯	$1.15\ ^{+0.12}_{-0.11}$	$1.23\ ^{+0.06}_{-0.07}$
gabs	LineE	keV	$0.714\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$0.715\ ^{+0.010}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.06\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.06\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.07\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.05\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.12\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.14\ ^{+0.04}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.11\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.13\ ^{+0.07}_{-0.06}$
gabs	LineE	keV	$2.25\ ^{+0.10}_{-0.08}$	$2.27\ ^{+0.10}_{-0.10}$
gabs	Sigma	keV	$0.47\ ^{+0.13}_{-0.10}$	$0.57\ ^{+0.31}_{-0.18}$
gabs	Tau	—	$0.85\ ^{+0.50}_{-0.31}$	$1.22\ ^{+1.62}_{-0.61}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm}^{-2}\,\mathrm{s}^{-1}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+2.09E-14}_{-1.86E-13}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+7.00E-16}_{-5.37E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm}^{-2}\,\mathrm{s}^{-1}$	$2.12\text{E-}12\ ^{+1.43E-14}_{-2.97E-13}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+4.00E-16}_{-4.94E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Model	Parameter	unit	pn (same width)	pn (free width)
Phase Peak				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.13\ ^{+0.01}_{-0.02}$
bbodyrad	kT	keV	$0.10\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.11\ ^{+0.02}_{-0.01}$
bbodyrad	norm	—	$2410\ ^{+2042}_{-1114}$	$2303\ ^{+1453}_{-1130}$
		km♯	$9.8\ ^{+3.5}_{-2.6}$	$9.6\ ^{+2.7}_{-2.7}$
bbodyrad	kT	keV	$0.29\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.29\ ^{+0.01}_{-0.01}$
bbodyrad	norm	—	$43.5\ ^{+8.6}_{-7.8}$	$42.2\ ^{+7.9}_{-8.4}$
		km♯	$1.3\ ^{+0.1}_{-0.1}$	$1.3\ ^{+0.1}_{-0.1}$
gabs	LineE	keV	$0.714\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$0.715\ ^{+0.010}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.06\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.06\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.04\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.04\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.12\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.11\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.09\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.25\ ^{+0.10}_{-0.08}$	$2.27\ ^{+0.10}_{-0.10}$
gabs	Sigma	keV	$0.47\ ^{+0.13}_{-0.10}$	$0.48\ ^{+0.16}_{-0.12}$
gabs	Tau	—	$0.65\ ^{+0.45}_{-0.29}$	$0.70\ ^{+0.25}_{-0.33}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.26\text{E-}12\ ^{+1.75E-14}_{-1.89E-13}$	$2.26\text{E-}12\ ^{+4.70E-15}_{-4.72E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.26\text{E-}12\ ^{+1.90E-15}_{-3.35E-13}$	$2.26\text{E-}12\ ^{+9.30E-15}_{-4.08E-13}$
Phase Decline				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.13\ ^{+0.01}_{-0.02}$
bbodyrad	kT	keV	$0.089\ ^{+0.011}_{-0.007}$	$0.107\ ^{+0.009}_{-0.018}$
bbodyrad	norm	—	$5038\ ^{+4165}_{-2575}$	$2452\ ^{+2901}_{-778}$
		km♯	$14.2\ ^{+5.0}_{-4.3}$	$9.9\ ^{+4.7}_{-1.7}$
bbodyrad	kT	keV	$0.30\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.29\ ^{+0.01}_{-0.01}$
bbodyrad	norm	—	$40.7\ ^{+6.7}_{-5.9}$	$42.9\ ^{+3.2}_{-12.9}$
		km♯	$1.28\ ^{+0.10}_{-0.10}$	$1.31\ ^{+0.05}_{-0.21}$
gabs	LineE	keV	$0.714\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$0.715\ ^{+0.010}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.06\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.18\ ^{+0.05}_{-0.06}$
gabs	Tau	—	$0.02\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$0.15\ ^{+0.04}_{-0.09}$
gabs	LineE	keV	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.12\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.14\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.17\ ^{+0.03}_{-0.03}$	$0.22\ ^{+0.05}_{-0.06}$
gabs	LineE	keV	$2.25\ ^{+0.10}_{-0.08}$	$2.27\ ^{+0.10}_{-0.10}$
gabs	Sigma	keV	$0.47\ ^{+0.13}_{-0.10}$	$0.42\ ^{+0.13}_{-0.13}$
gabs	Tau	—	$0.82\ ^{+0.47}_{-0.30}$	$0.81\ ^{+0.41}_{-0.40}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+1.07E-14}_{-1.65E-13}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+4.44E-14}_{-7.13E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+1.68E-14}_{-1.86E-13}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+3.04E-14}_{-8.38E-13}$
$\chi^2/d.o.f$			1231.23/1039(1.19)	1213.33/1030(1.18)
Null hypothesis probability			3.22E-05	6.25E-05

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Shallow1st **wabs(bbodyrad*gabs*gabs*gabs+bbodyrad)**

*Shallow1st*で、低温側の黒体放射成分に吸収構造がかかっている場合。フィッティングの結果、まったく合わなかった。err も計算できなかった。fit 時の χ^2/dof は 3.38146。

Shallow1st **wabs(bbodyrad+bbodyrad*gabs*gabs*gabs)**

*Shallow1st*で、高温側の黒体放射成分に吸収構造がかかっている場合。

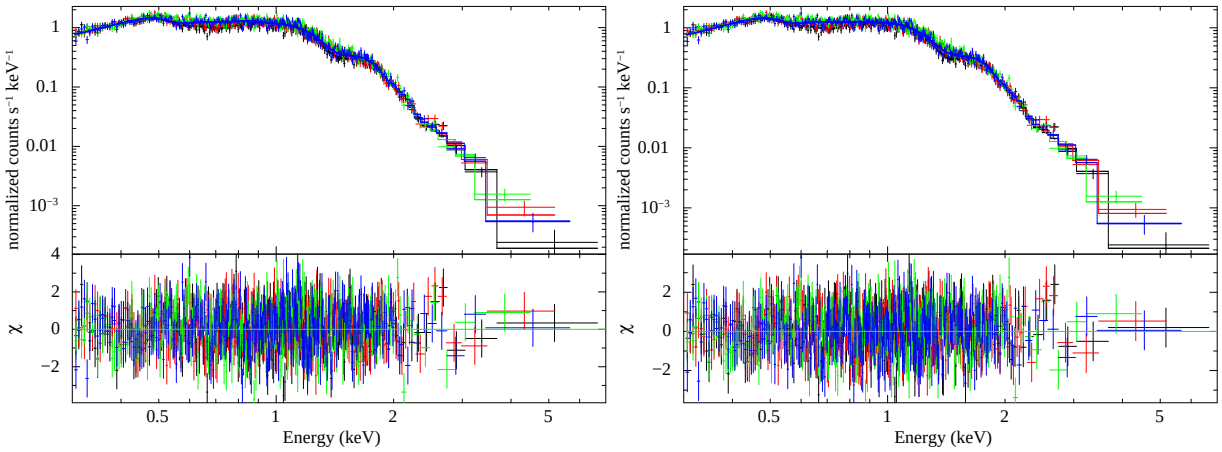

図 3.54: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

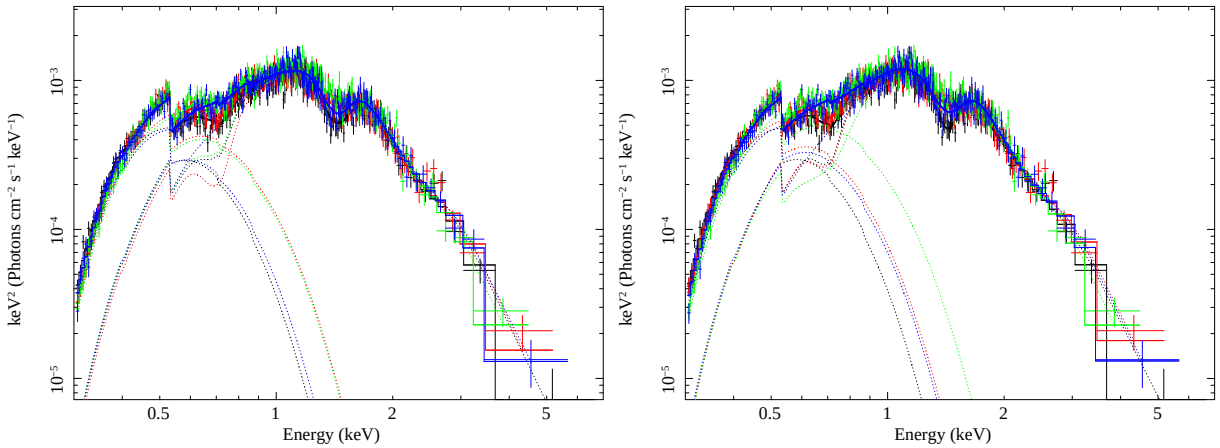

図 3.55: $\nu F\nu$ スペクトル。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

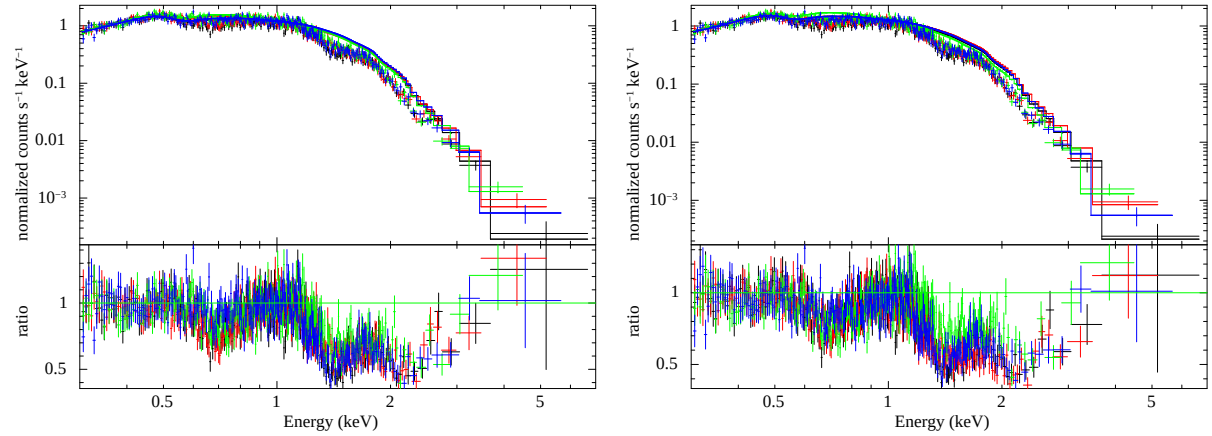

図 3.56: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

表 3.15: *Shallow1st*で、高温側の黒体放射成分に吸収構造がかかっている場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	pn (same width)	pn (free width)
Phase Minimum				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.132\ ^{+0.016}_{-0.013}$	$0.128\ ^{+0.007}_{-0.006}$
bbodyrad	kT	keV	$0.083\ ^{+0.004}_{-0.005}$	$0.085\ ^{+0.002}_{-0.004}$
bbodyrad	norm	—	$7625\ ^{+4298}_{-2362}$	$6564\ ^{+1501}_{-2716}$
		km♯	$17.5\ ^{+4.4}_{-3.0}$	$16.2\ ^{+1.8}_{-3.8}$
bbodyrad	kT	keV	$0.294\ ^{+0.010}_{-0.009}$	$0.297\ ^{+0.004}_{-0.005}$
bbodyrad	norm	—	$39.6\ ^{+5.6}_{-4.8}$	$38.3\ ^{+2.2}_{-1.7}$
		km♯	$1.26\ ^{+0.09}_{-0.08}$	$1.24\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$0.705\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.703\ ^{+0.008}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.06\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.05\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.07\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.424\ ^{+0.012}_{-0.010}$	$1.419\ ^{+0.008}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.118\ ^{+0.014}_{-0.014}$	$0.090\ ^{+0.012}_{-0.012}$
gabs	Tau	—	$0.20\ ^{+0.03}_{-0.03}$	$0.16\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.25\ ^{+0.09}_{-0.08}$	$2.27\ ^{+0.06}_{-0.06}$
gabs	Sigma	keV	$0.47\ ^{+0.12}_{-0.09}$	$0.56\ ^{+0.06}_{-0.05}$
gabs	Tau	—	$0.83\ ^{+0.41}_{-0.27}$	$1.04\ ^{+0.29}_{-0.16}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+4.78E-14}_{-2.69E-13}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+1.32E-13}_{-1.54E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+3.87E-14}_{-1.72E-13}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+2.11E-13}_{-3.33E-13}$
Phase Rise				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.132\ ^{+0.016}_{-0.013}$	$0.128\ ^{+0.007}_{-0.006}$
bbodyrad	kT	keV	$0.103\ ^{+0.003}_{-0.009}$	$0.095\ ^{+0.002}_{-0.004}$
bbodyrad	norm	—	$2820\ ^{+3201}_{-452}$	$3781\ ^{+1641}_{-1641}$
		km♯	$10.6\ ^{+4.9}_{-0.9}$	$12.3\ ^{+2.4}_{-3.0}$
bbodyrad	kT	keV	$0.301\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$0.304\ ^{+0.003}_{-0.005}$
bbodyrad	norm	—	$34.3\ ^{+3.2}_{-3.7}$	$37.0\ ^{+4.8}_{-2.0}$
		km♯	$1.17\ ^{+0.05}_{-0.07}$	$1.22\ ^{+0.08}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$0.705\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.703\ ^{+0.008}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.06\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.05\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.13\ ^{+0.08}_{-0.06}$	$0.09\ ^{+0.04}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.424\ ^{+0.012}_{-0.010}$	$1.419\ ^{+0.008}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.12\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.14\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.12\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.12\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.25\ ^{+0.09}_{-0.08}$	$2.27\ ^{+0.06}_{-0.06}$
gabs	Sigma	keV	$0.47\ ^{+0.12}_{-0.09}$	$0.57\ ^{+0.14}_{-0.05}$
gabs	Tau	—	$0.86\ ^{+0.41}_{-0.25}$	$1.20\ ^{+0.33}_{-0.21}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+2.42E-14}_{-3.22E-13}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+8.15E-14}_{-3.29E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.12\text{E-}12\ ^{+6.05E-14}_{-2.85E-13}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+7.54E-14}_{-3.18E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Model	Parameter	unit	pn (same width)	pn (free width)
Phase Peak				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.132\ ^{+0.016}_{-0.013}$	$0.128\ ^{+0.007}_{-0.006}$
bbodyrad	kT	keV	$0.103\ ^{+0.006}_{-0.006}$	$0.115\ ^{+0.002}_{-0.012}$
bbodyrad	norm	—	$2686\ ^{+1805}_{-842}$	$1623\ ^{+751}_{-1120}$
		km♯	$10.4\ ^{+3.0}_{-1.8}$	$8.1\ ^{+1.7}_{-3.6}$
bbodyrad	kT	keV	$0.287\ ^{+0.011}_{-0.011}$	$0.289\ ^{+0.004}_{-0.004}$
bbodyrad	norm	—	$43.8\ ^{+7.9}_{-6.6}$	$39.6\ ^{+3.5}_{-2.3}$
		km♯	$1.32\ ^{+0.11}_{-0.10}$	$1.26\ ^{+0.05}_{-0.04}$
gabs	LineE	keV	$0.705\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.703\ ^{+0.008}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.06\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.09\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.07\ ^{+0.04}_{-0.02}$	$0.16\ ^{+0.08}_{-0.04}$
gabs	LineE	keV	$1.424\ ^{+0.012}_{-0.010}$	$1.419\ ^{+0.008}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.12\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.11\ ^{+0.04}_{-0.06}$
gabs	Tau	—	$0.10\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.08\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$2.25\ ^{+0.09}_{-0.08}$	$2.27\ ^{+0.06}_{-0.06}$
gabs	Sigma	keV	$0.47\ ^{+0.12}_{-0.09}$	$0.47\ ^{+0.12}_{-0.10}$
gabs	Tau	—	$0.66\ ^{+0.43}_{-0.28}$	$0.63\ ^{+0.22}_{-0.14}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.26E-12 $^{+5.36E-14}_{-3.68E-13}$	2.26E-12 $^{+3.69E-14}_{-4.48E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.26E-12 $^{+3.41E-14}_{-2.49E-13}$	2.25E-12 $^{+5.04E-14}_{-4.37E-13}$
Phase Decline				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.132\ ^{+0.016}_{-0.013}$	$0.128\ ^{+0.007}_{-0.006}$
bbodyrad	kT	keV	$0.097\ ^{+0.007}_{-0.006}$	$0.094\ ^{+0.002}_{-0.002}$
bbodyrad	norm	—	$5642\ ^{+3658}_{-1954}$	$3640\ ^{+382}_{-1530}$
		km♯	$15.0\ ^{+4.3}_{-2.9}$	$12.1\ ^{+6.2}_{-2.9}$
bbodyrad	kT	keV	$0.295\ ^{+0.011}_{-0.011}$	$0.295\ ^{+0.008}_{-0.004}$
bbodyrad	norm	—	$41.2\ ^{+6.2}_{-3.0}$	$41.9\ ^{+1.8}_{-4.6}$
		km♯	$1.28\ ^{+0.09}_{-0.05}$	$1.30\ ^{+0.03}_{-0.07}$
gabs	LineE	keV	$0.705\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.703\ ^{+0.008}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.06\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.14\ ^{+0.06}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.02\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.09\ ^{+0.02}_{-0.08}$
gabs	LineE	keV	$1.424\ ^{+0.012}_{-0.010}$	$1.419\ ^{+0.008}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.12\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.17\ ^{+0.03}_{-0.03}$	$0.19\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$2.25\ ^{+0.09}_{-0.08}$	$2.27\ ^{+0.06}_{-0.06}$
gabs	Sigma	keV	$0.47\ ^{+0.12}_{-0.09}$	$0.45\ ^{+0.08}_{-0.04}$
gabs	Tau	—	$0.82\ ^{+0.44}_{-0.29}$	$0.85\ ^{+0.23}_{-0.20}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.16E-12 $^{+7.90E-15}_{-2.28E-13}$	2.16E-12 $^{+3.61E-14}_{-2.58E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.16E-12 $^{+1.20E-14}_{-2.03E-13}$	2.16E-12 $^{+3.42E-14}_{-3.07E-13}$
$\chi^2/d.o.f$			1232.33/1039(1.19)	1209.89/1030(1.17)
Null hypothesis probability			2.94E-05	8.22E-05

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Deep1st **wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs*gabs**

吸収構造のモデルについて 1 本目が深い *Deep1st* についても *Shallow1st* と同様にチェックした。*Deep1st* で 2 つの黒体放射成分両方に吸収構造がかかっている場合。

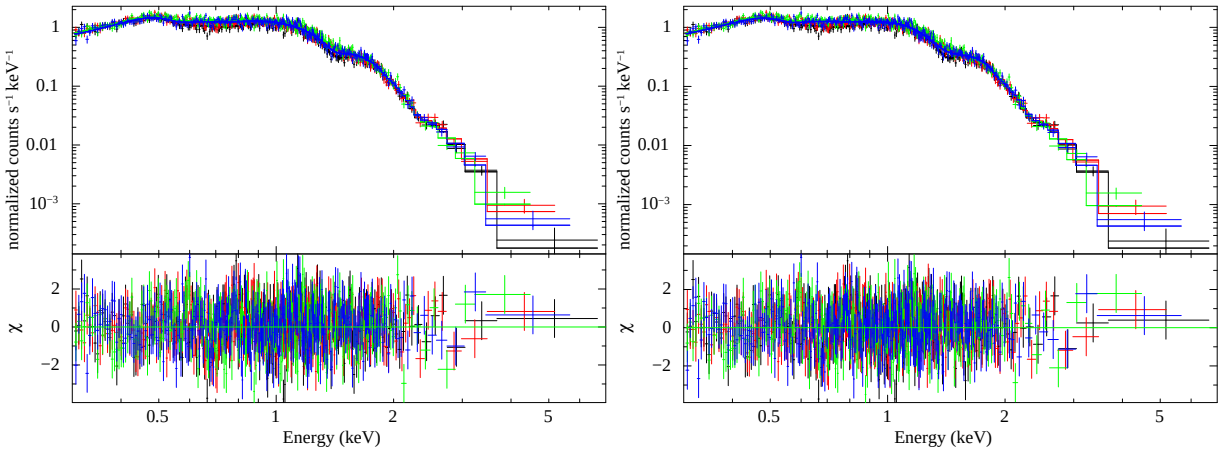

図 3.57: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

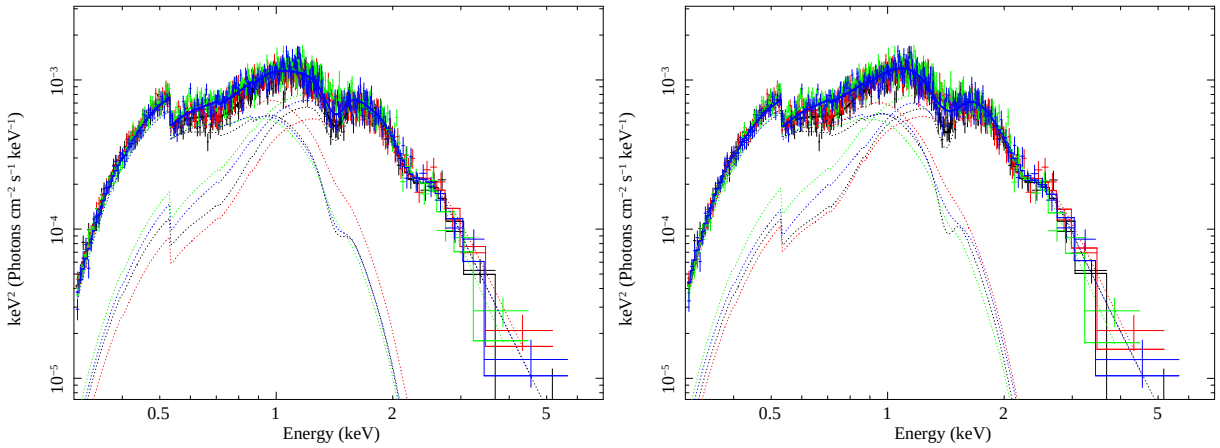

図 3.58: $\nu F\nu$ スペクトル。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

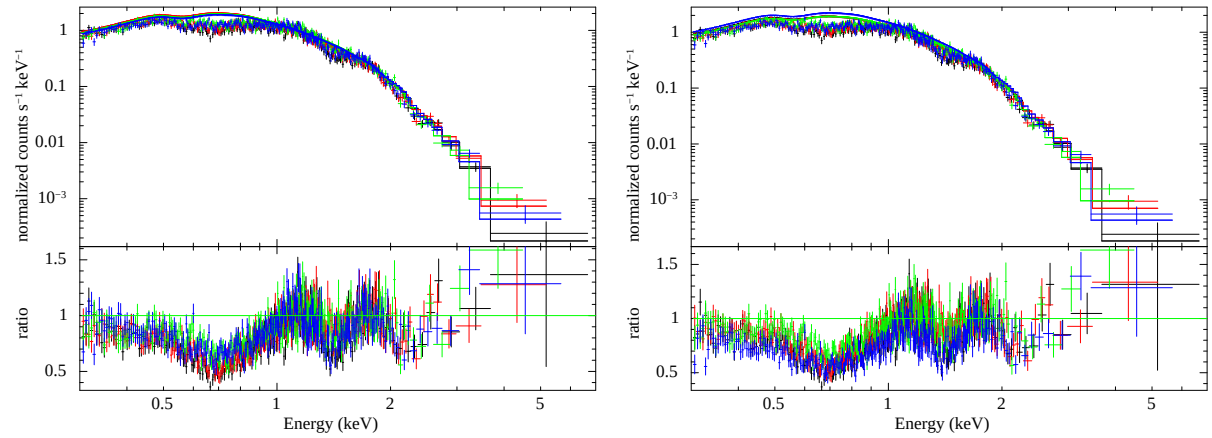

図 3.59: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

表 3.16: *Deep1st* で 2 つの黒体放射成分両方に吸収構造がかかっている場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	pn (same width)	pn (free width)
Phase Minimum				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.109\ ^{+0.008}_{-0.015}$	$0.105\ ^{+0.010}_{-0.007}$
bbodyrad	kT	keV	$0.146\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$0.149\ ^{+0.005}_{-0.005}$
bbodyrad	norm	—	$724.2\ ^{+187.9}_{-227.0}$	$643.8\ ^{+216.1}_{-101.4}$
		km♯	$5.4\ ^{+0.7}_{-0.9}$	$5.1\ ^{+0.8}_{-0.4}$
bbodyrad	kT	keV	$0.311\ ^{+0.014}_{-0.015}$	$0.315\ ^{+0.010}_{-0.009}$
bbodyrad	norm	—	$16.8\ ^{+7.1}_{-4.6}$	$15.5\ ^{+3.3}_{-3.2}$
		km♯	$0.82\ ^{+0.16}_{-0.12}$	$0.79\ ^{+0.08}_{-0.09}$
gabs	LineE	keV	$0.718\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.719\ ^{+0.007}_{-0.007}$
gabs	Sigma	keV	$0.137\ ^{+0.008}_{-0.015}$	$0.132\ ^{+0.016}_{-0.018}$
gabs	Tau	—	$0.24\ ^{+0.06}_{-0.04}$	$0.23\ ^{+0.05}_{-0.07}$
gabs	LineE	keV	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.41\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.06\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.11\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.10\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.23\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.22\ ^{+0.04}_{-0.05}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$0.15\ ^{+0.07}_{-0.05}$
gabs	Tau	—	$0.17\ ^{+0.07}_{-0.07}$	$0.15\ ^{+0.07}_{-0.07}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs(cm^{-2}s^{-1})}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+5.40E-14}_{-1.24E-13}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+4.32E-14}_{-1.10E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs(cm^{-2}s^{-1})}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+2.29E-14}_{-1.65E-13}$	$2.00\text{E-}12\ ^{+7.52E-14}_{-1.90E-13}$
Phase Rise				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.109\ ^{+0.008}_{-0.015}$	$0.105\ ^{+0.010}_{-0.007}$
bbodyrad	kT	keV	$0.154\ ^{+0.009}_{-0.007}$	$0.155\ ^{+0.004}_{-0.006}$
bbodyrad	norm	—	$652.0\ ^{+192.0}_{-198.0}$	$570.0\ ^{+189.9}_{-83.9}$
		km♯	$5.1\ ^{+0.7}_{-0.8}$	$4.8\ ^{+0.7}_{-0.4}$
bbodyrad	kT	keV	$0.333\ ^{+0.015}_{-0.015}$	$0.330\ ^{+0.009}_{-0.010}$
bbodyrad	norm	—	$10.7\ ^{+3.7}_{-2.7}$	$11.6\ ^{+2.7}_{-1.9}$
		km♯	$0.65\ ^{+0.11}_{-0.09}$	$0.68\ ^{+0.08}_{-0.06}$
gabs	LineE	keV	$0.718\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.719\ ^{+0.007}_{-0.007}$
gabs	Sigma	keV	$0.137\ ^{+0.008}_{-0.015}$	$0.116\ ^{+0.016}_{-0.014}$
gabs	Tau	—	$0.21\ ^{+0.03}_{-0.04}$	$0.17\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.41\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.09\ ^{+0.07}_{-0.05}$
gabs	Tau	—	$0.03\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.03\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.23\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.22\ ^{+0.04}_{-0.05}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$0.16\ ^{+0.08}_{-0.06}$
gabs	Tau	—	$0.14\ ^{+0.06}_{-0.06}$	$0.15\ ^{+0.07}_{-0.07}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.14\text{E-}12\ ^{+2.11E-14}_{-1.01E-13}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+9.40E-15}_{-1.13E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+2.31E-14}_{-1.41E-13}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+1.12E-14}_{-1.78E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Model	Parameter	unit	pn (same width)	pn (free width)
Phase Peak				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.109\ ^{+0.008}_{-0.015}$	$0.105\ ^{+0.010}_{-0.007}$
bbodyrad	kT	keV	$0.145\ ^{+0.010}_{-0.010}$	$0.147\ ^{+0.005}_{-0.007}$
bbodyrad	norm	—	$6.668\mathrm{E}{+02}\ ^{+1.919E+02}_{-2.111E+02}$	$5.983\mathrm{E}{+02}\ ^{+2.076E+02}_{-9.275E+01}$
		km♯	$5.2\ ^{+0.7}_{-0.9}$	$4.9\ ^{+0.8}_{-0.4}$
bbodyrad	kT	keV	$0.293\ ^{+0.013}_{-0.014}$	$0.292\ ^{+0.009}_{-0.009}$
bbodyrad	norm	—	$26.1\ ^{+10.3}_{-7.2}$	$26.0\ ^{+6.8}_{-5.0}$
		km♯	$1.0\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$1.0\ ^{+0.1}_{-0.1}$
gabs	LineE	keV	$0.718\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.719\ ^{+0.007}_{-0.007}$
gabs	Sigma	keV	$0.137\ ^{+0.008}_{-0.015}$	$0.126\ ^{+0.030}_{-0.022}$
gabs	Tau	—	$0.15\ ^{+0.02}_{-0.03}$	$0.13\ ^{+0.05}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.41\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.07\ ^{+0.04}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.04\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.04\ ^{+0.02}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$2.23\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.22\ ^{+0.04}_{-0.05}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$0.11\ ^{+0.09}_{-0.06}$
gabs	Tau	—	$0.12\ ^{+0.06}_{-0.06}$	$0.10\ ^{+0.06}_{-0.05}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.26\mathrm{E}{-12}\ ^{+2.16E-14}_{-1.54E-13}$	$2.26\mathrm{E}{-12}\ ^{+8.50E-15}_{-1.34E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.26\mathrm{E}{-12}\ ^{+1.27E-14}_{-2.25E-13}$	$2.26\mathrm{E}{-12}\ ^{+5.60E-15}_{-1.93E-13}$
Phase Decline				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.109\ ^{+0.008}_{-0.015}$	$0.105\ ^{+0.010}_{-0.007}$
bbodyrad	kT	keV	$0.149\ ^{+0.010}_{-0.010}$	$0.152\ ^{+0.009}_{-0.007}$
bbodyrad	norm	—	$610.9\ ^{+161.1}_{-189.3}$	$636.1\ ^{+135.0}_{-153.9}$
		km♯	$4.9\ ^{+0.6}_{-0.8}$	$5.0\ ^{+0.5}_{-0.7}$
bbodyrad	kT	keV	$0.307\ ^{+0.014}_{-0.015}$	$0.305\ ^{+0.015}_{-0.007}$
bbodyrad	norm	—	$19.8\ ^{+8.2}_{-5.5}$	$21.5\ ^{+3.9}_{-6.0}$
		km♯	$0.89\ ^{+0.17}_{-0.13}$	$0.93\ ^{+0.08}_{-0.14}$
gabs	LineE	keV	$0.718\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.719\ ^{+0.007}_{-0.007}$
gabs	Sigma	keV	$0.137\ ^{+0.008}_{-0.015}$	$0.191\ ^{+0.010}_{-0.015}$
gabs	Tau	—	$0.16\ ^{+0.03}_{-0.04}$	$0.28\ ^{+0.06}_{-0.07}$
gabs	LineE	keV	$1.42\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.41\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.15\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$2.23\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.22\ ^{+0.04}_{-0.05}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$0.21\ ^{+0.07}_{-0.08}$
gabs	Tau	—	$0.16\ ^{+0.07}_{-0.06}$	$0.20\ ^{+0.10}_{-0.08}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.16\mathrm{E}{-12}\ ^{+1.04E-14}_{-1.40E-13}$	$2.16\mathrm{E}{-12}\ ^{+2.65E-13}_{-2.57E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.15\mathrm{E}{-12}\ ^{+1.62E-14}_{-1.62E-13}$	$2.16\mathrm{E}{-12}\ ^{+2.18E-13}_{-3.56E-13}$
$\chi^2/d.o.f$			1248.78/1039(1.20)	1229.41/1030(1.19)
Null hypothesis probability			7.16E-06	1.64E-05

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Deep1st **wabs(bbodyrad*gabs*gabs*gabs+bbodyrad)**

*Shallow1st*で、低温側の黒体放射成分に吸収構造がかかっている場合では特に 1.4、2.1keV の吸収構造の深さが大きくなりすぎた。これは低温側の黒体放射の強度が 1keV 以上で高温側の黒体放射以下になってしまうためと考えられる。これを防ぐために低温側の温度を上げてみたがこれでもスペクトルを説明できなかった。

Deep1st **wabs(bbodyrad+bbodyrad*gabs*gabs*gabs)**

*Deep1st*で、高温側の黒体放射成分に吸収構造がかかっている場合ではパラメータを自由に振った場合、*Shallow1st*に落ち着いた。そこである程度パラメータを制限してフィッティングした。

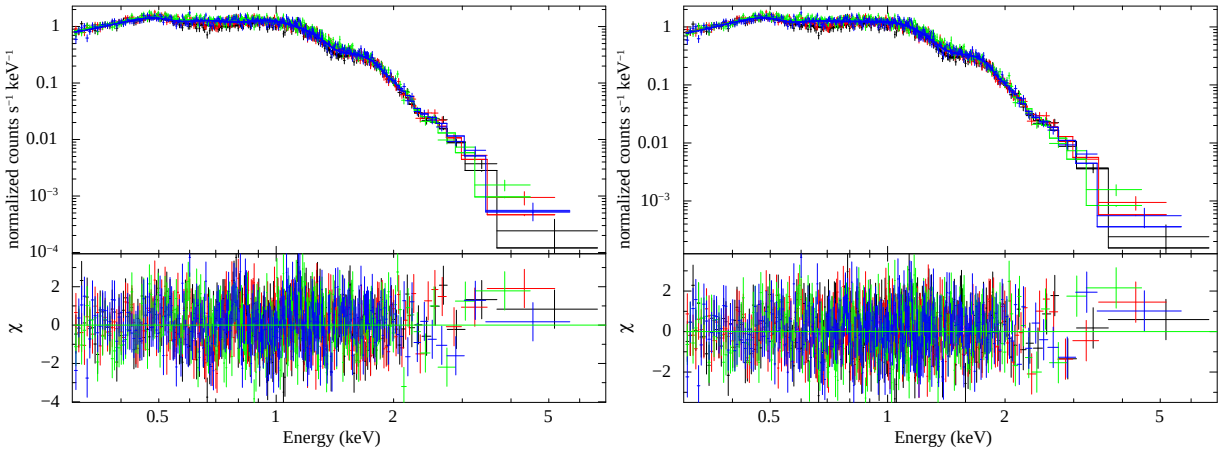

図 3.60: スペクトルとフィッティングモデル (上段)、及びその残差 (下段)。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

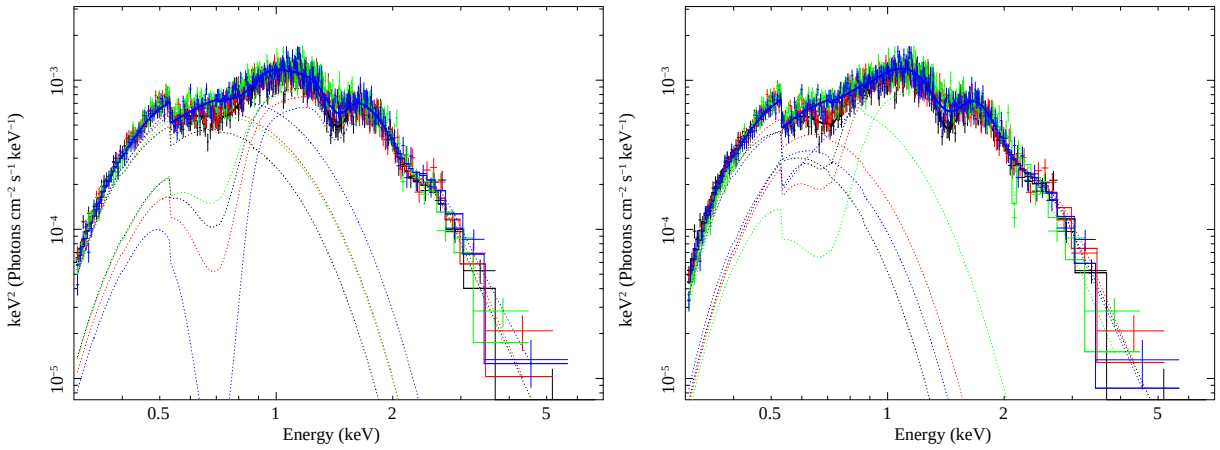

図 3.61: $\nu F\nu$ スペクトル。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

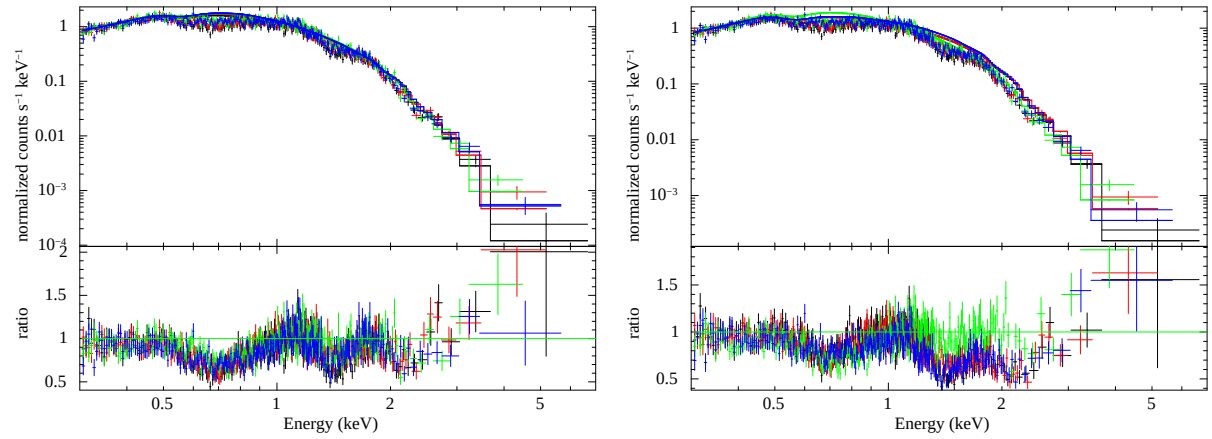

図 3.62: スペクトルとフィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたもの (上段) と、その場合の残差の比 (下段)。左:吸収線の幅を phase 間で固定。右:吸収線の幅はフリー。

表 3.17: *Deep1st* で、高温側の黒体放射成分に吸収構造がかかっている場合のフィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	pn (same width)	pn (free width)
Phase Minimum				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.079\ ^{+0.008}_{-0.005}$	$0.111\ ^{+0.004}_{-0.004}$
bbodyrad	kT	keV	$0.136\ ^{+0.002}_{-0.009}$	$0.092\ ^{+0.001}_{-0.002}$
bbodyrad	norm	—	$475.6\ ^{+20.1}_{-115.9}$	$3516\ ^{+150}_{-1499}$
		km♯	$4.36\ ^{+0.09}_{-0.57}$	$11.9\ ^{+0.2}_{-2.9}$
bbodyrad	kT	keV	$0.291\ ^{+0.004}_{-0.005}$	$0.291\ ^{+0.002}_{-0.005}$
bbodyrad	norm	—	$28.7\ ^{+0.7}_{-0.6}$	$37.4\ ^{+0.4}_{-0.5}$
		km♯	$1.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.223\ ^{+0.007}_{-0.008}$
gabs	LineE	keV	$0.702\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$0.697\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	Sigma	keV	$0.089\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.056\ ^{+0.008}_{-0.006}$
gabs	Tau	—	$0.34\ ^{+0.07}_{-0.05}$	$0.096\ ^{+0.010}_{-0.009}$
gabs	LineE	keV	$1.43\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.423\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	Sigma	keV	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.093\ ^{+0.007}_{-0.009}$
gabs	Tau	—	$0.15\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.17\ ^{+0.01}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.19\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.14\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.19\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.38\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.20\ ^{+0.06}_{-0.05}$	$0.53\ ^{+0.07}_{-0.06}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.00E-12 $^{+3.31E-12}_{2.00E-16}$	2.01E-12 $^{+9.51E-14}_{-6.96E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.00E-12 $^{+3.14E-12}_{-1.26E-14}$	2.01E-12 $^{+1.03E-13}_{-6.82E-13}$
Phase Rise				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.079\ ^{+0.008}_{-0.005}$	$0.111\ ^{+0.004}_{-0.004}$
bbodyrad	kT	keV	$0.150\ ^{+0.003}_{-0.003}$	$0.112\ ^{+0.009}_{-0.004}$
bbodyrad	norm	—	$385.4\ ^{+193.8}_{-247.0}$	$1530\ ^{+75}_{-128}$
		km♯	$3.93\ ^{+0.01}_{-0.13}$	$7.82\ ^{+0.19}_{-0.34}$
bbodyrad	kT	keV	$0.303\ ^{+0.006}_{-0.005}$	$0.297\ ^{+0.002}_{-0.004}$
bbodyrad	norm	—	$21.3\ ^{+0.7}_{-0.6}$	$33.2\ ^{+0.8}_{-0.5}$
		km♯	$0.923\ ^{+0.015}_{-0.013}$	$1.153\ ^{+0.013}_{-0.008}$
gabs	LineE	keV	$0.702\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$0.697\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	Sigma	keV	$0.089\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.074\ ^{+0.007}_{-0.014}$
gabs	Tau	—	$0.45\ ^{+0.14}_{-0.09}$	$0.17\ ^{+0.016}_{-0.18}$
gabs	LineE	keV	$1.428\ ^{+0.012}_{-0.011}$	$1.423\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	Sigma	keV	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.14\ ^{+0.02}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.07\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.13\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.19\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.14\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.19\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.36\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.18\ ^{+0.06}_{-0.06}$	$0.52\ ^{+0.11}_{-0.03}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.13E-12 $^{+4.77E-13}_{3.57E-14}$	2.13E-12 $^{+2.66E-13}_{-4.26E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.13E-12 $^{+4.53E-13}_{1.13E-14}$	2.13E-12 $^{+3.01E-13}_{-4.32E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

Model	Parameter	unit	pn (same width)	pn (free width)
Phase Peak				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.079\ ^{+0.008}_{-0.005}$	$0.111\ ^{+0.004}_{-0.004}$
bbodyrad	kT	keV	$0.151\ ^{+0.003}_{-0.002}$	$0.143\ ^{+0.002}_{-0.004}$
bbodyrad	norm	—	$352.2\ ^{+41.8}_{-48.6}$	$663.0\ ^{+583.3}_{-34.4}$
		km♯	$3.8\ ^{+0.2}_{-0.3}$	$5.2\ ^{+1.9}_{-0.1}$
bbodyrad	kT	keV	$0.291\ ^{+0.008}_{-0.006}$	$0.285\ ^{+0.003}_{-0.004}$
bbodyrad	norm	—	$27.9\ ^{+1.0}_{-0.7}$	$31.0\ ^{+0.6}_{-0.6}$
		km♯	$1.06\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$1.11\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$0.702\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$0.697\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	Sigma	keV	$0.089\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.108\ ^{+0.008}_{-0.008}$
gabs	Tau	—	$0.243\ ^{+0.007}_{-0.005}$	$0.485\ ^{+0.094}_{-0.064}$
gabs	LineE	keV	$1.428\ ^{+0.012}_{-0.011}$	$1.423\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	Sigma	keV	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.06\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.05\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$2.19\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.14\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.19\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.009\ ^{+0.037}_{-0.008}$
gabs	Tau	—	$0.12\ ^{+0.07}_{-0.05}$	$0.24\ ^{+0.56}_{-0.15}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.26\text{E-}12\ ^{+4.90E-13}_{-3.50E-15}$	$2.26\text{E-}12\ ^{+1.40E-12}_{-1.84E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.26\text{E-}12\ ^{+3.97E-13}_{-1.24E-14}$	$2.26\text{E-}12\ ^{+1.30E-12}_{-2.17E-13}$
Phase Decline				
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.079\ ^{+0.008}_{-0.005}$	$0.111\ ^{+0.004}_{-0.004}$
bbodyrad	kT	keV	$0.167\ ^{+0.004}_{-0.004}$	$0.104\ ^{+0.008}_{-0.008}$
bbodyrad	norm	—	$287.1\ ^{+43.3}_{-31.3}$	$1849\ ^{+971}_{-90}$
		km♯	$3.4\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$8.6\ ^{+2.0}_{-0.2}$
bbodyrad	kT	keV	$0.319\ ^{+0.007}_{-0.004}$	$0.282\ ^{+0.003}_{-0.004}$
bbodyrad	norm	—	$14.8\ ^{+0.5}_{-0.5}$	$48.2\ ^{+3.7}_{-1.8}$
		km♯	$0.77\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$1.39\ ^{+0.05}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$0.702\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$0.697\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	Sigma	keV	$0.089\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.165\ ^{+0.025}_{-0.016}$
gabs	Tau	—	$1.05\ ^{+0.84}_{-0.43}$	$0.17\ ^{+0.06}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	$1.428\ ^{+0.012}_{-0.011}$	$1.423\ ^{+0.005}_{-0.005}$
gabs	Sigma	keV	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.14\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.13\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.22\ ^{+0.04}_{-0.10}$
gabs	LineE	keV	$2.19\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.14\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.19\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.30\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.16\ ^{+0.07}_{-0.05}$	$0.42\ ^{+0.05}_{-0.04}$
Flux@0.3-10.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+3.10E-14}_{-1.40E-13}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+2.10E-13}_{-3.52E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+2.93E-14}_{-1.36E-13}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+1.63E-13}_{-3.27E-13}$
$\chi^2/d.o.f$			1298.81/1039(1.25)	1211.33/1030(1.18)
Null hypothesis probability			5.86E-08	7.33E-05

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

3.7.1 Phase 分割スペクトル解析まとめ

それぞれのフィッティング結果の $\chi^2/d.o.f$ と Null hypothesis probability をまとめると表 3.18 の様になった。

表 3.18: 様々な条件における Phase 分割スペクトルのフィッティング結果

Model Type	Width Type	$\chi^2/d.o.f$	Probability
Shallow1st wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs*gabs	Same	1231.2/1039(1.19)	3.2E-05
	Free	1213.3/1030(1.18)	6.3E-05
Shallow1st wabs(bbodyrad*gabs*gabs*gabs+bbodyrad)	Same	—	—
	Free	—	—
Shallow1st wabs(bbodyrad+bbodyrad*gabs*gabs*gabs)	Same	1232.3/1039(1.19)	2.9E-05
	Free	1209.9/1030(1.17)	8.2E-05
Deep1st wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs*gabs	Same	1248.8/1039(1.20)	7.2E-06
	Free	1229.4/1030(1.19)	1.6E-05
Deep1st wabs(bbodyrad*gabs*gabs*gabs+bbodyrad)	Same	—	—
	Free	—	—
Deep1st wabs(bbodyrad+bbodyrad*gabs*gabs*gabs)	Same	1298.8/1039(1.25)	5.9E-08
	Free	1211.3/1030(1.18)	7.3E-05

低温側のみに吸収構造が存在するモデルは合わない。そして、*Shallow1st* の高温側のみに吸収構造が乗ったモデルが最も合う。これは予測通りの結果となった。また、全体的に *Deep1st* より *Shallow1st* の方が良くスペクトルを説明できていた。特に *Deep1st* の高温側のみに吸収構造のモデルについては Minimum,Rise,Decline が *Shallow1st* のパラメータになってしまったが Peak が *Deep1st* のままになった。

これらのうち、本論文で新たに見つけ出した *Shallow1st* で高温側黒体放射のみが吸収を受けるモデルについて各フェイズにおける吸収構造の形を図 3.63 に示す。

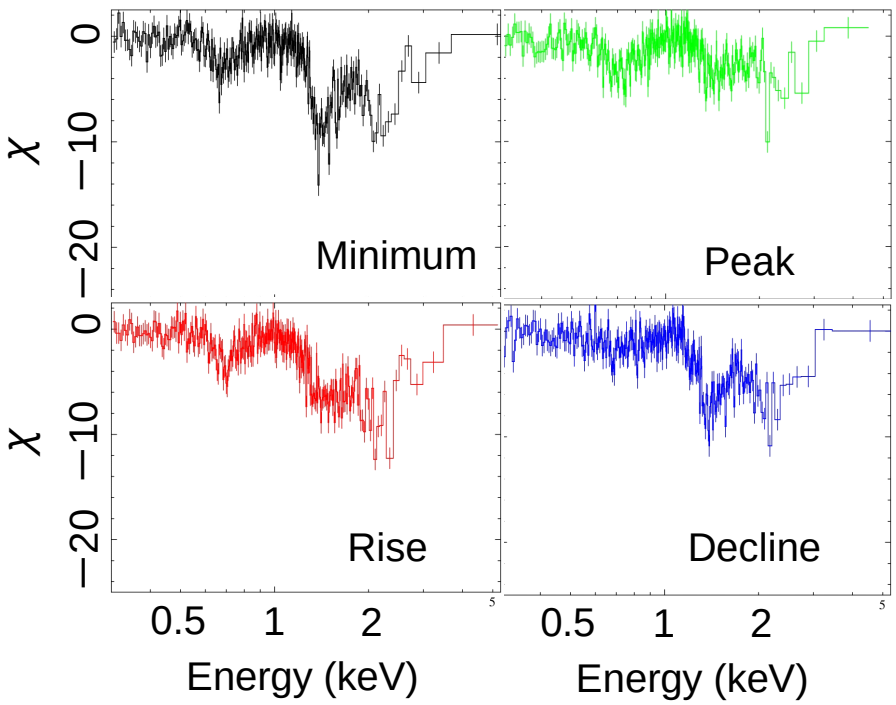

図 3.63: *Shallow1st* で高温側黒体放射のみが吸収を受けるモデルについて各フェイズにおける吸収構造の形

0.7keV と 1.4keV の吸収構造の深さ (Tau) が Phase と共に変動していた。0.7keV の吸収構造に関しては *Shallow1st* の方が変動率が大きく、Minimum や Deckine ではかなり小さくなっている。

また、*Shallow1st* で高温側黒体放射のみが吸収を受けるモデルと先行研究で採用されている *Deep1st* で両方の黒体放射が吸収を受けるモデルについて各位相におけるのベストフィットパラメータをグラフにしたのが以下の図 3.64、3.65 である。横軸が位相を示しており、2 周期分繋げて描いてある。

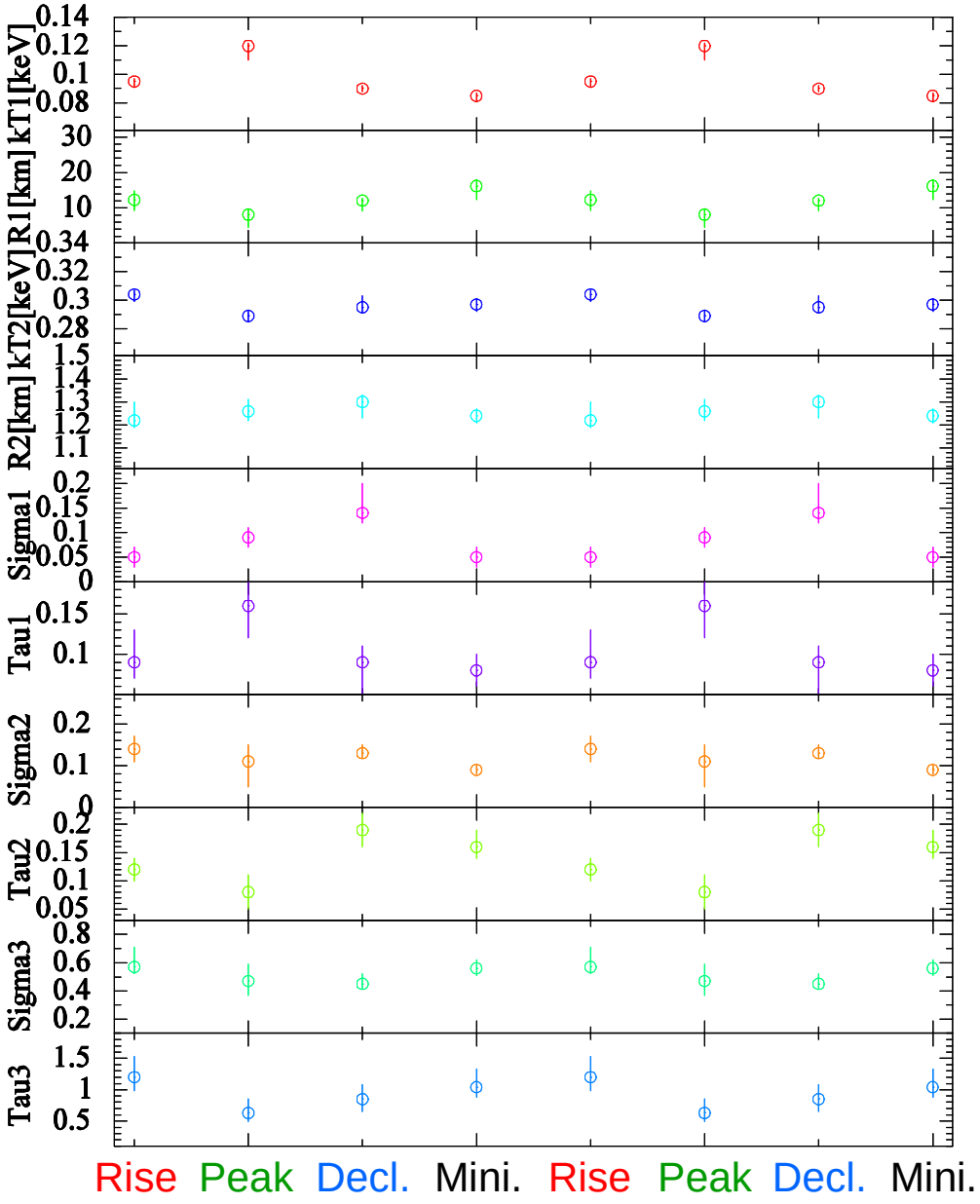

図 3.64: *Shallow1st* で高温側黒体放射のみが吸収を受けるモデルについて各位相におけるベストフィットパラメータ。誤差は 90%エラー。

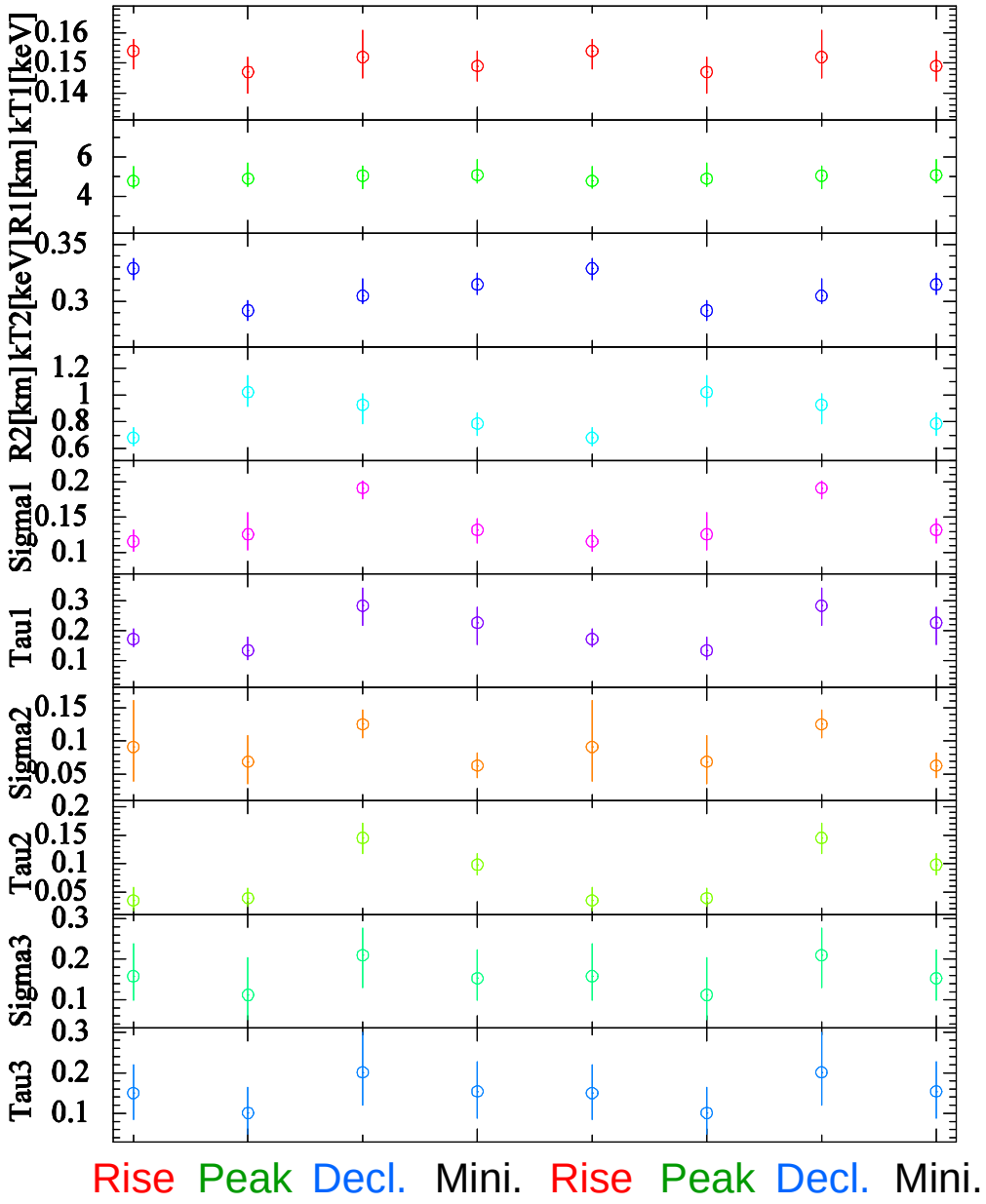

図 3.65: *Deep1st* で両方の黒体放射が吸収を受けるモデルについて各位相におけるベストフィットパラメータ。誤差は 90%エラー。

ここで注目したのは 0.7keV と 1.4keV の吸収構造の深さの変化の仕方である。*Deep1st* の場合は 2 本の吸収線で同じ位相で変動しているだけで、その変化も畳み込みライトカーブの変動とは同期していない様に見える。しかし、*Shallow1st* の場合、2 本の吸収構造は反相関している。また、その変化も *Deep1st* に比べ畳み込みライトカーブの変動と同期している様に見える。

第4章　議論

本章では第 2 章、第 3 章で得られた解析結果を元に本論文の解釈の妥当性の検証を行うと共に、それを使用して 1E1207.4−5209 の描像を推察する。

4.1　解析結果のまとめ

まず、すざく衛星と XMM-Newton 衛星の解析結果によって判明した結果を以下にまとめる。

- すざく衛星の時間平均スペクトルの解析の結果、吸収構造の原因は電子によるサイクロトロン共鳴散乱によるものであり、陽子によるものはないと結論した (セクション 2.6.3、39 ページ)。ただし、すざく衛星の結果は先行研究とは異なり相対的に基本波 (1 本目) が浅い (*Shallow1st*) と解釈される (セクション 2.6.3、55 ページ)。

- すざく衛星データのタイミング解析の結果、複数の解析手法でパルス周期を確認しその周期 P と周期変化率 $\dot{P}$ が先行研究と有意に変化していない事を確認した (セクション 2.8.6)。

- すざく衛星硬 X 線検出器 (HXD) では、10keV 以上の有意な放射は検出できなかった (セクション 2.9)。

- *Shallow1st* パラメータの検証を行うためにすざく衛星より低エネルギー側の感度が高い XMM-NNewton 衛星の時間平均スペクトルを解析した結果、*Shallow1st* パラメータの方がスペクトルを良く説明できた (セクション 3.6.5)。そして、吸収構造が高温側黒体放射のみに存在すると解釈できる事を示した (セクション 3.6.7)。

- XMM-Newton 衛星の周期の位相毎にまとめたスペクトルを解析した。その結果、*Shallow1st* で吸収構造が高温側黒体放射のみに存在するモデルが最も良くスペクトルを説明できる事を確認した (セクション 3.7.1、152 ページ)。

- *Shallow1st* で高温側黒体放射に吸収構造が存在するモデルの場合、ベストフィットパラメータの位相ごとの変動を確認したところ 2 本の吸収構造は反相関しており、かつ、その変化は畳み込んだライトカーブの変動と同期していた (セクション 3.7.1、155 ページ)。

4.2 *Shallow1st* パラメータの妥当性

ここでは本論文で述べた *Shallow1st* パラメータの妥当性について議論する。

4.2.1 吸収構造の有意性

まず、第一にスペクトル構造の統計的有意性を統計的検定 (Ftest 等) でなく、より一般性のあるシミュレーションに基づく方法 (Sako et al. 2005) を応用し、検証する事にする。スペクトルの連続成分を 1 万回シミュレートし、それによって作成されたスペクトルの各エネルギーチャンネルごとの値の分布から Significance level を決定し、それと吸収構造を含んだモデルのカウントと比べることで吸収構造がどれくらいの有意性を持つか調べるというものである。吸収構造のカウントがより低い Significance level を下回るほど有意性が高い事を表している。

この方法で重要な点はスペクトル解析に用いる検出器応答関数を使用するということである。これにより応答関数の「系統誤差」等による artificial(人為的) な原因に起因するスペクトル構造についても有意性の評価に含めることができる点である。Ftest も同じだが、この方法でも各スペクトル bin は独立なランダム変量として扱われる。数 bin にわたる構造の場合はこれらの test は必要以上に強い test となる。

今回使用したデータは 2006 年の XIS0/2/3 と XIS1、そして 2007 年の XIS1 で、それぞれ連続成分のベストフィットパラメータを使用した。結果は以下の図 4.1、4.2 の様になった。

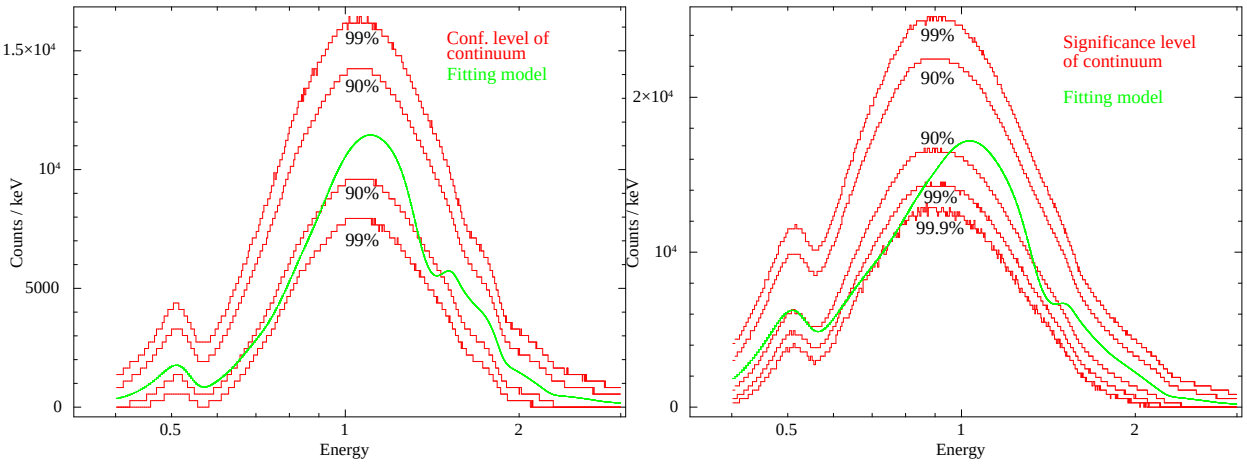

図 4.1: 2006 年スペクトルの吸収構造の有意性調査結果。赤いデータがシミュレーションで求まった Significance level limit、緑のデータがベストフィットモデル。左:XIS023。右:XIS1。

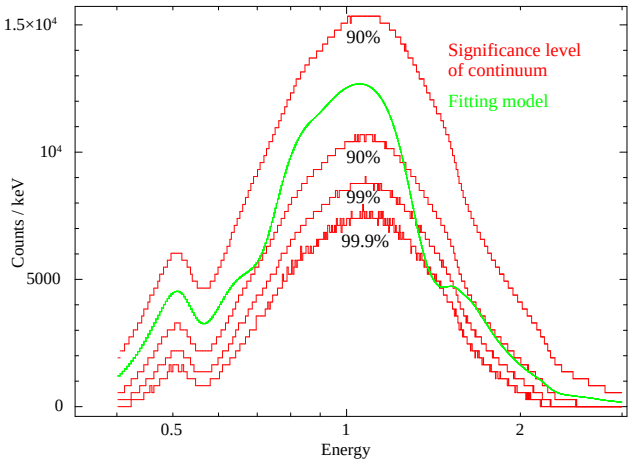

図 4.2: 2007 年スペクトルの吸収構造の有意性調査結果。赤いデータがシミュレーションで求まった Significance level limit、緑のデータがベストフィットモデル。

各吸収構造についての有意性をまとめると以下の表 4.1 の様になった。

表 4.1: 各吸収構造についての有意性。%横のカッコ内はガウス分布 (right tail) において何 σ に対応するか示したもの。

Data	0.7 keV	1.4 keV	2.1 keV
2006 年 XIS023	$> 90\%(> 1.28\sigma)$	$> 90\%(> 1.28\sigma)$	$< 90\%(< 1.28\sigma)$
2006 年 XIS1	$> 99.9\%(> 3.09\sigma)$	$> 90\%(> 1.28\sigma)$	$< 90\%(< 1.28\sigma)$
2007 年 XIS1	$\sim 90\%(> 1.28\sigma)$	$> 99.9\%(> 3.09\sigma)$	$\sim 90\%(> 1.28\sigma)$

またこの他にも、シミュレートにより作成した連続成分スペクトルを吸収線を含むモデルでフィッティングすることで連続成分の不定性によって偶然同様の吸収構造が生まれる事があるか調べた。フィッティングに使用したデータ範囲は 0.4 keV~3.0keV。吸収構造のパラメータには以下の様な制限を設けた。

- まず、3 本の吸収構造の中心エネルギーの比率を制限した。但し、吸収構造の各パラメータの誤差を考慮し、比率に幅を持たせた。　例えば、2006 年 XIS0123 については比率を 1:1.88~2.29:2.88~3.75 となるように制限した。
- 吸収構造の幅と深さは元のフィッティングパラメータ誤差 (90%エラー) の 1.5 倍の範囲に制限した。
- 基本波である 0.7 keV の吸収構造の中心エネルギーについて 3 本目 (2.1 keV) がフィッティング範囲外に行かないように下限値、上限値を設けた。

この制限のもと、シミュレートした 1 万通りのスペクトルをフィッティングした結果を表 4.2 に示す。

表 4.2: 連続成分のみのシミュレートしたスペクトルを吸収構造のあるモデルでフィッティングした時、その Reduced χ^2 が元のデータをフィッティングした時の Reduced χ^2 以下になったものの割合。

Data	元データの χ^2/d.o.f(Reduced χ^2)	Reduced χ^2 が左以下になった割合 (%)
2006 年 XIS0123	487.51/417(1.17)	0/10000(–%)
2007 年 XIS1	173.16/206(0.84)	16/10000(0.16%)

2006 年 XIS0123 では 1 万通り行っても Reduced χ^2 が下回るものは無かったが、2007 年 XIS1 は統計も悪かった事もあり、0.16%程が下回った。

次に XMM-Newton、pn の時間平均スペクトルで同様の調査を行った結果を以下にまとめる。まずシミュレートによる有意性の調査の結果は図 4.3 の様になった。

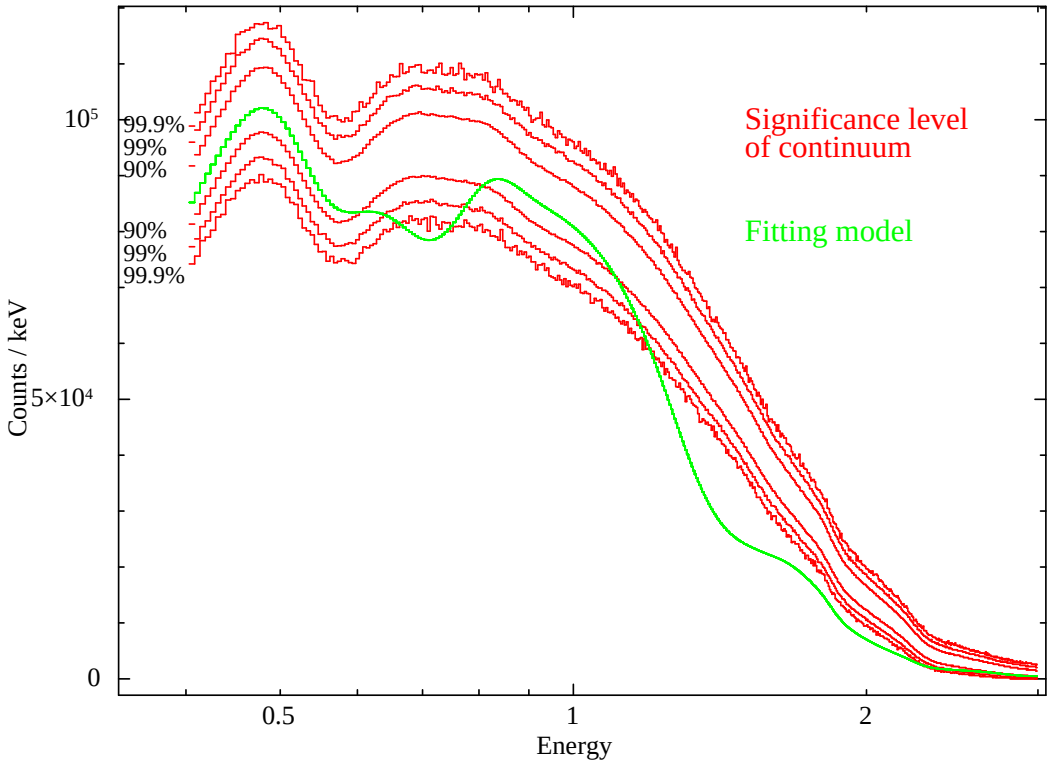

図 4.3: 吸収構造の有意性調査結果。赤いデータがシミュレーションで求まった Significance level limit、緑のデータがベストフィットモデル。

0.7、1.4、2.1keV については 99.9% limit(ガウス分布における 3.1σ) を越えているが、2.8keV の吸収構造は 90% limit を越える程度となった。すざくの場合と同様に、シミュレートにより作成した連続成分スペクトルを吸収線を含むモデルでフィッティングすることで連続成分の不定性によって偶然同様の吸収構造が生まれる事があるか調べた。フィッティングに使用したデータ範囲は 0.3 keV~4.0keV。吸収構造のパラメータには以下の様な制限を設けた。

- まず、4 本の吸収構造の中心エネルギーの比率を制限した。但し、吸収構造の各パラメータの誤差を考慮し、比率に幅を持たせた。　例えば、今回は比率を 1:1.95~2.06:3.02~3.21:3.97~4.34 となるように制限した。
- 吸収構造の幅と深さは元のフィッティングパラメータ誤差 (90%エラー) の 1.5 倍の範囲に制

限した。

- 基本波である 0.7 keV の吸収構造の中心エネルギーについて 4 本目 (2.8 keV) がフィッティング範囲外に行かないように下限値、上限値を設けた。

この制限のもと、連続成分のみのモデルからシミュレートした 1 万通りのスペクトルを吸収構造のあるモデルでフィッティングした。元のデータをフィッティングした時の Reduced χ^2 等は 418.66/367(1.14)。フィッティングの結果、全ての場合についてこの値を下回ることは無かった。

4.2.2 数値計算に基づく観測データの解釈

Shallow1st における吸収構造の理論的な解釈のためサイクロトロン共鳴散乱によるスペクトルの吸収構造について、西村氏の計算した強磁場中の輻射輸送の数値計算 (Nishimura 2012) に基づいて議論する。その中で、磁極方向と視線方向のなす角を θ とした時、様々な θ における吸収構造形状の計算結果を以下の図 4.4 に示す。

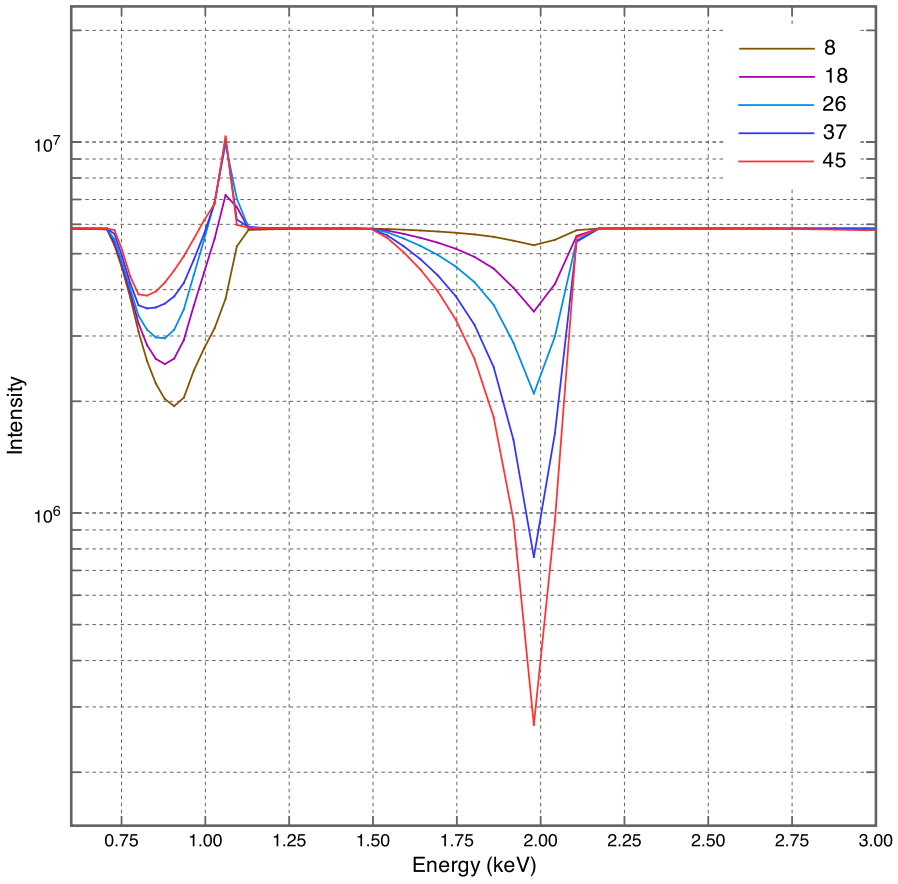

図 4.4: 様々な θ における吸収構造の理論計算結果。連続成分は一定として計算している。

図 4.4 を見ると θ が小さいときは基本波の深さが高調波より浅い *Deep1st* の形をしているが、θ が大きくなるにつれて基本波が高調波より浅くなる *Shallow1st* の構造を示していることが判る。

4.3 タイミング解析からの推察

Shallow1st の解釈が正しいと仮定すると、高温成分の寄与が高い 0.7-4.0keV では大きなピークを得られたことから、少なくとも高温側の黒体放射成分は周期的な放射をしていると考えられる。もし、低温側の黒体放射成分でも同様な周期的な放射が有り、2 つの黒体放射成分で位相が反転、またはずれている場合、低温側ではタイミング解析をしてもピークがなくなる可能性がある。もしくは低温側の黒体放射成分では周期的な放射が無くても、その放射強度が高温側の黒体放射に比べ強ければ、高温側の周期的な放射を鈍してしまい、低温側ではタイミング解析をしてもピークがなくなる可能性がある。実際に *Deep1st* の低温側 (0.4-0.9)keV で Ztest を行った時は、統計的には 0.7-4.0keV と同等以上のはずであるが、0.424130 付近にまったくピークがなかった。また、畳み込みライトカーブでも大きな変動は見られなかった。また、luca et al. 2004 のエネルギー分けした畳み込みライトカーブを見ると、0.2-0.5keV ではその振幅は小さく、0.52keV 以上から振幅が大きくなっている。*Shallow1st* の場合、0.4-0.5keV は特に低温側の放射が強い部分なので、0.4-0.9keV エネルギー領域のすざくデータでピークが検出できず、0.52keV 以上の XMM-Newton データでは検出できたのではないかと考える。スペクトルモデルを見ても *Shallow1st* では 0.5keV 以下の黒体放射成分の放射強度が低温側と高温側で同程度になっている。

この様に *Shallow1st* を仮定した上で、2 つの黒体放射成分が周期的放射を持ちその位相が反転している、または高温側だけに周期的放射を持もつが低温側の放射強度が強いと考えると解析結果に矛盾がなくなる。*Deep1st* が正しいと仮定するとすざく衛星や XMM-Newton 衛星のタイミング解析の結果をうまく説明できない。これは、より低温側を見ることではっきりするはずである。*Shallow1st* であれば 0.3keV 以下では低エネルギー側の方が放射が卓越しているはずである。

4.4 1E1207.4−5209 の描像

ここではこれまでに分かった解析結果と本論文の解釈を基に 1E1207.4−5209 の描像を考察する。

4.4.1 時間平均スペクトルから考えられる描像

すざく、XMM-Newton の時間平均スペクトル共に *Shallow1st* で良く説明でき、吸収構造が高温側のみに存在する方が妥当であることから、1E1207.4−5209 の描像は図 4.5 の様に考えられる。

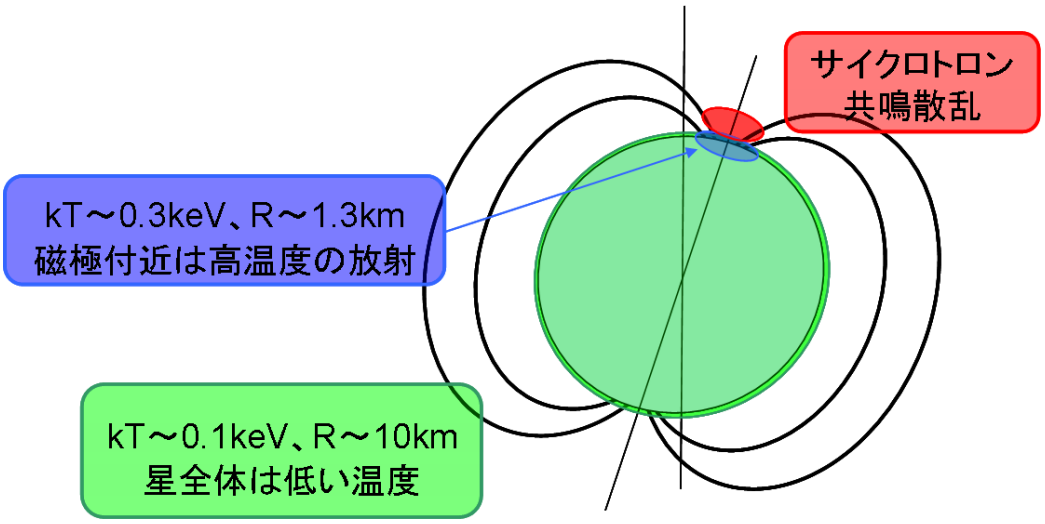

図 4.5: 時間平均スペクトルの解析結果から推察した 1E1207 の描像。

低温側の黒体放射の温度が 0.1keV で、半径が 10km 程度である事から、中性子星全体が低い温度で輝いており、高温側の黒体放射の温度が 0.3keV で、半径が 1.2km 程度である事から、磁極付近が高温度の放射を出している。そして高温側の黒体放射のみがサイクロトロン共鳴散乱受けスペクトルが変動しているという描像である。

まず低温側の黒体放射成分について、半径が 10km 程度であることは、中性子星の典型的なサイズである事から説明可能である。また、その温度 0.1keV は中性子星の標準冷却で説明可能である。以下の図 4.6 は数値計算による中性子星の冷却モデルで、中性子星の年齢ごとの表面温度の変化を示している。中性子星が生まれた時に持っていた熱が時間と共に表面からの放射や、中心部からのニュートリノ放射によって冷却していく過程を示している。

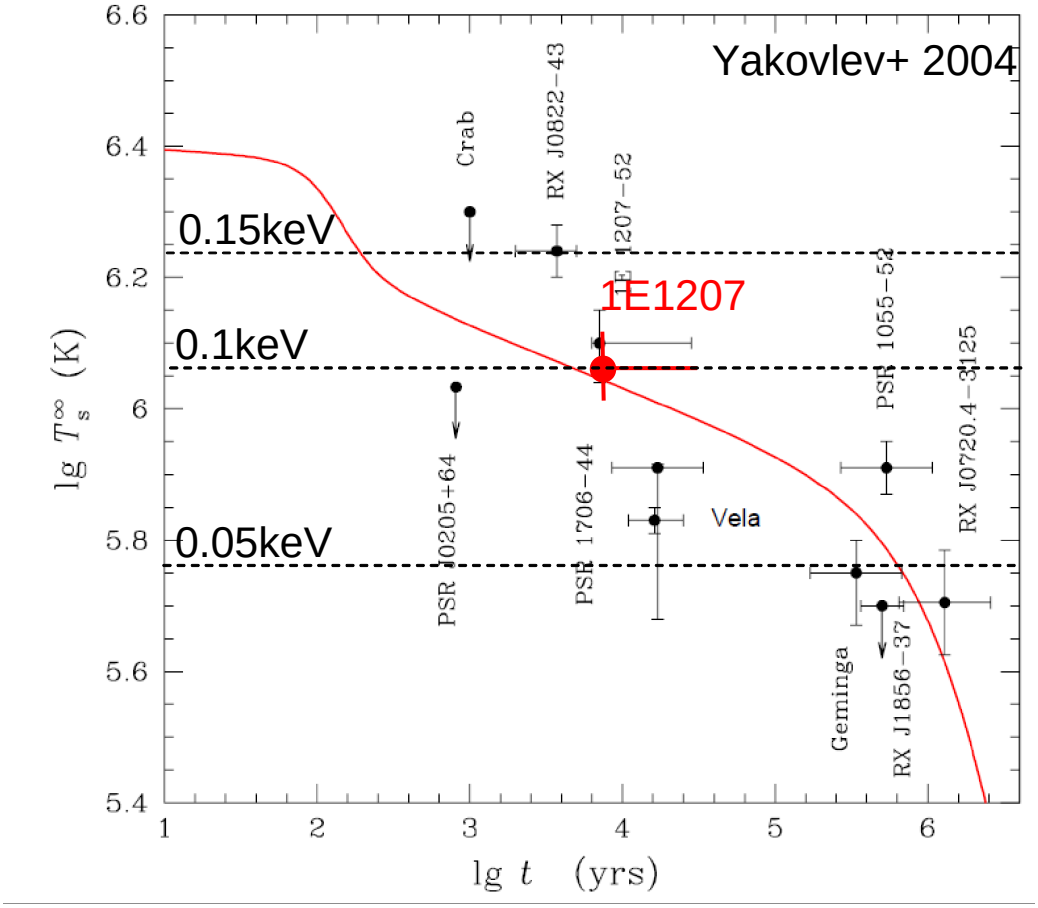

図 4.6: 数値計算による中性子星の標準冷却モデル。横軸が年齢の対数、縦軸が表面温度の対数を示しており、各温度の指標を点線で示した。

高温側の黒体放射成分については、後の Section で議論する。

ここで次の事を注意する。*Deep1st* の場合、低温側の黒体放射は kT~0.16keV で放射半径は数 km となり、これは中性子星全体というよりは、表面の一部から放射が出ている様に解釈すべきであろう。また、0.16keV では標準冷却モデルに比べてかなり高温である。星全体が輝く *Shallow1st* の方がより自然である。また、タイミング解析における Folded ライトカーブが 0.5keV 以下の低いエネルギーバンドで変動を確認出来なかった事もこの描像を支持する。星全体で低い温度 (0.1keV) で輝き、極付近は高い温度の放射 (0.3keV) を出している中性子星が自転することにより高い温度の放射が周期的に見える。0.5keV 以下の低いエネルギーバンドでは星全体の放射に鈍されて周期的には見えないと考えられる。そうなると吸収構造がサイクロトロン共鳴であれば、電子密度の高い極付近で起こっているはずなので、吸収構造が周期の中で強まったり弱まったりするはずである。

4.4.2 Phase 分割スペクトルから考えられる描像

次に XMM-Newton の Phase 分割スペクトルの解析結果から考えられる描像について議論する。

吸収構造の理論計算を利用した θ の見積り

セクション 4.2.2 の数値計算の結果を受けて、図 4.4 の各 θ における吸収構造の深さを測定し、それを実際のスペクトルパラメータから計算した吸収構造の深さと照らし合わせることで各位相を代表する θ を求めた。*Shallow1st* 解釈に基づき、高温側黒体放射成分のみがサイクロトロン共鳴散乱を受けるモデル及び、対照のために先行研究の報告している *Deep1st* パラメータ (かつ高・低温黒体放射成分両方がサイクロトロン共鳴散乱を受けている) の解釈についても考察した。図 4.4 から計測した吸収構造の深さを使用して求めた各 θ における深さの比 (2 本目の深さ/1 本目深さ) を表 4.3 に示す。

表 4.3: 計測した吸収構造の深さから求めた各 θ における深さの比。2 本目 (1.4keV) の深さを 1 本目 (0.7keV) の深さで割っている。深さは一番深いところからベースラインまでの長さとした。

θ[度]	Depth ratio
8	0.19
18	0.72
26	1.28
37	2.10
45	2.77

これらをグラフにしたのが図 4.7 である。

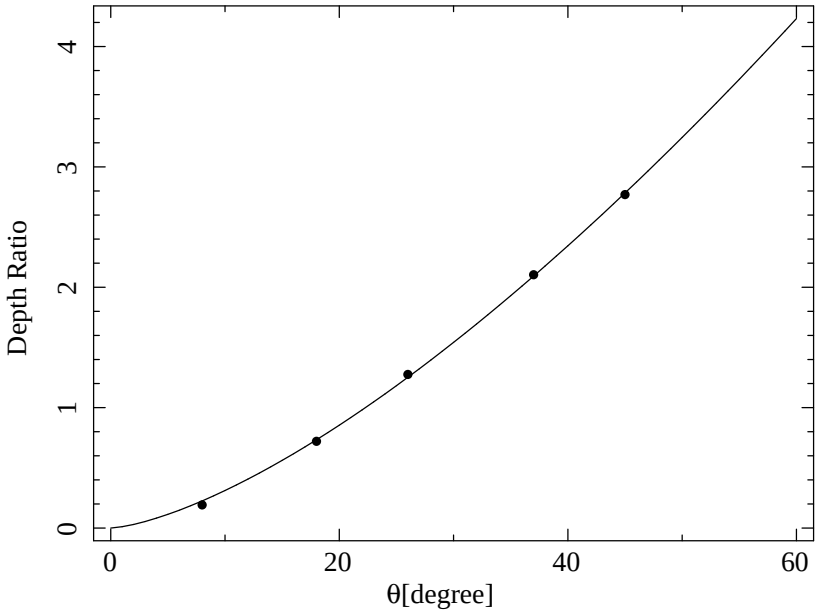

図 4.7: 計測した吸収構造の深さ

それぞれべき乗モデルでフィッティングが可能で、θ と深さの比の間には以下の関係が成り立つ。
Depth ratio$= 1.09 \times 10^{-2} \times \theta^{1.46}$

次に実データのフィッティングによって決定したパラメータから各位相の深さの比を計算した。吸収構造のフィッティングに使用した gabs モデルの深さは $\tau/\sqrt{2\pi}\sigma$ で定義されている。図 4.8 には *Shallow1st* で高温側黒体放射のみが吸収を受けるモデルについて各フェイズごとの 0.7keV と 1.4keV の吸収構造の τ と σ、深さの比、そして上記の関係式から求めた θ を示した。これに対して図 4.9 には *Deep1st* で両方の黒体放射が吸収を受けるモデルの場合における同様のパラメータを示した。

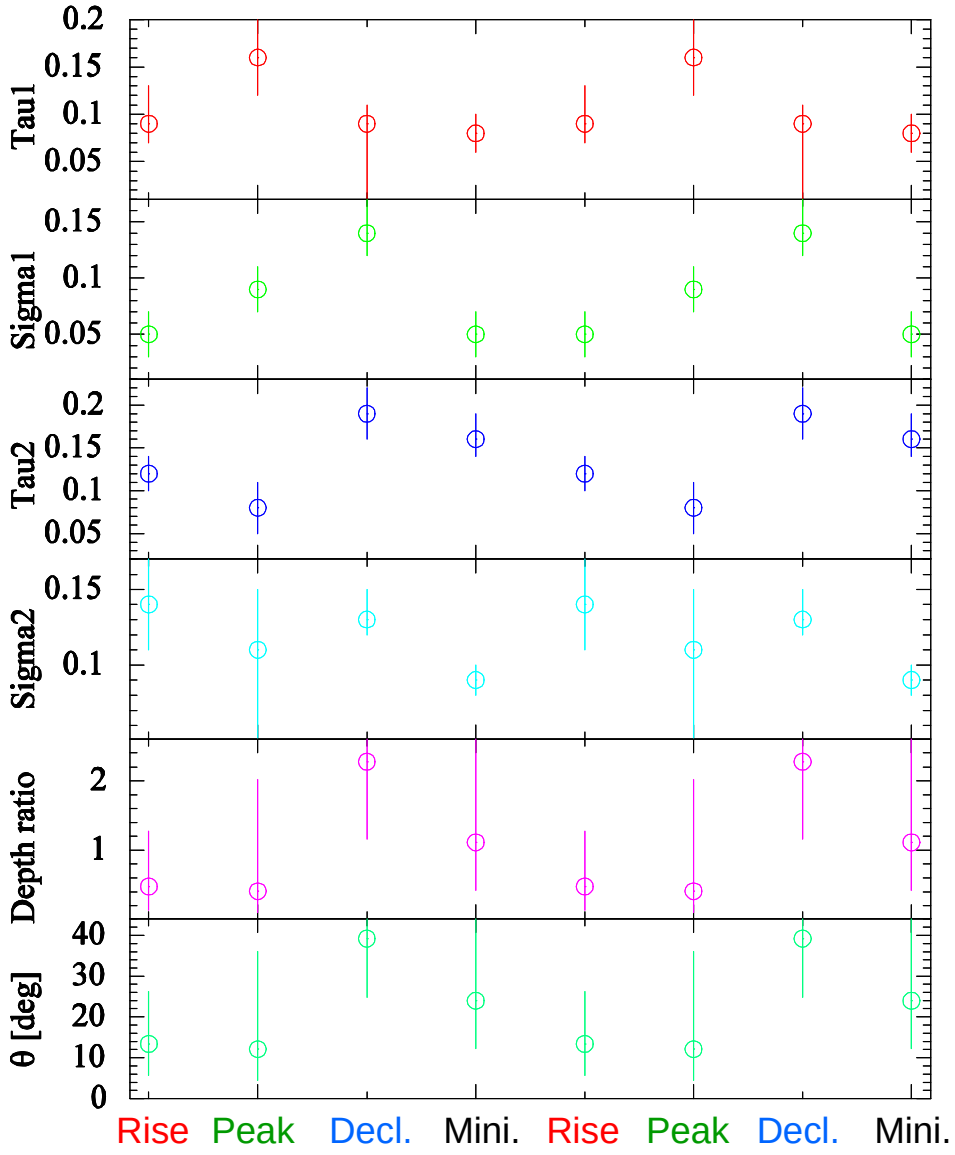

図 4.8: *Shallow1st* で高温側黒体放射のみが吸収を受けるモデルにおける位相ごとの吸収構造の深さの比と θ の関係。横軸は位相 (2 周期分)。

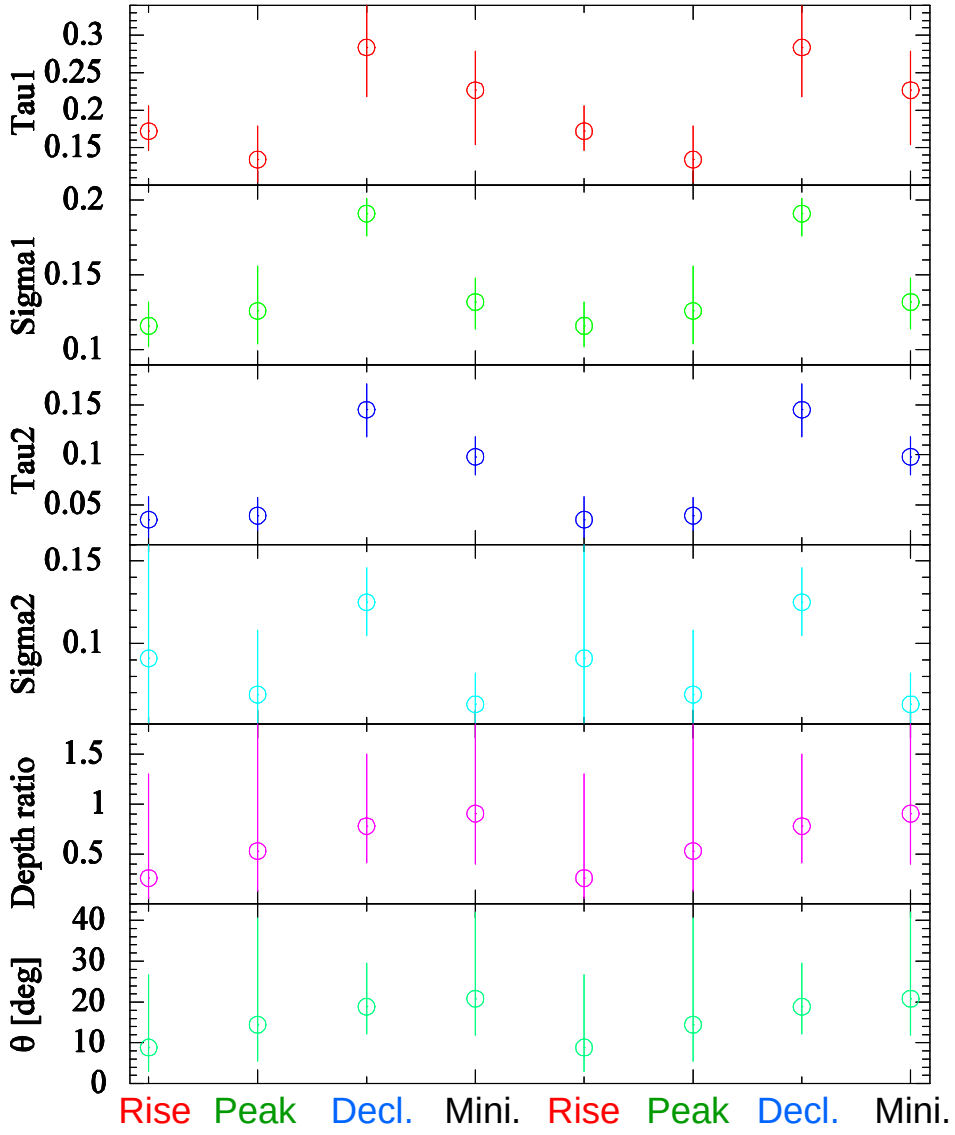

図 4.9: *Deep1st* で両方の黒体放射が吸収を受けるモデルにおける位相ごとの吸収構造の深さの比と θ の関係。横軸は位相 (2 周期分)。

これらの図を見てみると *Shallow1st* の場合は θ が位相ごとに変化しており、畳み込みライトカーブの変動と反相関したものになっている。しかし、*Deep1st* の場合では θ はほぼ一定の様で FoldedLC と相関が見られない。

これらの結果から本論文では自転により θ が変化することで吸収構造が変化するという仮説を立てた。この仮説が正しければ θ から自転軸と磁極がなす角 α と自転軸と視線方向のなす角 β が計算できる。図 4.10 はその方法を図示している。

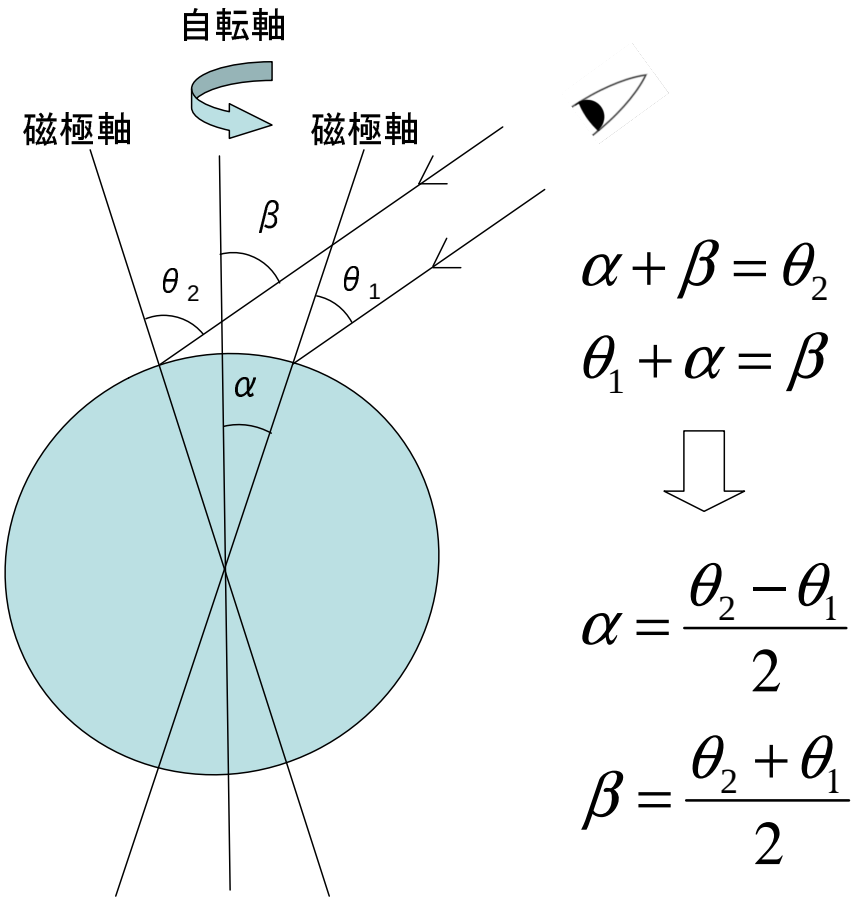

図 4.10: 中性子星における自転軸と磁極軸なす角と自転軸と視野方向のなす角の計算方法

視線方向と磁極のなす角度 θ の最小値 θ_1、最大値 θ_2 から $\alpha = (\theta_2 - \theta_1)/2$、$\beta = (\theta_2 + \theta_1)/2$ となる。視線方向の角度は天体が十分遠方であることから磁極軸が観測者方向に向いている時とその逆を向いている時で変わらないと近似できる。大まかに見積もったところ、θ の最大値 (Minimum) が 34 度、最小値 (Peak) が 12 度として自転軸と磁極がなす角 α が 11 度、自転軸と視線方向のなす角 β が 23 度となった。HMXB では α <30 度という観測結果があるが、同様の幾何学的関係なのかもしれない。

Deep1st の場合についても α、β を計算してみると、θ が位相でほぼ変わらないため、α は小さくなる (数度以下)。β は 15 度程度となる。自転軸と磁極がなす角度がほとんど無いというのは考えにくく、畳み込みライトカーブの変動が説明つかないため、*Deep1st* より *Shallow1st* の方がより合理的である。

4.4.3　1E1207.4−5209 の最終的な描像

前サブセクションの結果を受けて、1E1207.4−5209 の最終的な描像を示す。θ の変化から求めた自転軸と地場方向がなす角 α と自転軸と視線方向のなす角 β の値を考慮して描像は図 4.11、4.12 の様になった。

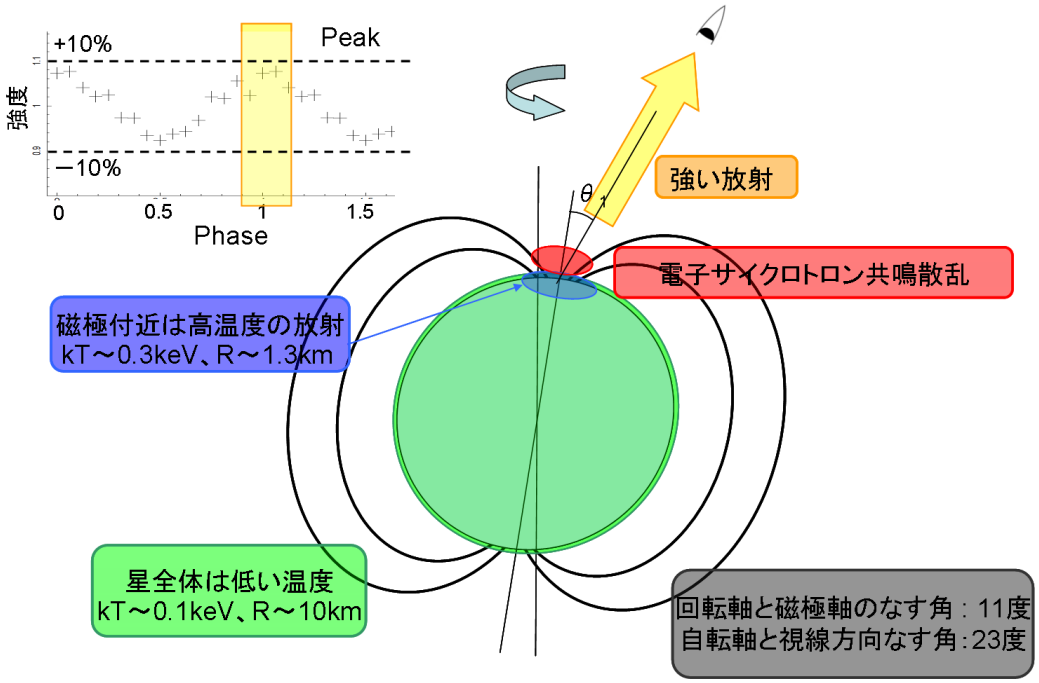

図 4.11: 1E1207 の最終的な描像。θ が最小の場合。

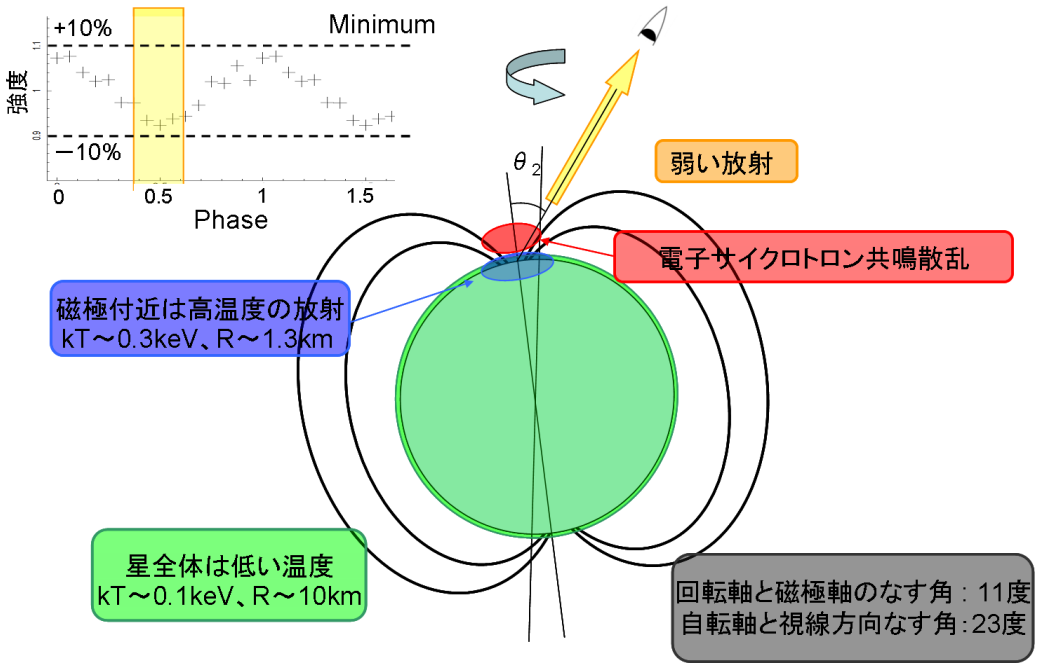

図 4.12: 1E1207 の最終的な描像。θ 最大の場合。

θが最小の時、位相は Peak となりその放射は最も大きくなる。そして自転により磁極軸が回転し θが最大になった時は位相は Minimum となり、放射は小さくなる。

では、描像を考えた場合、何が放射強度の変動を作り出しているのか? それはやはり、磁極にあると考える高温側の黒体放射の見える角度が変わる事によるものと考えることが自然である。磁極付近の狭い領域に高温度の黒体放射成分があると考えると、自転により θが変われればその放射強度は cosθ に従って変わるはずである。そこで、この仮定が正しいか確かめるために今回の描像を元に Phase 分割スペクトルのパラメータを一部固定してフィッティングをやり直した。具体的には星間吸収の値、低温側の温度、吸収構造の中心エネルギーを全ての Phase で同じ値になる様にし、吸収構造の深さの比は前回の場合の値で固定している。その結果、他のパラメータは図 4.13 の様になった。

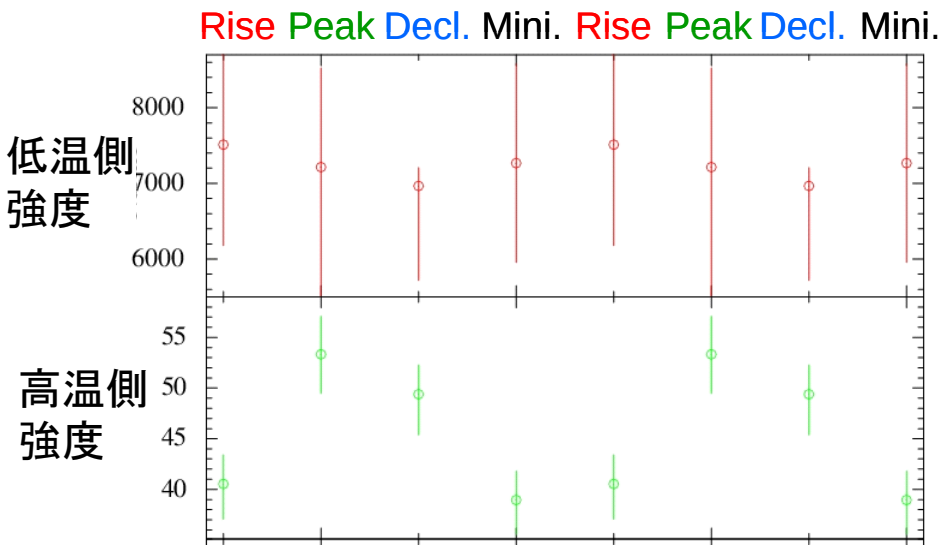

図 4.13: 最終的な描像の仮定を元に Phase 分割スペクトルのパラメータを一部固定してフィッティングした時のパラメータの変化。

特に注目するべきは高温側の黒体放射の normalization つまり強度で、位相が変わるごとに変化し、Peak で最小、Minimum で最大となり、描像から考えられる強度変動と一致している。また、フィッティングによって決まったモデルフラックスの変動のうち、各黒体放射成分の寄与を求めると、図 4.14 の様になった。

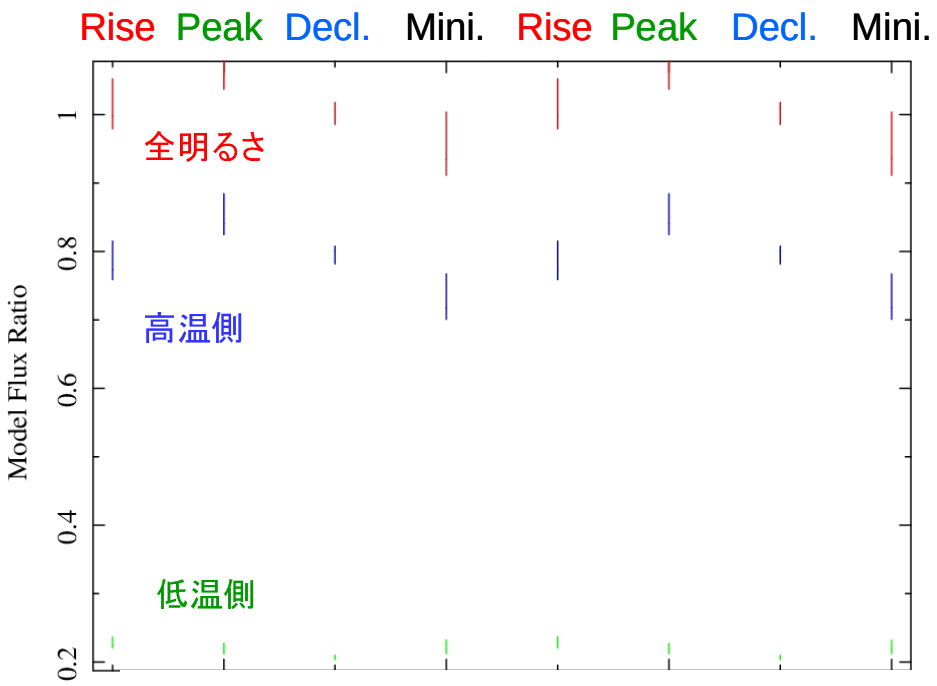

図 4.14: 最終的な描像の仮定を元に Phase 分割スペクトルのパラメータを一部固定してフィッティングした時のモデルフラックスの変化。

低温側の黒体放射成分は Phase が変わっても変動は無いが、高温側の黒体放射成分は位相が変わるごとに変動し、全光度変動の第一要因となっていると考えられる。つまり高温側黒体放射が主としてこの天体の光度変動を作り出していると言える。

高温側黒体放射の源

では最後に、この高温側黒体放射の源は何なのか。まず最初に考えられるのが、中性子星の回転エネルギーである。磁場を持つ中性子星が回転する事により磁場双極子放射が放射される。これで観測される X 線光度をまかなえないだろうか? 周期 P と周期変化率 $\dot{P}$ から磁場双極子放射の強度を見積もることができる。その光度 L には $L < 4.7 \times 10^{32} \mathrm{erg\,s^{-1}}$ という上限値が付く。しかし、観測された X 線光度は高温成分のみでも $L \sim 9.4 \times 10^{33} (d/2\mathrm{kpc})$ $\mathrm{erg\,s^{-1}}$(距離 d で規格化) となり足りない。つまり回転エネルギーだけでは X 線光度を説明できない。

次に考えられるのが質量降着によって解放される重力エネルギーである。中性子星の周りに何かしらの質量がある場合、それが中性子星の磁力線に沿って磁極に落ち込むと重力エネルギーが開放され、磁極付近を加熱する。質量が落ち込む割合、降着率 $\dot{m}$ は最近の研究で議論されており、$\dot{m}$ が $\dot{m} = 10^{13} \mathrm{g\,s^{-1}}$ であれば X 線光度を説明可能であるが (Halpern & Gotthelf 2011)、可視光と赤外線によるフォールバック円盤の観測の上限値から降着率を見積もる事が出来てその上限値は $\dot{m} < 10^{12} \mathrm{g\,s^{-1}}$ と推定している (Luca et al. 2011)。しかしこの値は marginal であり、降着を棄却できる程強い制限とはならないのではないか?

もちろんその他の要因 (例えば磁場の攪乱によるエネルギー開放など) も考慮すべきであるが、今回の観測だけでは解明にはまだ不十分であろう。

第5章　総括と今後の変動天体観測の課題

第1章の「変動天体観測の重要性と観測装置の開発及び変動X線源1E1207.4−5209」では、X線による中性子星観測によってこれまでに得られた事実をまとめると共に1E1207.4−5209の観測の歴史と未だに残る問題点を提起した。中性子星の基本的な性質をはじめ、X線で中性子星を観測することの意義、これまでに観測されてきた中性子星がどのようにクラス分けされてきたのかを述べている。そして、その中で1E1207.4−5209が如何に特異な天体であり、これまでにどのような観測がなされてきたのかをまとめた。また、観測によって判明した事実と未だ明らかになっていない問題点を挙げ、この天体に対しての現在の課題を述べている。

第2章「「すざく」衛星による観測」では、1E1207.4−5209を観測した「すざく」衛星とその観測方法を説明すると共に、各種データ解析の結果をまとめた。　本論文で使用した日本のX線天文衛星「すざく」には複数の検出器が搭載されており、それらの説明や各観測モードの解説をしている。また、「すざく」の観測は2回にわたり、観測中に観測モードの変更が行われ複雑になったため観測のスケジュールをまとめた。データ解析の手法は主にライトカーブ解析、タイミング解析、スペクトル解析の3つの段階で行なわれた。ライトカーブ解析では観測中に長期的な光度変化が無かったことを示し、タイミング解析では複数の解析手法で過去に報告されたパルス周期を確認した。スペクトル解析では黒体放射やべき乗関数など様々な連続成分と吸収構造の本数で試行し、最終的に「すざく」のスペクトルが2温度黒体放射と電子によるサイクロトロン共鳴散乱によって説明できることを示した。また、本論文で新たに見つかった1本目の吸収構造が浅いモデル、つまり*Shallow1st*の可能性について議論している。

第3章「XMM-Newton衛星による観測とスペクトルの時間変化」では、欧州のX線望遠鏡XMM-Newtonによって過去に観測された1E1207.4−5209のデータを解析することで、1E1207.4−5209のX線スペクトル構造をより詳細に調査した。はじめにXMM-Newton衛星の特徴を述べ、XMM-Newtonデータのリダクション方法をまとめている。データ解析方法は基本的に「すざく」と同様に行い、ライトカーブ解析、タイミング解析を行なった後、スペクトル解析で「すざく」で得られた*Shallow1st*を確認した。また、XMM-Newton衛星データの解析では「すざく」では行なわなかったスペクトルの時間変化を調べることで1E1207.4−5209のスペクトルを構成する放射機構がパルス周期内でどのように変化しているかを確認した。

第4章「議論」では、「すざく」衛星とXMM-Newton衛星のデータを解析することで得られた新解釈から1E1207.4−5209の幾何学的、物理的な描像を議論した。時間平均スペクトル、フェイズ分割スペクトルは共に、本論文で新たに見い出された*Shallow1st*でよく説明ができることが分かった。これは星全体が低温で輝き、磁極付近では高温側の黒体放射が発生しているという1E1207.4−5209の幾何学的な描像を示唆している。また、高温側黒体放射のみが吸収を受けるモデルが最も妥当であることから極付近の黒体放射がサイクロトロン共鳴散乱によって吸収され、天体の自転によりその度合いが変わることで周期的な明るさの変動が起こると結論付けた。他にもサイクロトロン共鳴散乱による吸収構造について理論的な視野からも議論を行い、*Shallow1st*の妥当性を検証している。これらの議論から以前のスペクトルモデルからは説明できない1E1207.4−5209の物理的構造をより高い整合性をもって説明した。

今後の課題として、まず挙げられるのは本論文では明らかには出来なかった、高温側黒体放射の源の解明である。可能性として今より高エネルギー側をより感度良く観測することで、それを明らかに出来る可能性がある。また、本論文で使用したデータは1E1207.4−5209の全観測データ

の一部であり、これまでにこの天体を観測したデータはまだ、複数の X 線観測衛星について数多く存在する。それらのデータについても *Shallow1st* という本論文で見出した新解釈が成立するのか確かめる必要がある。他にも、1E1207.4−5209 と同じ中性子星のクラス CCO に分類されている他の天体についても新解釈による描像が当てはまるか検証を行いたい。これらの天体の観測で分かった性質は 1E1207.4−5209 と類似していることからも同様の物理過程が起こっている可能性は否定できない。

そして、私の研究は X 線の研究だけに止まらず、可視光領域についても第 1 章で挙げた AROMA 等を使用するなどして変動する天体の研究を引き続き行っていく。現在でもまだその原因が判明していない変動天体や突発天体の報告は数多くなされている。本論文で示した様に、天体の変動を追うことはその正体に近づくのに最も重要な手法の一つのはずである。

付録

A Psum タイミング解析におけるエネルギー領域とソース領域の幅の検討

Psum タイミング解析においてデータのエネルギー領域とソース領域の幅の取りかたによってタイミング解析の結果が異なる。そこで様々なエネルギー領域幅、様々なソース領域幅でタイミング解析 (efsearch と Ztest) を行いその結果をまとめた。

A.1 efsearch

各エネルギーごと、各ソース幅ごとの efsearch の結果をまとめる。以下の図が結果をまとめたもの。

2006 年について

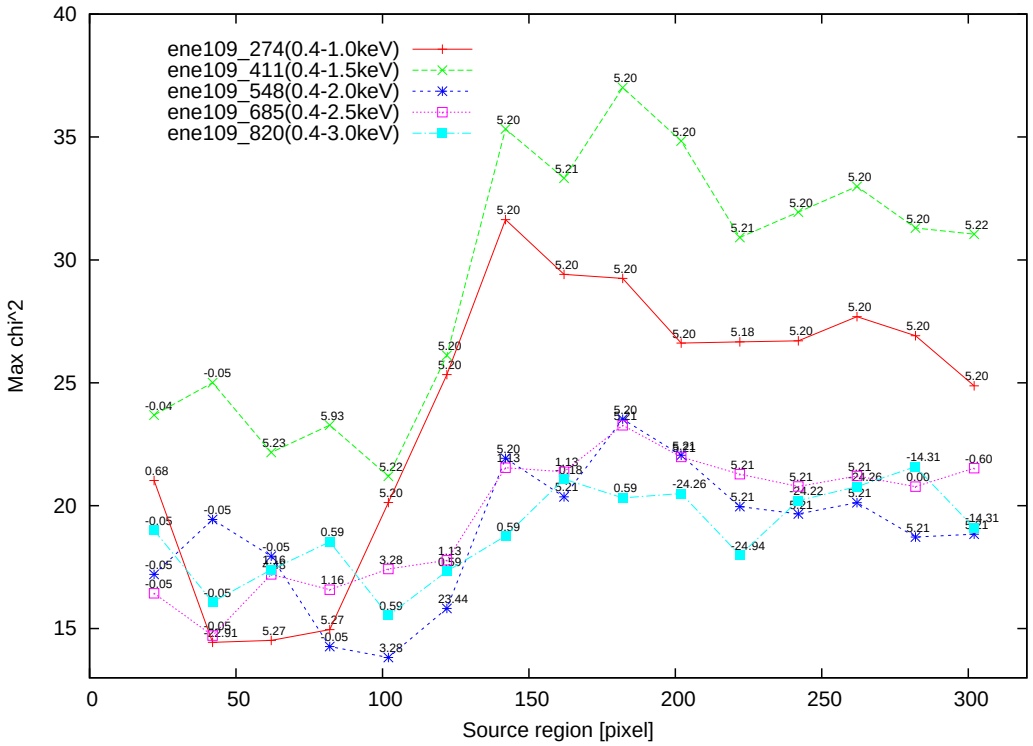

図 1: 2006 年の観測データについて、各エネルギー幅ごとに、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 chi2 の値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

2007 年について

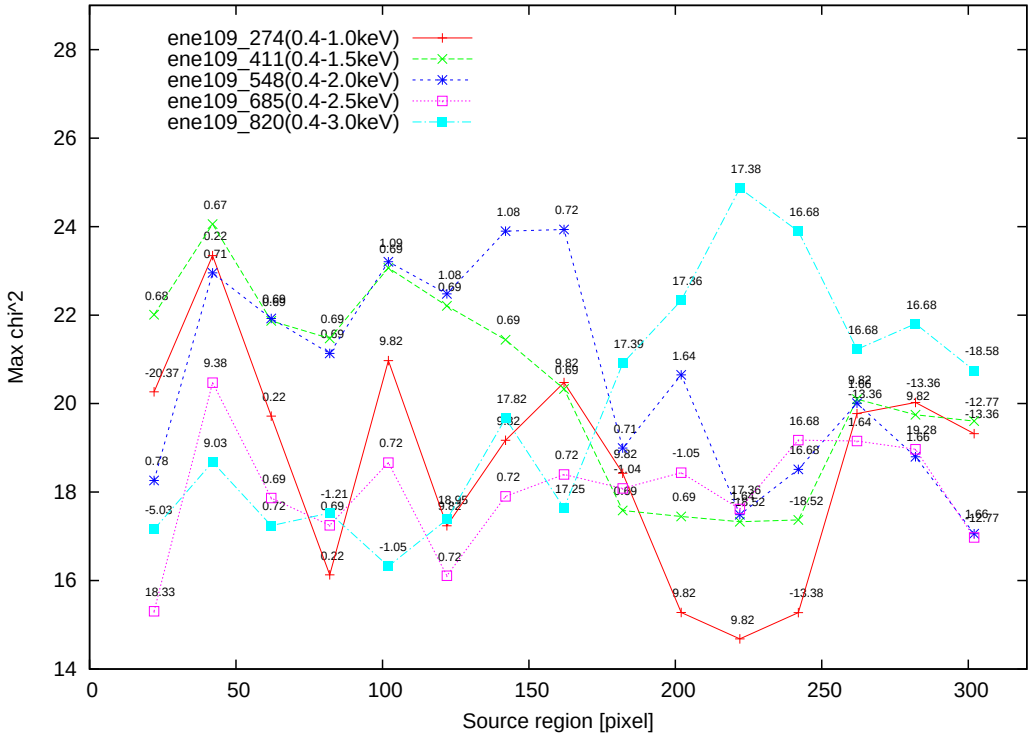

図 2: 2007 年の観測データについて、各エネルギー幅ごとに、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 chi2 の値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

A.2 Ztest

各エネルギーごと、各ソース幅ごとの Ztest の結果をまとめる。以下の図が結果をまとめたもの。2006 年について

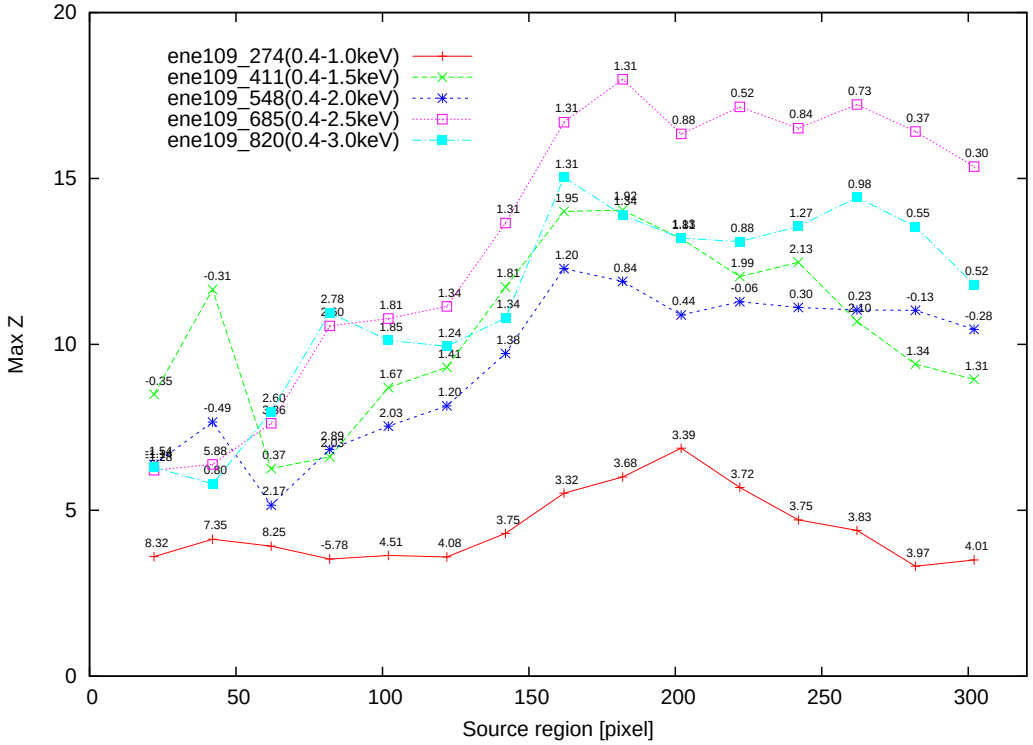

図 3: 2006 年の観測データについて、各エネルギー幅ごとに、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 Z 値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

2007 年について

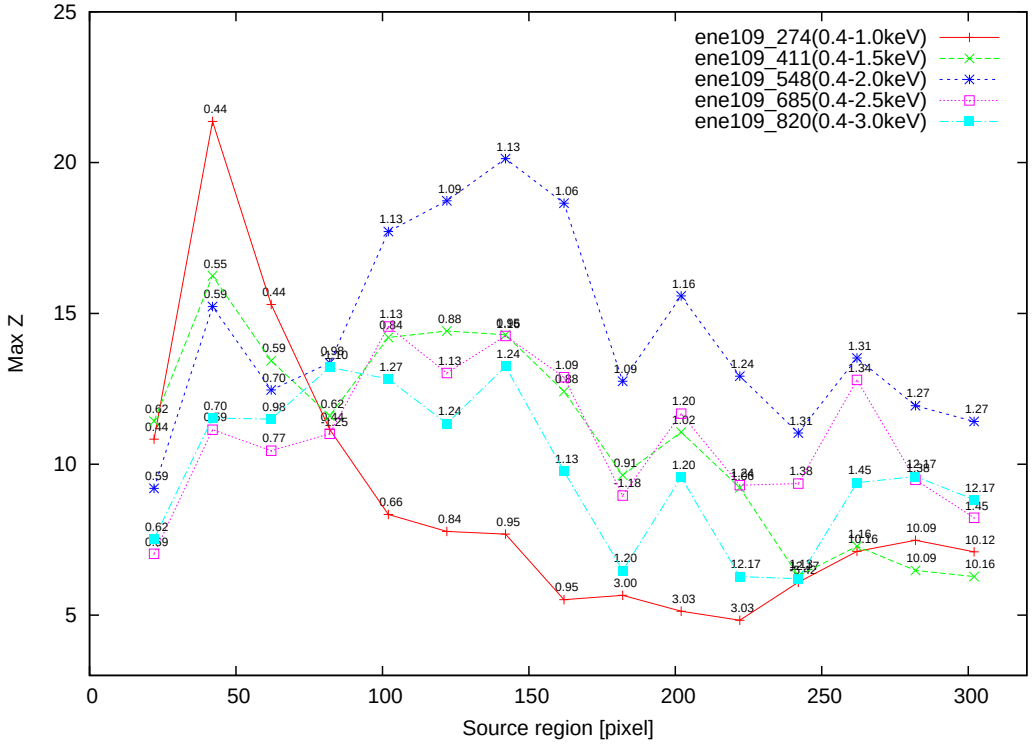

図 4: 2007 年の観測データについて、各エネルギー幅ごとに、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 Z 値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

A.3 まとめ

最終的にエネルギーについては 0.4-2.5keV で、ソース領域幅については 2006 が 182pixel、2007 が 102pixel が最も妥当であると考えられる。

B Psum タイミング解析におけるエネルギー領域とソース領域の幅の検討 2

Psum タイミング解析においてデータのエネルギー領域を吸収線の部分のみ使用した場合、ソース領域の幅の取りかたによってタイミング解析の結果がどうなるか検証した。使用したエネルギー領域は 161-213ch (0.588-0.777keV) と 351-426ch (1.303-1.555keV)。タイミング解析 (efsearch と Ztest) を行いその結果をまとめた。

B.1 efsearch

各ソース幅ごとの efsearch の結果をまとめる。以下の図が結果をまとめたもの。

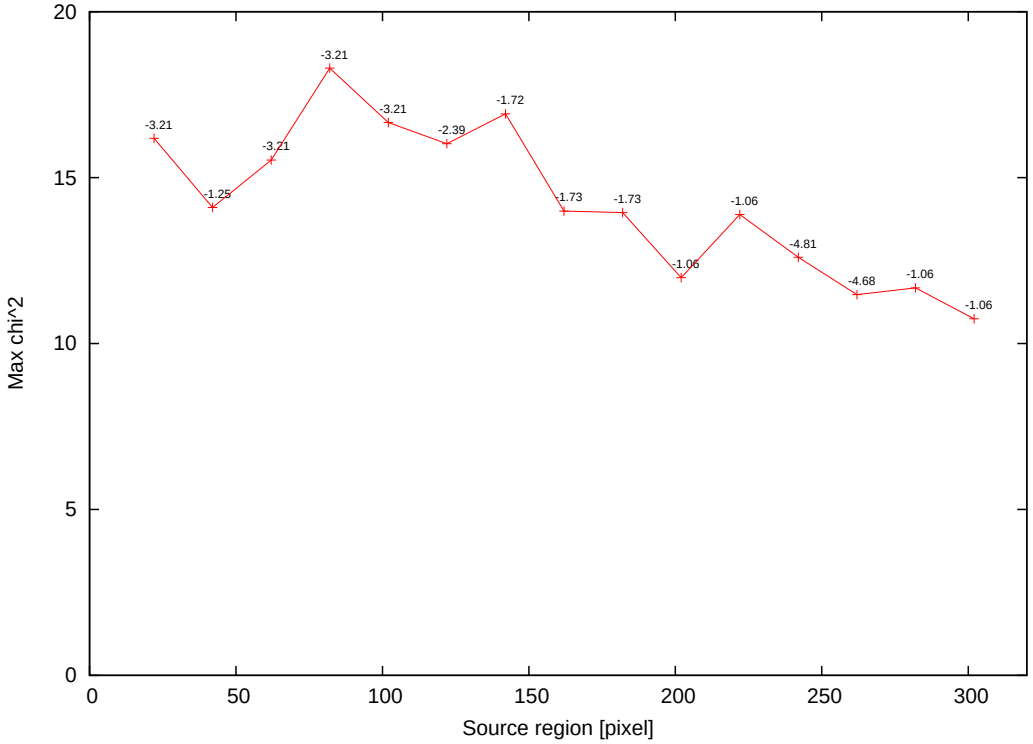

図 5: 2006 年の観測データについて、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 chi2 の値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

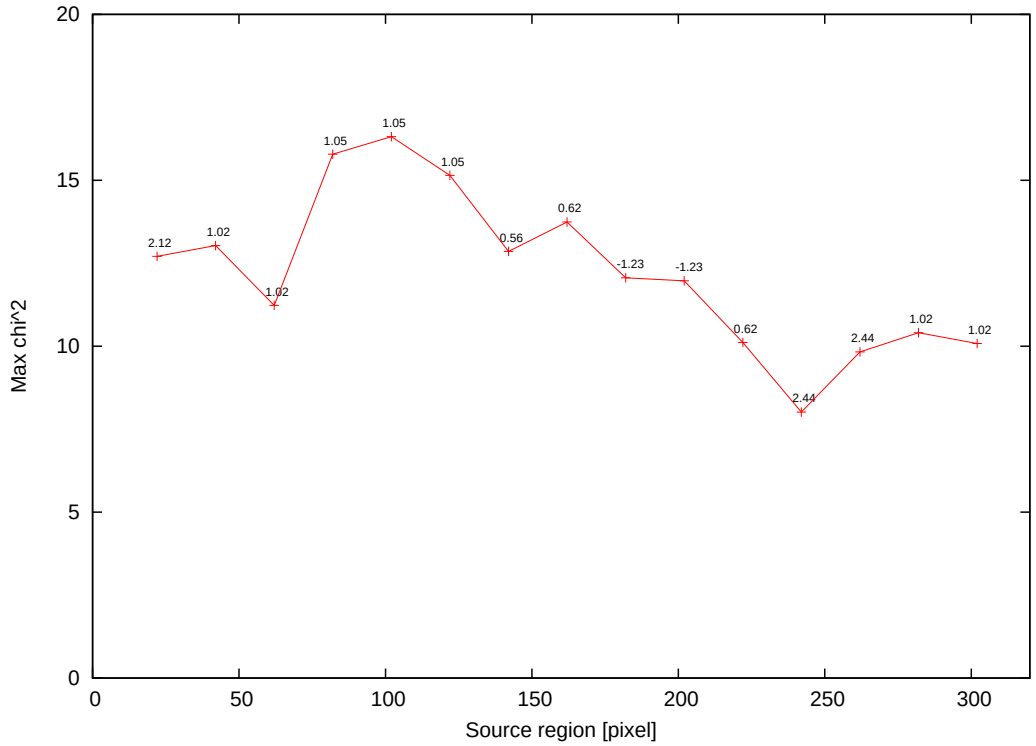

図 6: 2007 年の観測データについて、各エネルギー幅ごとに、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 chi2 の値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

82 か 102pixcel 付近が良さそうである。

B.2 Ztest

各エネルギーごと、各ソース幅ごとの Ztest の結果をまとめる。以下の図が結果をまとめたもの。

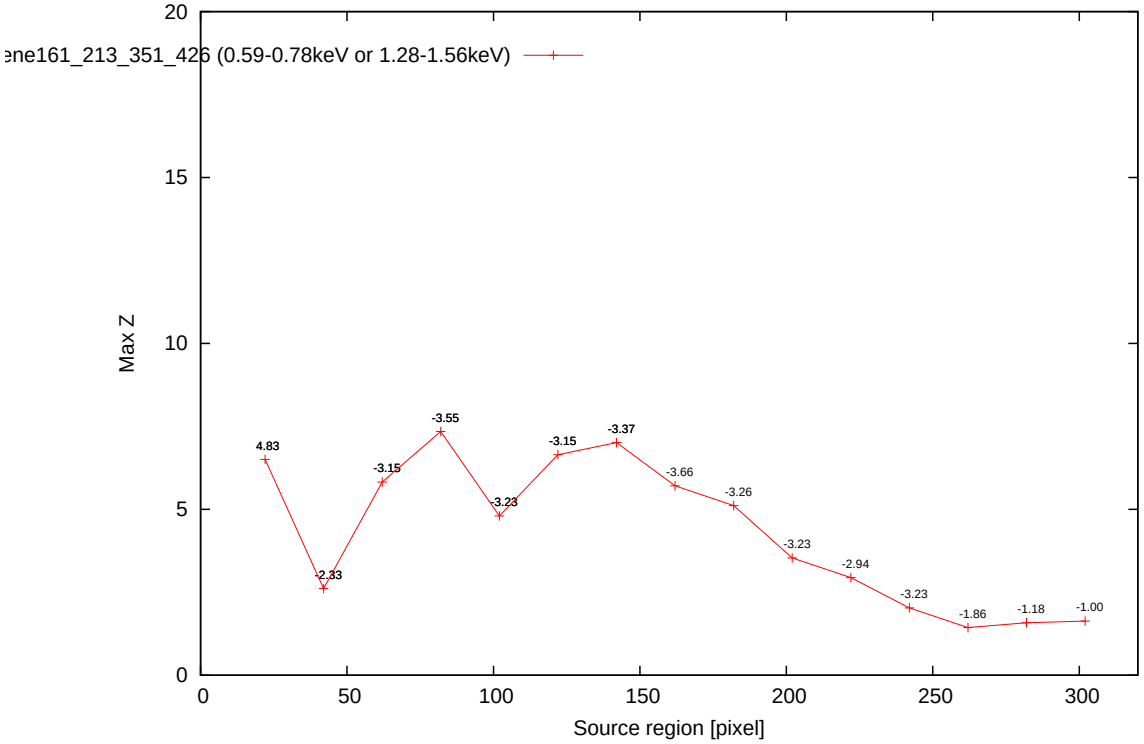

図 7: 2006 年の観測データについて、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 Z 値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

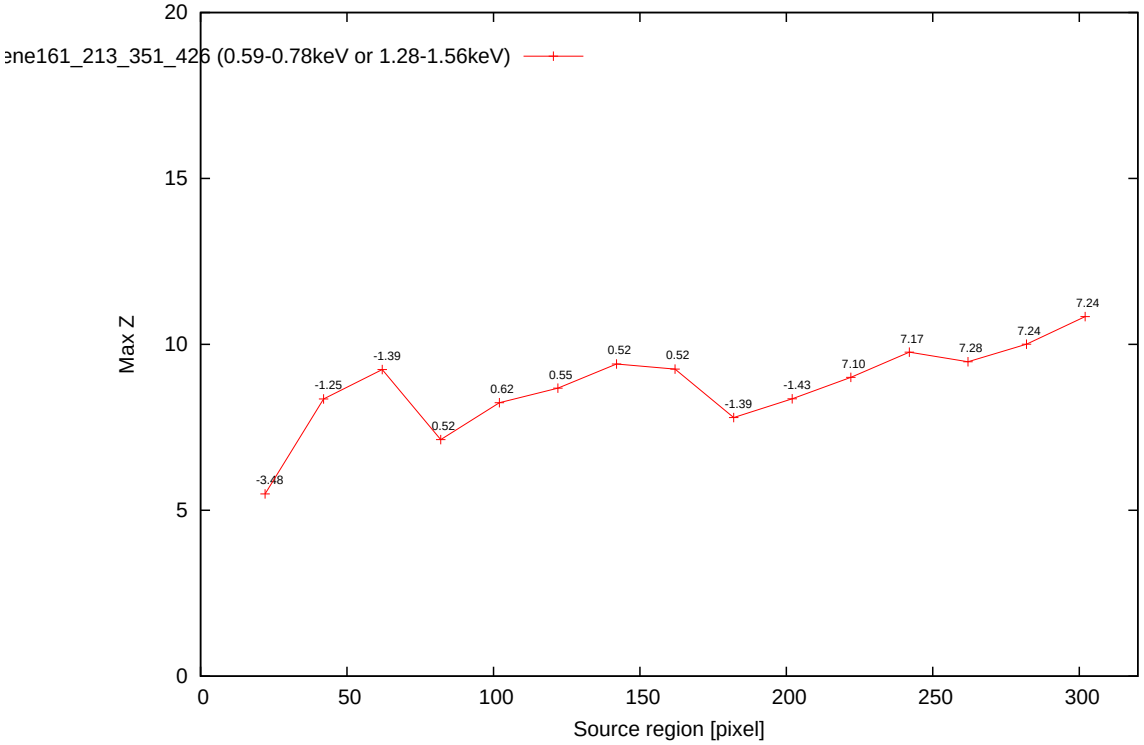

図 8: 2007 年の観測データについて、横軸にソース領域幅 (pixel)、縦軸にピークの最大 Z 値をとり、データ点の上にその時の周期-0.424130 秒を ns 単位で書いてある。

B.3　まとめ

吸収線部分のみのエネルギーの切り方より前回の 0.4-2.5keV で切った方がより顕著にピークを確認できた。

これは吸収線のみが変わって明るさが変動しているわけではないことを示唆している可能性がある。しかし、統計の少ないことも考える必要がある。ソース領域幅についてはうまく指定できないが、2006,2007 年共に 100-140pixel が妥当ではないかと考える。

C　$\dot{P}$ を考慮した場合の efsearch

これまでに行った efsearch と efold は $\dot{P}$ を考慮していなかった。$\dot{P}$ を考慮していない場合と同様に 1 回目の XIS023 を合わせたもの、2 回目の XIS03、そして全て合わせたもの 3 グループ (グループ 1-3) に分けて解析した。$\dot{P}$ は Gotthelf & Halpern 2007 では $\dot{P} = 6.6 \pm 9.0 \times 10^{-17}$ とされていたのでとりあえず $-2.4E^{-17}$ から $15.6E^{-17}$ まで $1E^{-18}$ ずつ変化させながら efsearch を行った。なお、その際、周期探査の分解能は 0.000001 と 0.0000001 の 2 種類で行った。

その結果、Pdot の変化で efsearch の結果が大きく変わっている様だが、0.424130 に大きなピークが立っているのは pdot=0 のとき以外ではほとんど見受けられなかった。

ただ、時々、他の場所にとても広く大きなピークが立っていた。この例を一つ出す

$\dot{P} = 1E^{-18}$ の時 0.3 秒と 0.6 秒にとても大きなピークがあった。その時の efsearch の結果を以下に示す。

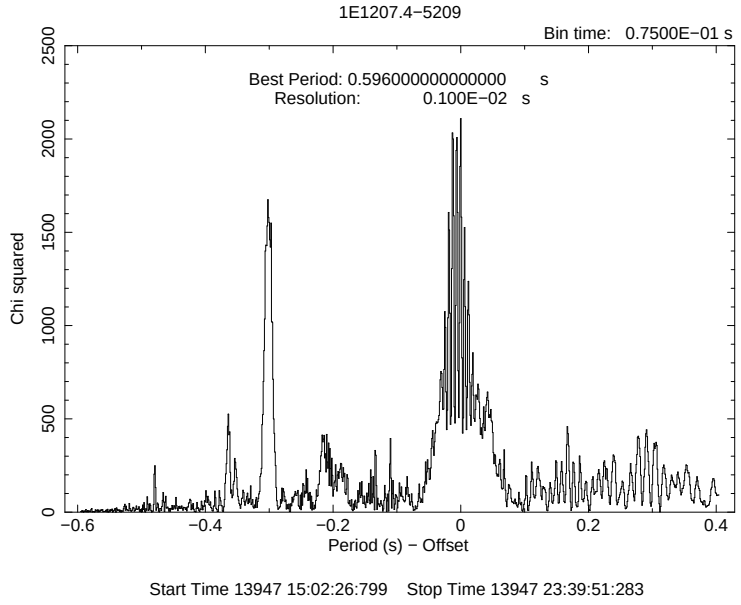

図 9: efsearch の結果。0.424130 秒を中心に周期分解能 0.001 秒で 1000step($\dot{P}$ を考慮)。

また 0.3 秒の efold を以下に示す。

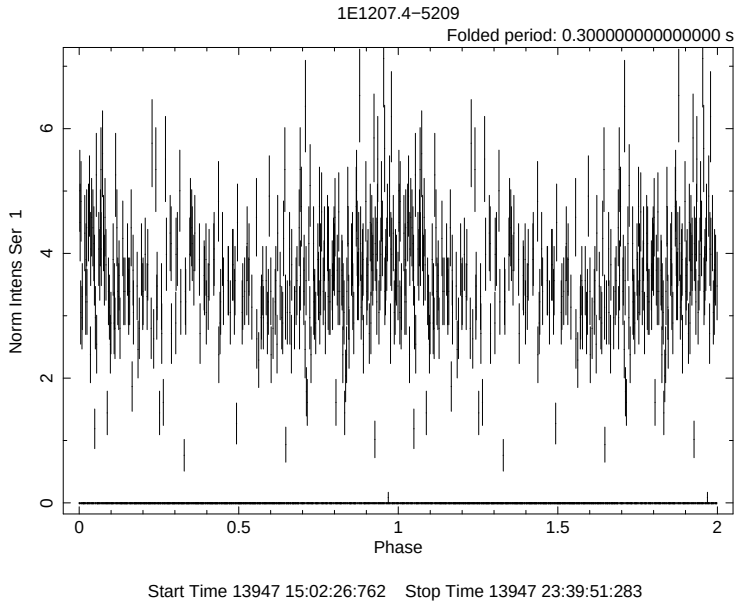

図 10: グループ 1 について 0.3 秒で efold した結果 ($\dot{P}$ を考慮)。

efold の結果を見るとカウントが 0 の部分がある。そのためこれは天体由来のものでは無いだろう。

また、周期探査の分解能が 0.0000001 の場合で efsearch において 0.424130 付近にピークがあったものを以下に載せる

グループ 1(1 回目の XIS023 を合わせたもの)

0.424130 付近にピークが立っていたのは

```
Pdot     最大の Chi2
--------------------
0 22
62E-18  15
66E-18  12
71E-18  14
81E-18  14
94E-18  10
100E-18 16
152E-18 22
153E-18 25
155E-18 16
```

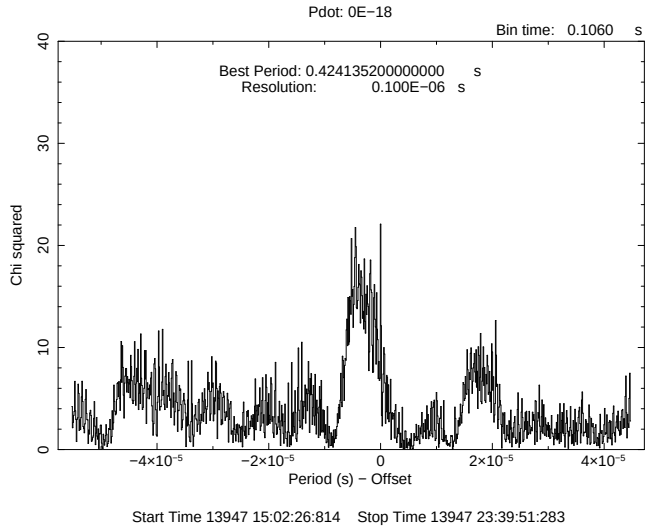

図 11: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 0$)。

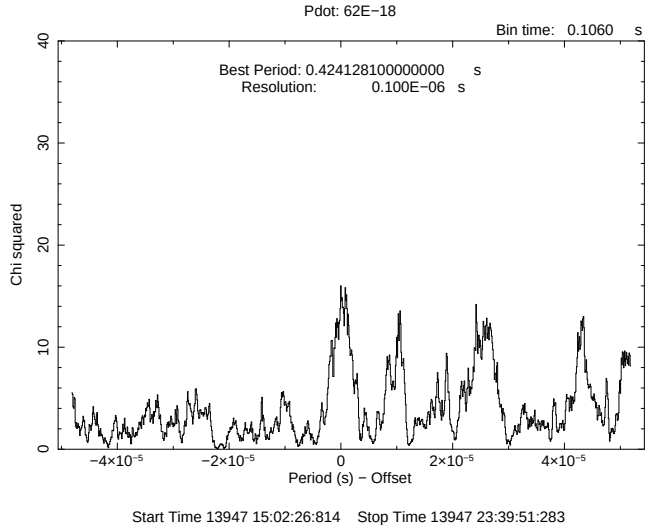

図 12: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 6.2E^{-}17$)。

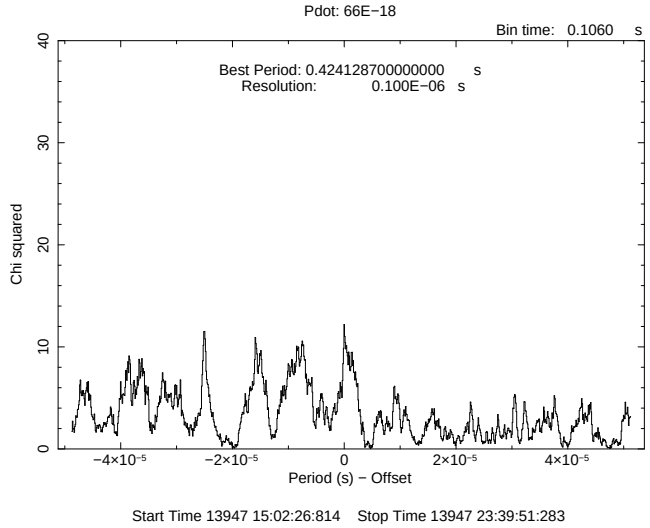

図 13: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 6.6E^{-}17$)。

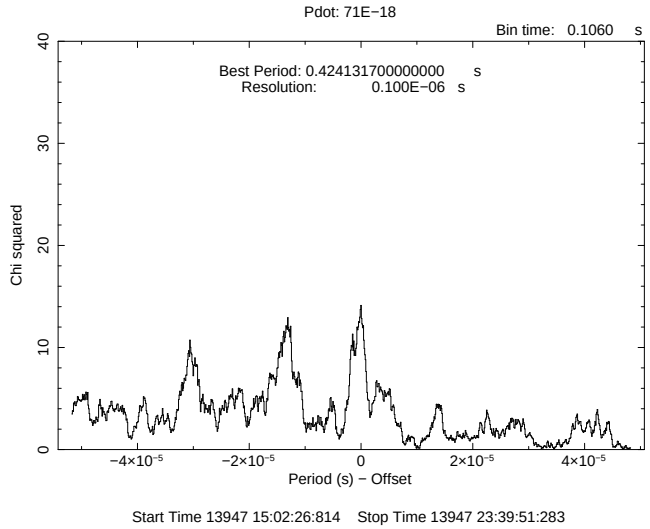

図 14: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 7.1E^{-}17$)。

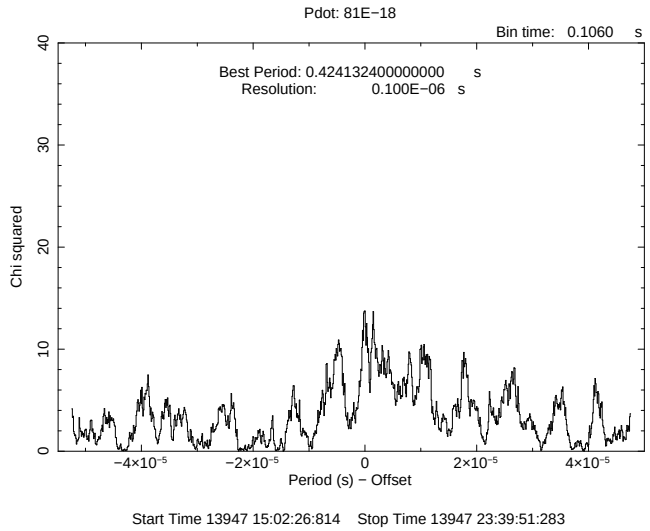

図 15: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 8.1E^{-}17$)。

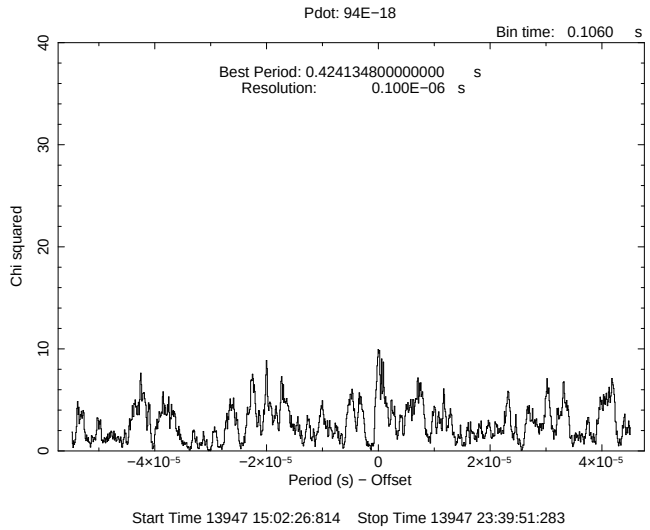

図 16: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 9.4E^{-}17$)。

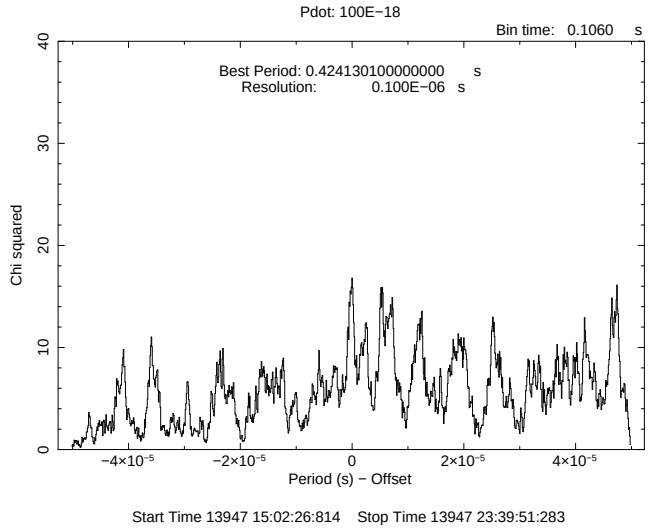

図 17: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 10.0E^{-}17$)。

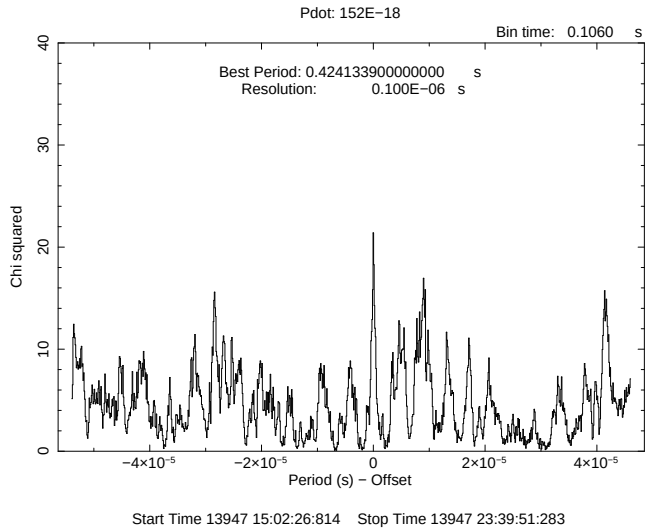

図 18: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 15.2E^{-}17$)。

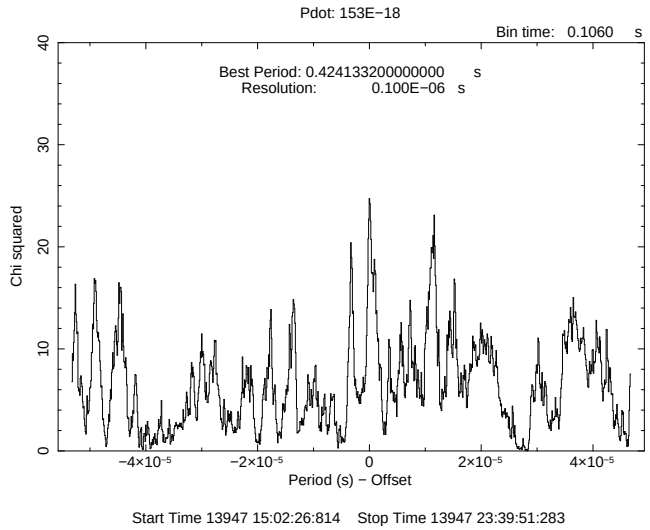

図 19: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 15.3E^{-}17$)。

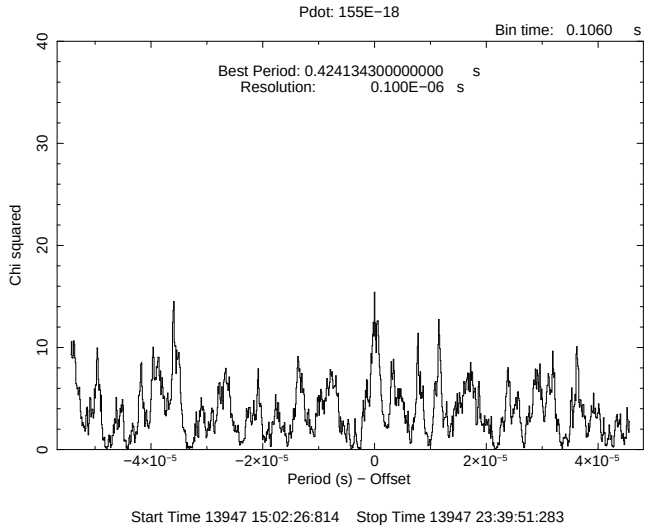

図 20: グループ 1 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 15.5E^{-}17$)。

グループ 2(2 回目の XIS03 を合わせたもの)

0.424130 付近にピークが立っていたのは

Pdot	最大の Chi2
-19E-18	>40
0	16
38E-18	>40
57E-18	32
66E-18	16
98E-18	24
114E-18	31
142E-18	14
150E-18	20
152E-18	29

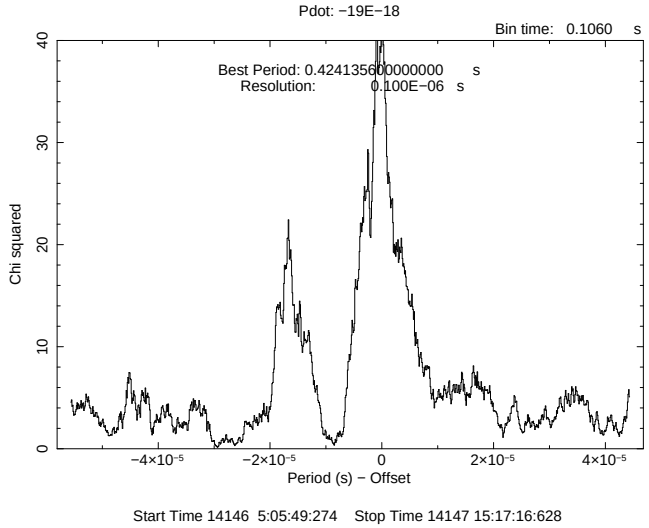

図 21: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = -1.9E^{-}17$)。

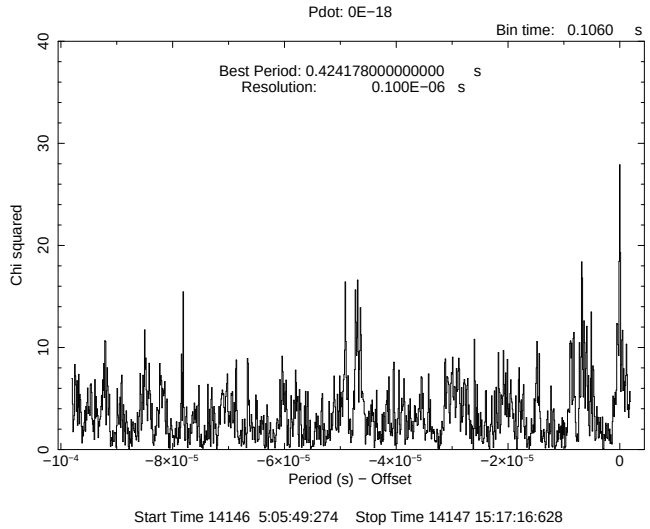

図 22: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 0$)。

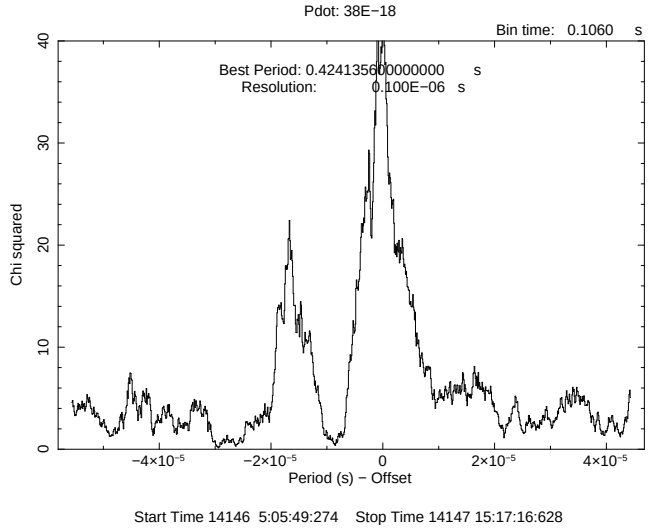

図 23: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 3.8E^{-}17$)。

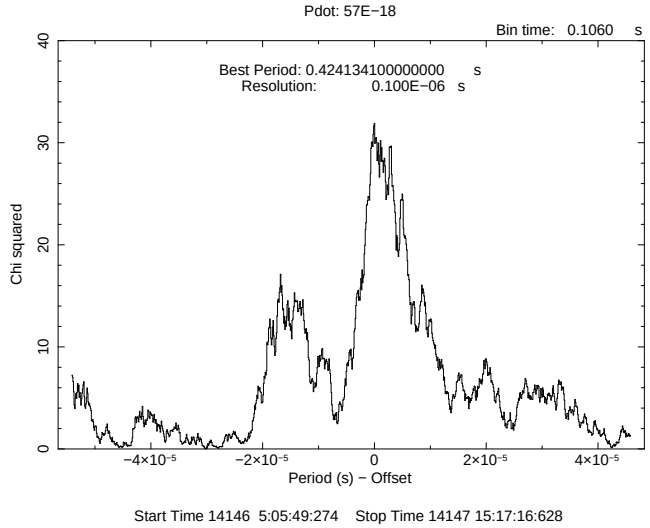

図 24: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 5.7E^{-}17$)。

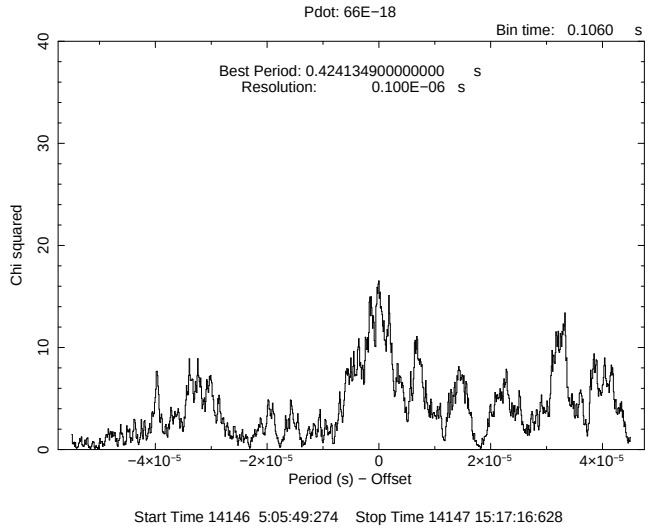

図 25: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 6.6E^{-}17$)。

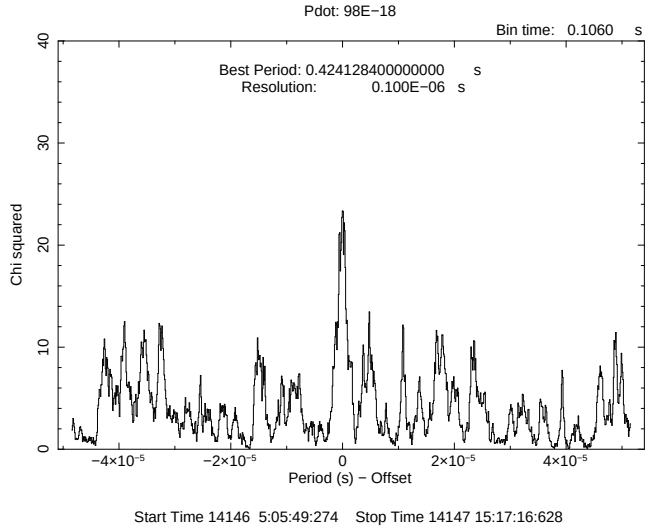

図 26: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 9.8E^{-}17$)。

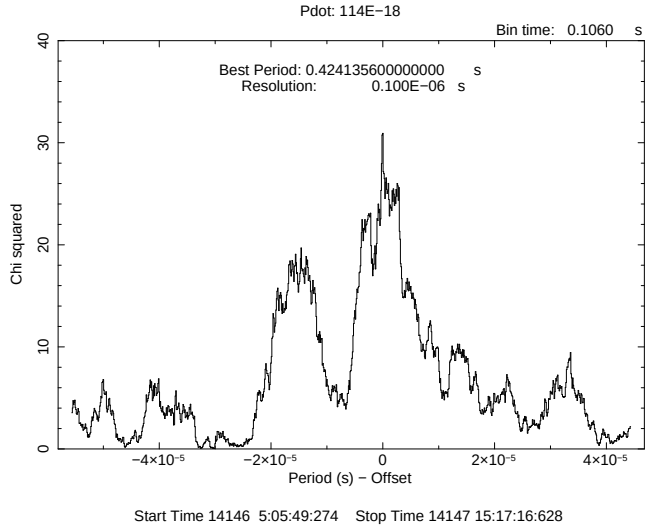

図 27: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 11.4E^{-}17$)。

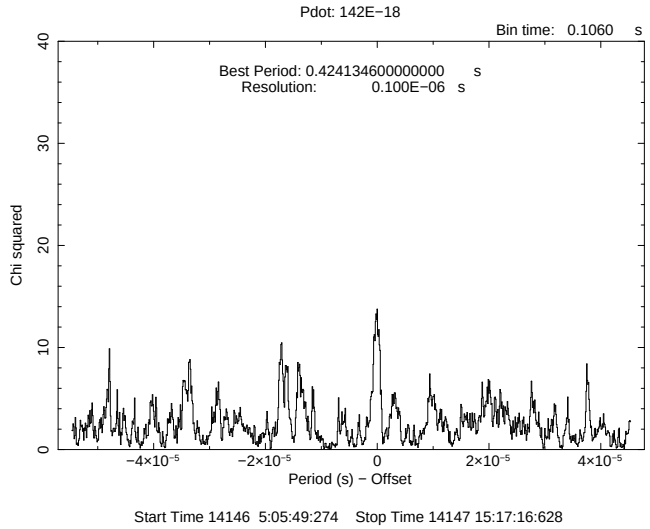

図 28: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 14.2E^{-}17$)。

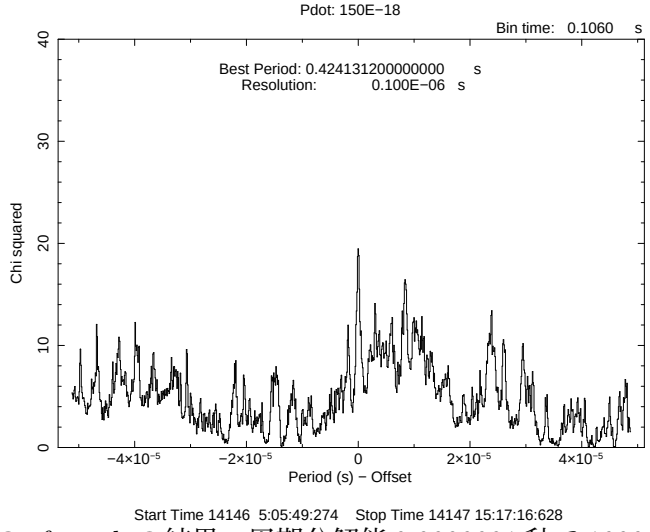

図 29: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 15.0E^{-}17$)。

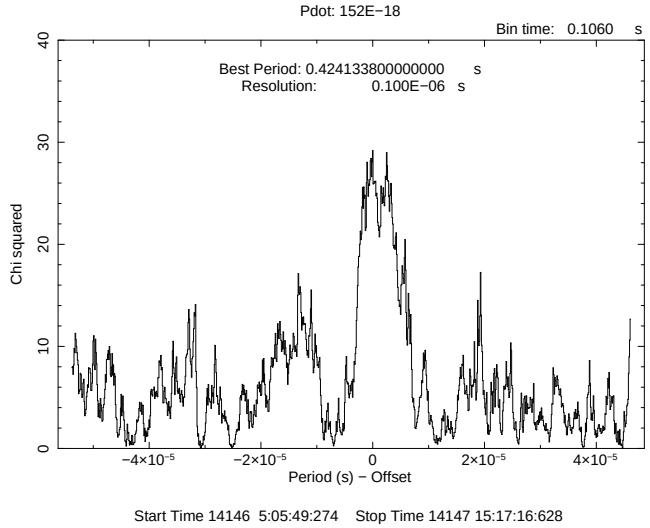

図 30: グループ 2 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 15.2E^{-}17$)。

グループ 3(全て)

0.424130 付近にピークが立っていたのは

`Pdot` 最大の `Chi2`

```
--------------------
-6E-18     28
0E-18    23
4E-18      26
12E-18     30
38E-18     29
45E-18     21
50E-18     21
57E-18     29
68E-18     18
72E-18     11
76E-18     28
98E-18     19
114E-18    35
115E-18    12
139E-18    38
153E-18    30
```

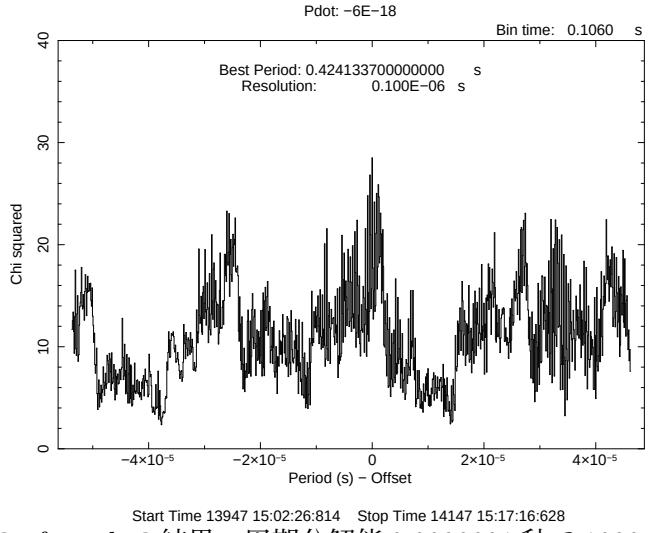

図 31: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = -0.6E^{-}17$)。

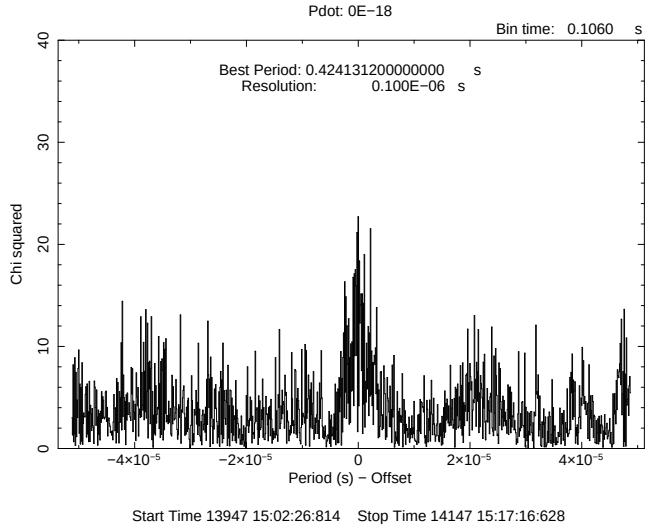

図 32: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 0$)。

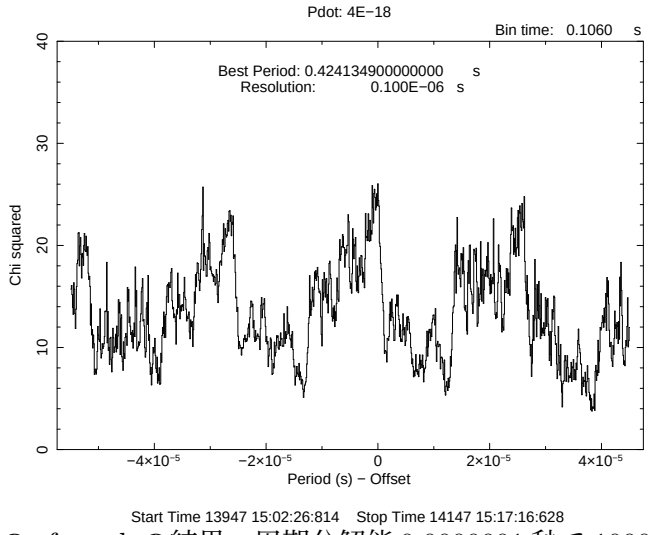

図 33: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 0.4E^{-}17$)。

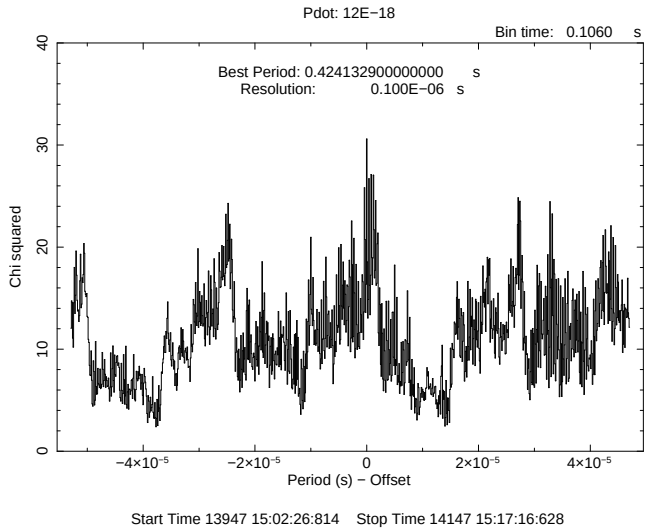

図 34: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 1.2E^{-}17$)。

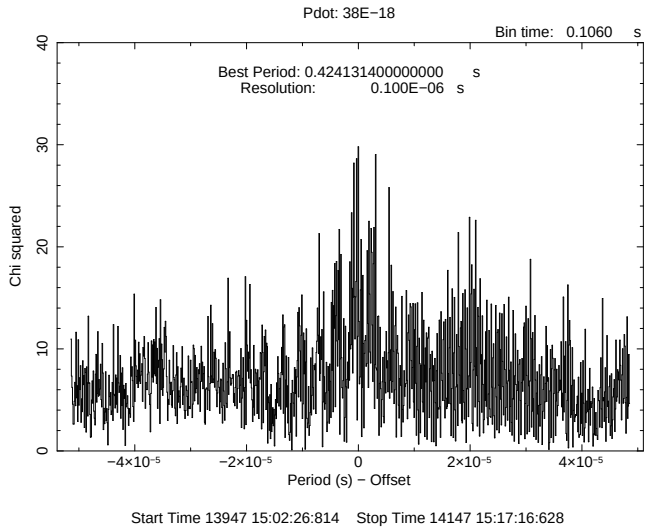

図 35: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 3.8E^{-}17$)。

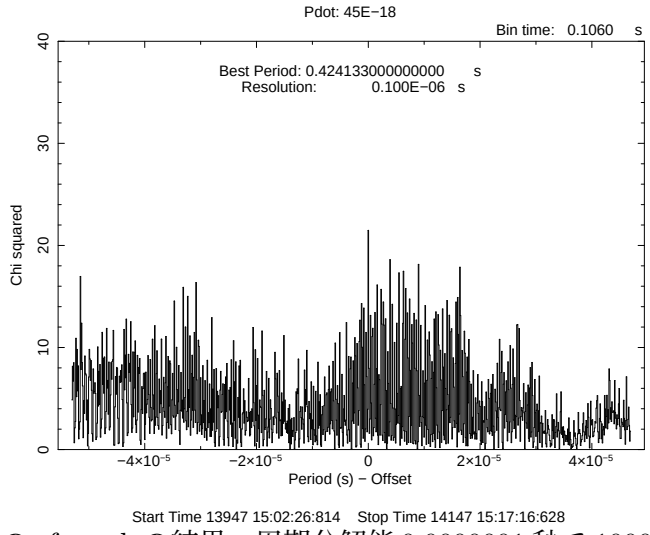

図 36: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 4.5E^{-}17$)。

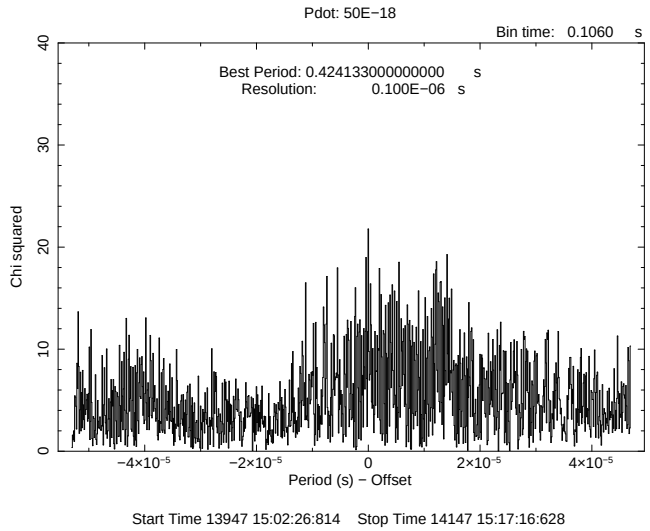

図 37: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 5.0E^{-}17$)。

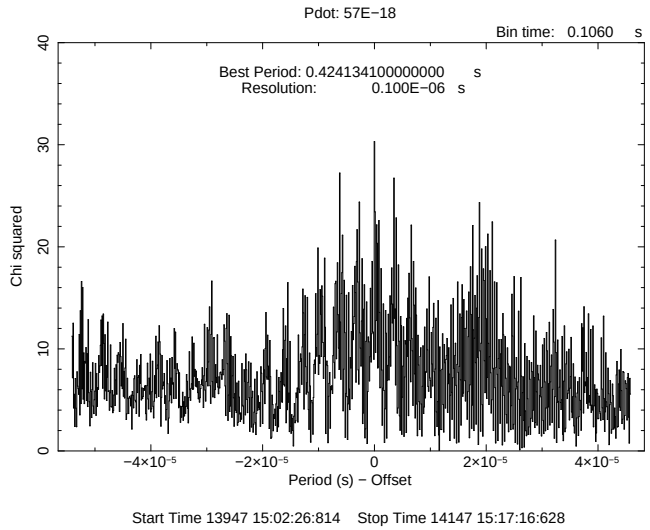

図 38: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 5.7E^{-}17$)。

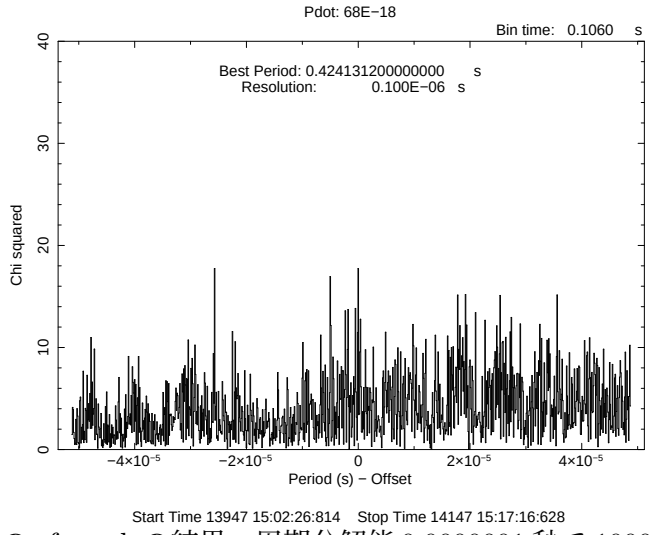

図 39: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 6.8E^{-}17$)。

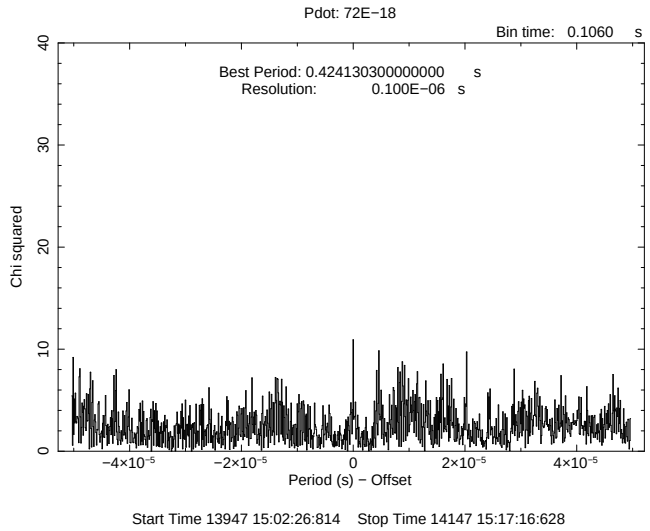

図 40: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 7.2E^{-}17$)。

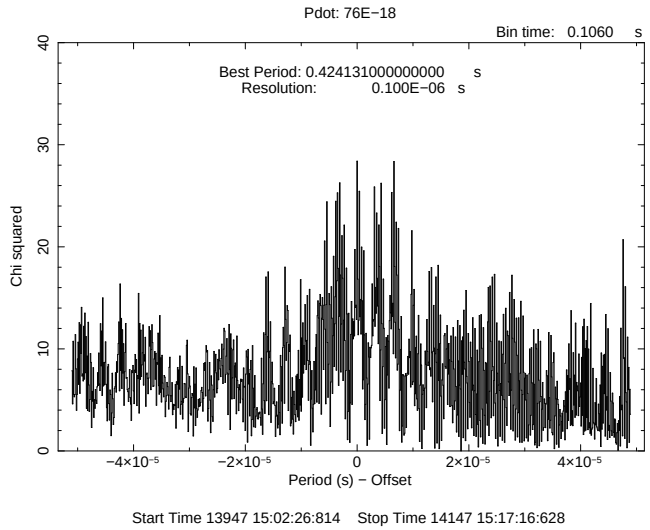

図 41: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 7.6E^{-}17$)。

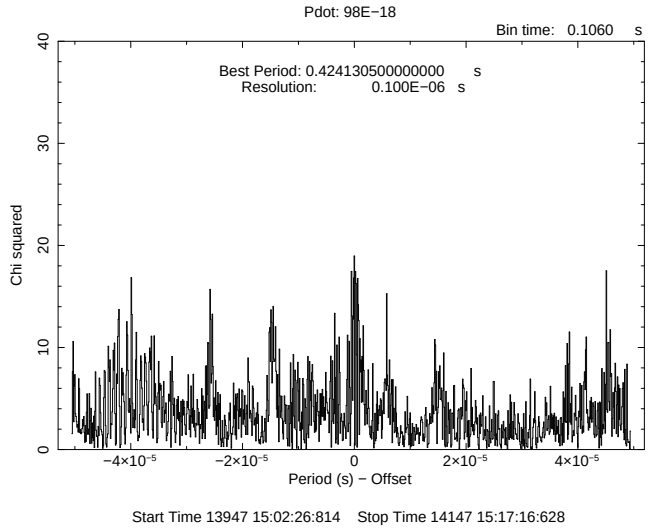

図 42: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 9.8E^{-}17$)。

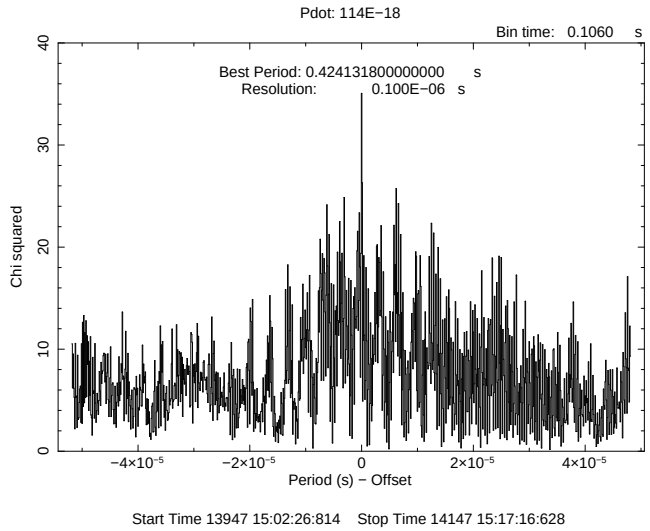

図 43: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 11.4E^{-}17$)。

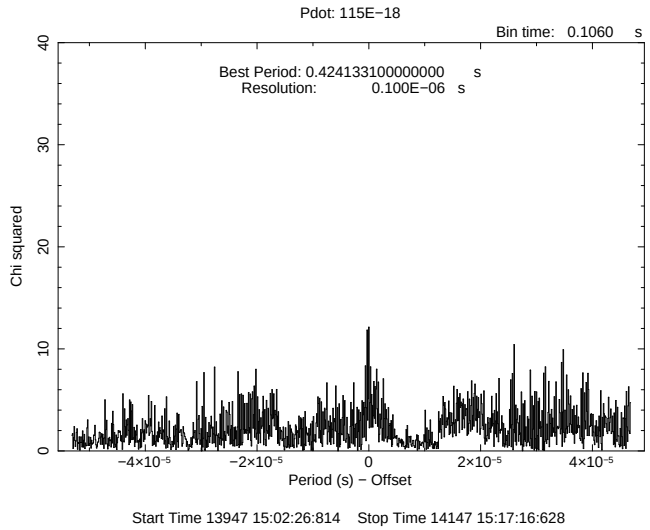

図 44: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 11.5E^{-}17$)。

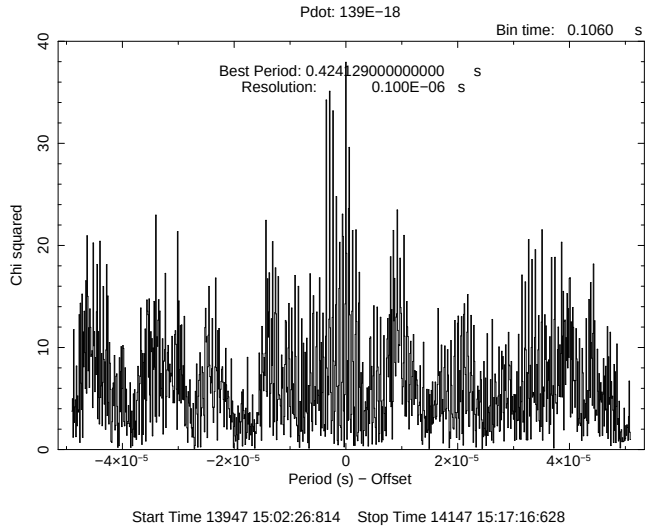

図 45: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 13.9E^{-}17$)。

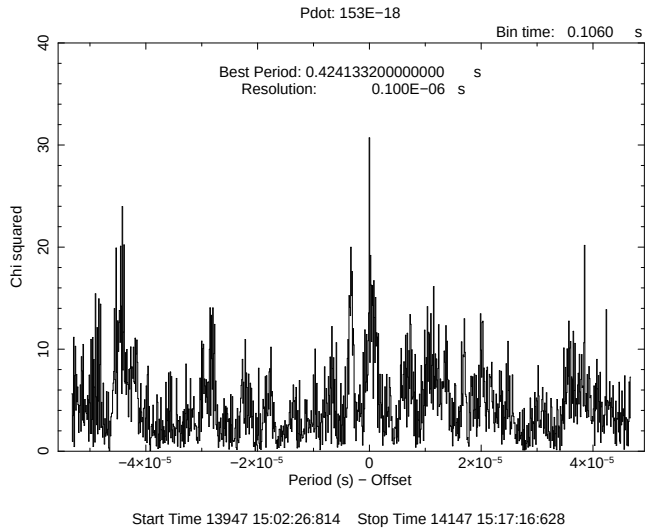

図 46: グループ 3 の efsearch の結果。周期分解能 0.0000001 秒で 1000step($\dot{P} = 15.3E^{-}17$)。

また、1st、2nd とは異なり、綺麗なピークは得られない。細かい振動のパターンが乗っている。これは Pdot を変えても変わらない。もしかしたら 1st と 2nd で Pdot が変わっている可能性がある。

これまでの事を考えると Pdot を-2.4E-17 から 15.6E-17 させるといくつかの場合で 0.424130 の時にピークがあったが、微妙にずれている場合もあり、はっきりしない。Ztest の結果を確認するべき。

D　$\dot{P}$ の値と Ztest の結果について

$\dot{P}$ を変えながら連続して Ztest を行い、その結果を調べた。これらの調査は 1 回目の観測、2 回目の観測 2 つのグループについて行った。

D.1　2006 年 (1st)

まずは $\dot{P}$ を過去の論文 (Gotthelf et al. 2007) のエラー範囲である-2.4E-17 から 15.6E-17 まで 1E-18 ずつ変化させながら Ztest を行い、各場合で 0.424130 付近のピークをガウシアンフィットすることで、Z の値がどのように変化していくか確かめた。

その結果、$\dot{P}$ に対する Z は Pdot が増える度に Z がわずかながら (0.1 ほど) 大きくなった。

次に $\dot{P}$ を

-1E-13 から-1E-14 までを 1E-14 刻み
-1E-14 から-1E-15 までを 1E-15 刻み
-1E-15 から-1E-16 までを 1E-16 刻み
-1E-16 から-1E-17 までを 1E-17 刻み
1E-16 から 1E-15 までを 1E-16 刻み
1E-15 から 1E-14 までを 1E-15 刻み
1E-14 から 1E-13 までを 1E-14 刻み

で変化させながら Ztest を行い、0.424130 付近の Z の値がどのように変化するかチェックした。

最終的に、各 $\dot{P}$ に対する、ピーク中心、sigma、err、Z の変化を以下の図に示した。

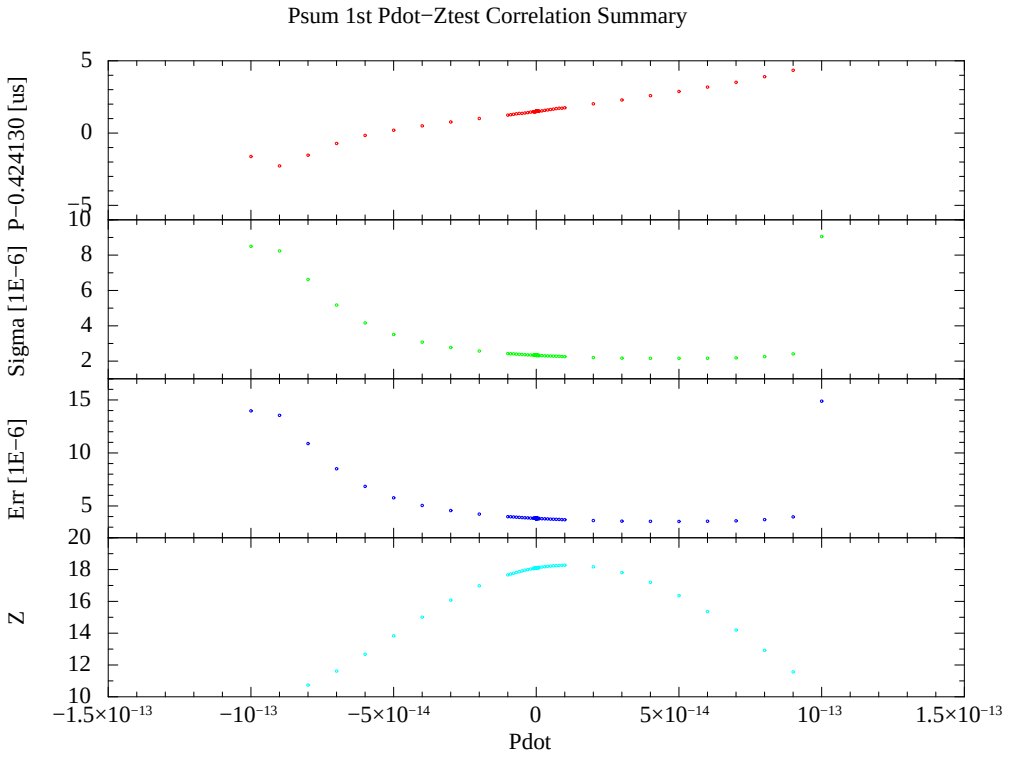

図 47: 2006 年の Psum データを各 $\dot{P}$ で Ztest した際の 0.424130 付近のピークに対するガウシアンフィットパラメータの変化。

$\dot{P} = 1E^{-15}$ 付近で Z が最大になっていた。

次に Z が最大になる $\dot{P}$ を見積もるために $\dot{P}$ に対する Z のデータをガウス関数でフィッティングして Z の最大値を求めた。その結果、(1.1422 +0.0004/-0.0014)E-14 (90%Error) で Z が最大の

18.28 になる。最後に Z が最大になった $\dot{P}$ で efsearch と efold を行った。efsearch の結果を以下に示す。

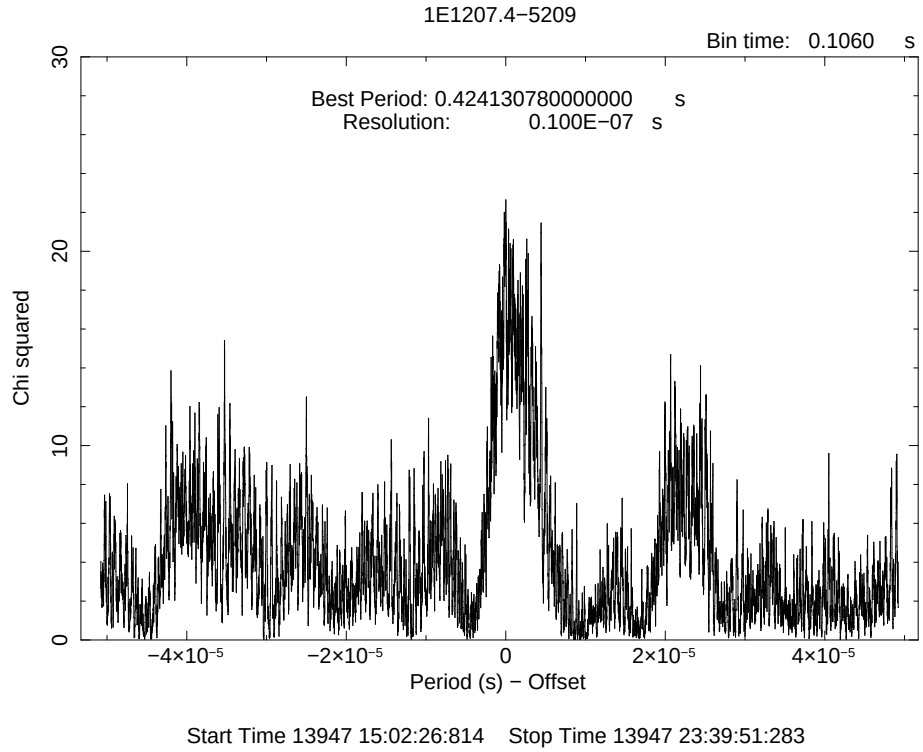

図 48: 2006 年 Psum データの efsearch。$\dot{P}$=1.14220445E-14、0.00000001 秒の分解能で 10000step。

$\dot{P}$=0 の場合と比べて少しピークの大きさが大きくなっている様に見える。
次に efsearch で最も高かった部分で efold を行った。

```
Epoch[14146.00000] 13947.00000
Period[0.42413123] 0.42413078
Phasebins/Period {value or neg. power of 2}[32] 8
Number of Newbins/Interval[9286991] 585592

 Intv    1   Start 13947 15: 2:26
    Ser.1     Avg 0.6750        Chisq  21.10       Var 0.7964E-03 Newbs.      8
              Min 0.6404          Max 0.7259    expVar 0.3019E-03  Bins  12075
```

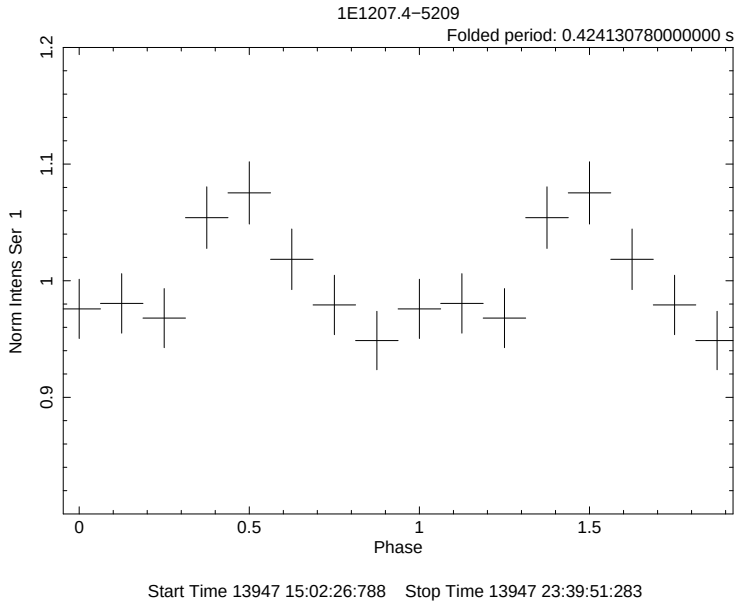

図 49: グループ 1 について $\dot{P}$=1.14220445E-14、P =0.42413078 秒で efold した結果。

10%程度の大きな変動が確認できたが、$\dot{P}$=0 の場合とほとんど差は無い。

D.2 2007 年 (2nd)

まずは $\dot{P}$ を-2.4E-17 から 15.6E-17 まで 1E-18 ずつ変化させながら Ztest を行い、各場合で 0.424130 付近のピークをガウシアンフィットすることで、Z の値がどのように変化していくか確かめた。

その結果、$\dot{P}$ に対する Z は Pdot が増える度に Z は小さくなった。

次に $\dot{P}$ を

-1E-13 から-1E-14 までを 1E-14 刻み
-2E-14 から-1E-14 までを 1E-15 刻み
-1E-14 から-1E-15 までを 1E-15 刻み
-1E-15 から-1E-16 までを 1E-16 刻み
-1E-16 から-1E-17 までを 1E-17 刻み
1E-16 から 1E-15 までを 1E-16 刻み
1E-15 から 1E-14 までを 1E-15 刻み
0.5E-14 から 2E-14 までを 1E-15 刻み
1E-14 から 1E-13 までを 1E-14 刻み

で変化させながら Ztest を行い、0.424130 付近の Z の値がどのように変化するかチェックした。最終的に、各 $\dot{P}$ に対する、ピーク中心、sigma、err、Z の変化を以下の図に示した。

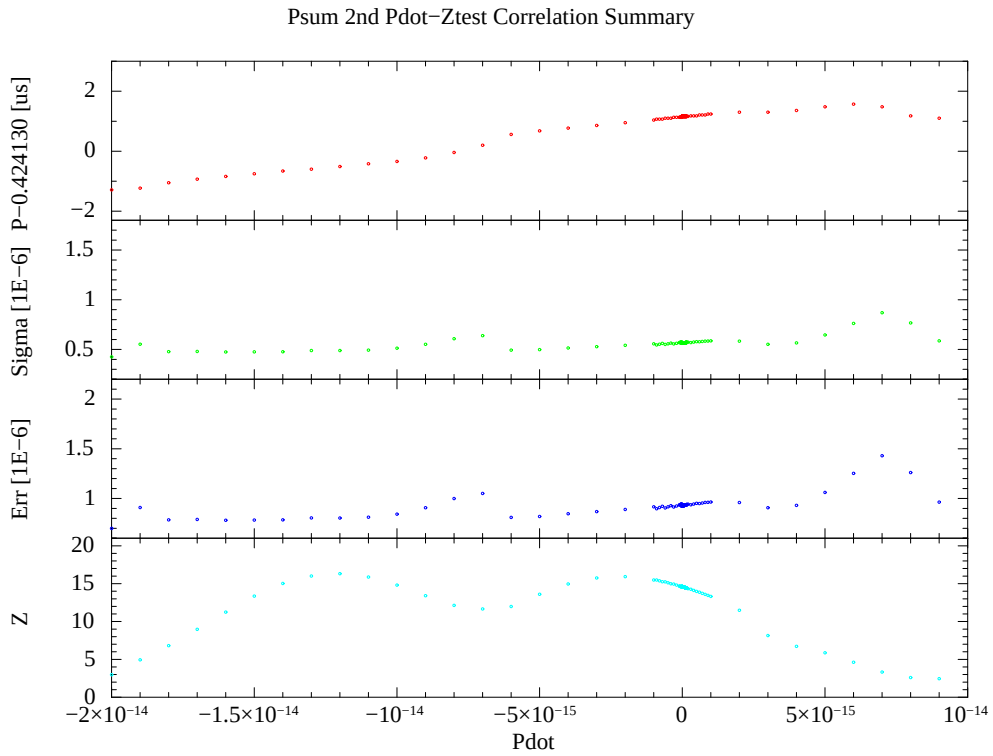

図 50: 2007 年の Psum データを各 $\dot{P}$ で Ztest した際の 0.424130 付近のピークに対するガウシアンフィットパラメータの変化。

ピークが 2 つ見える。

次に Z が最大になる $\dot{P}$ を見積もるために $\dot{P}$ に対する Z のデータをガウス関数でフィッティングして Z の最大値を求めた。その結果、(-1.2084 +0.0008/-0.0013)E-14 (90%Error) で Z が最大の 14.38 になる。また、2 つ目のピークは (-0.219451 +0.00006/-0.00055)E-14 (90%Error)。

最後これら 2 つのピークの $\dot{P}$ で efsearch と efold を行った。以下に efsearch の結果と、efsearch で最も高かった部分で efold を行った結果を示す。

$\dot{P} = -1.20841811E - 14$

まず efsearch の結果。

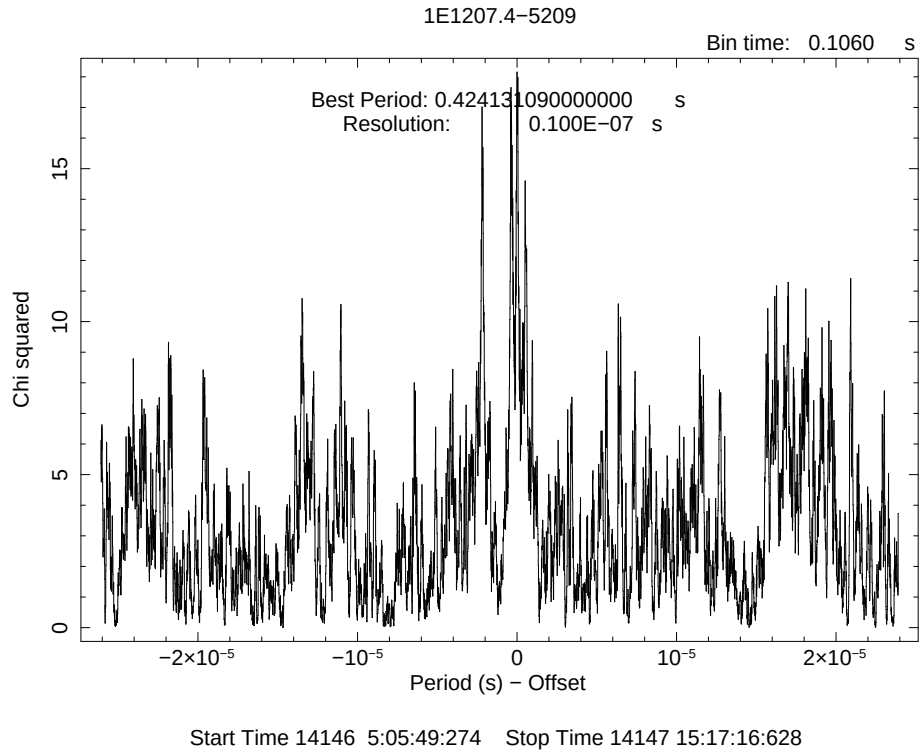

図 51: 2007 年 Psum データの efsearch。$\dot{P}$=-1.20841811E-14、0.00000001 秒の分解能で 5000step。

$\dot{P}$=0 の場合と比べて少しピークの大きさが大きくなっている様に見える。

次に efsearch で最も高かった周期 (0.42413109) で efold を行った。

```
Epoch[14146.00000] 14146.00000
Period[0.42413123] 0.42413109
Phasebins/Period {value or neg. power of 2}[32] 8
Number of Newbins/Interval[9286991] 2321748

 Intv    1   Start 14146  5: 5:49
     Ser.1     Avg 0.2993        Chisq  18.87       Var 0.1286E-03 Newbs.      8
               Min 0.2864          Max 0.3188    expVar 0.5450E-04  Bins  13152
```

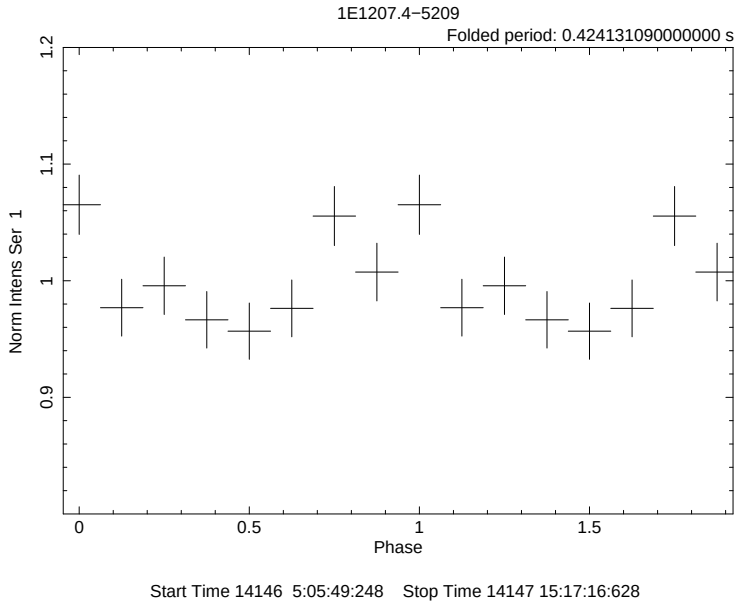

図 52: 2007 年 Psum データについて $\dot{P}$=-1.20841811E-14、P =0.42413109 秒で efold した結果。

10%程度の大きな変動が確認できたが、$\dot{P}$=0 の場合とほとんど差は無い。

$\dot{P} = -2.19450884E - 15$

まず efsearch の結果。

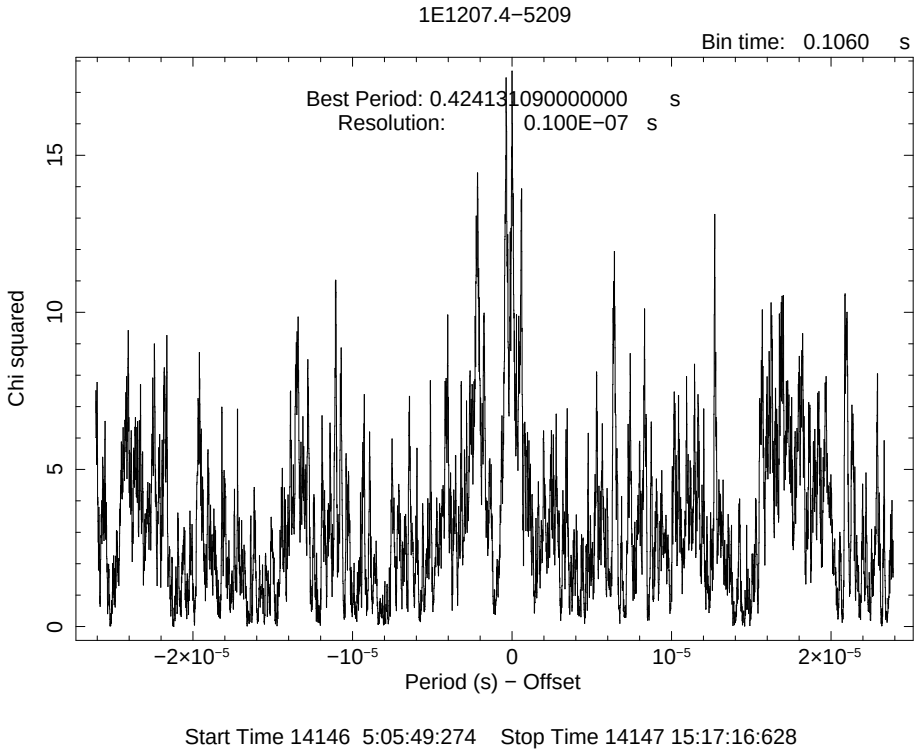

図 53: 2007 年 Psum データの efsearch。$\dot{P}$=-2.19450884E-15、0.00000001 秒の分解能で 5000step。

こちらも $\dot{P}$=0 の場合と比べて少しピークの大きさが大きくなっている様に見える。

次に efsearch で最も高かった周期 (0.42413109) で efold を行った。

```
Epoch[14146.00000] 14146.00000
Period[0.42413123] 0.42413109
Phasebins/Period {value or neg. power of 2}[32] 8
Number of Newbins/Interval[9286991] 2321748

 Intv    1   Start 14146  5: 5:49
    Ser.1     Avg 0.2993        Chisq  18.42       Var 0.1255E-03 Newbs.      8
              Min 0.2840          Max 0.3183    expVar 0.5450E-04  Bins  13152
```

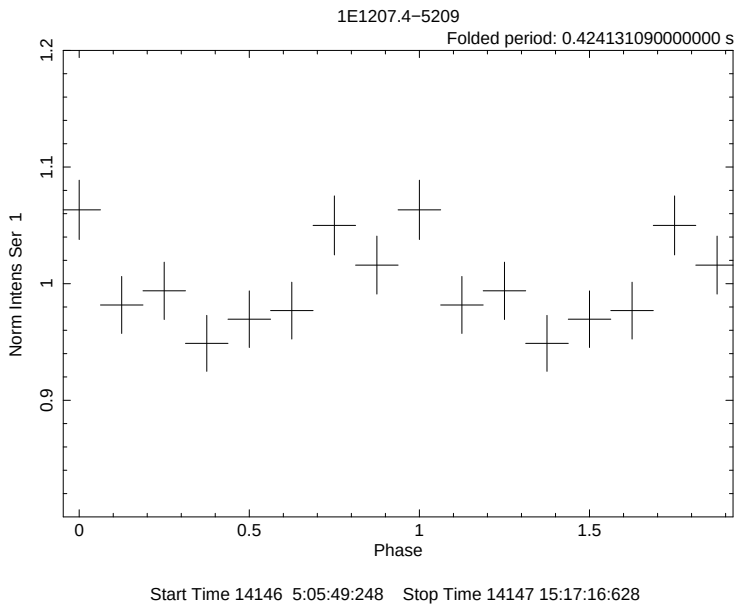

図 54: 2007 年 Psum データについて $\dot{P}$=-1.20841811E-14、P =0.42413109 秒で efold した結果。

10%程度の大きな変動が確認できたが、$\dot{P}$=0 の場合とほとんど差は無い。

結果としては 2 グループとも過去の論文 (Bignami et al. 2002) の Pdot のエラー範囲 (-2.4E-17 から 15.6E-17) ではほとんど Z の値は変わらなかった。しかし、それより外れたところでは Z の値はある程度変化しており、$\dot{P}$=0 では無いところで Z が最大となっていた。また、2006 年と 2007 年で Z が最大になる $\dot{P}$ は一致しておらず、$\dot{P}$ が時間と共に変動している可能性がある。

E　スペクトル解析補足

E.1　すざくスペクトルの様々なモデルでのフィッティング

　ここではすざくスペクトルについて、様々な連続成分、吸収構造の数でフィッティングした結果をまとめている。

星間吸収と連続成分のみ

　まずは星間吸収と連続成分のみでフィッティングを行った。各グループについて連続成分を変えながらフィットしている。以下にモデルごとのフィッティングの結果をまとめる。

wabs(bbodyrad)

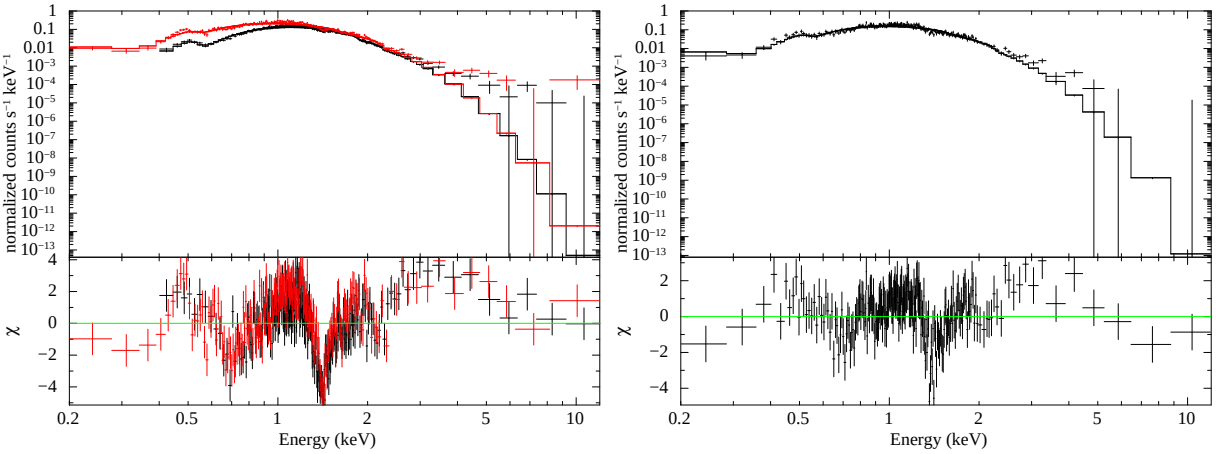

図 55: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

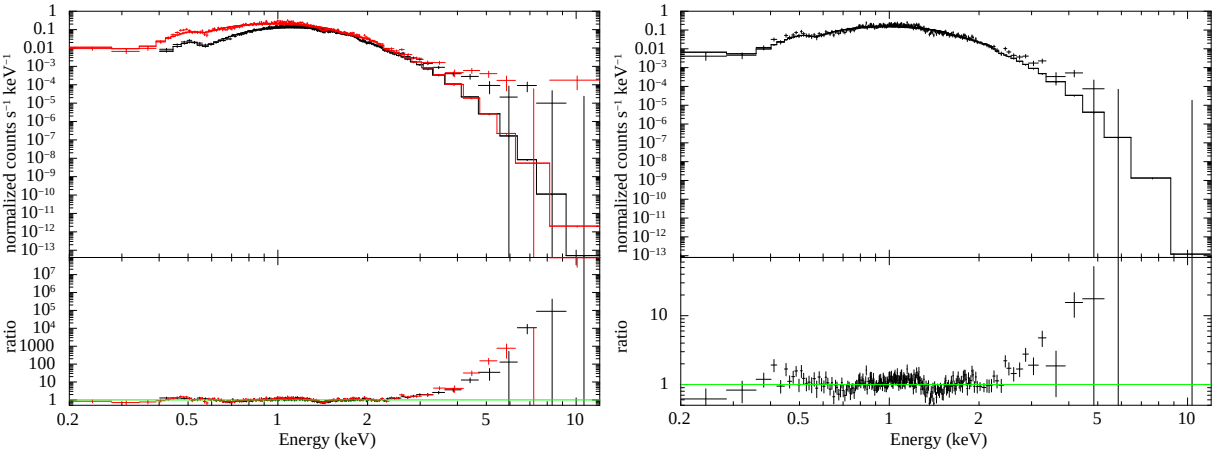

図 56: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

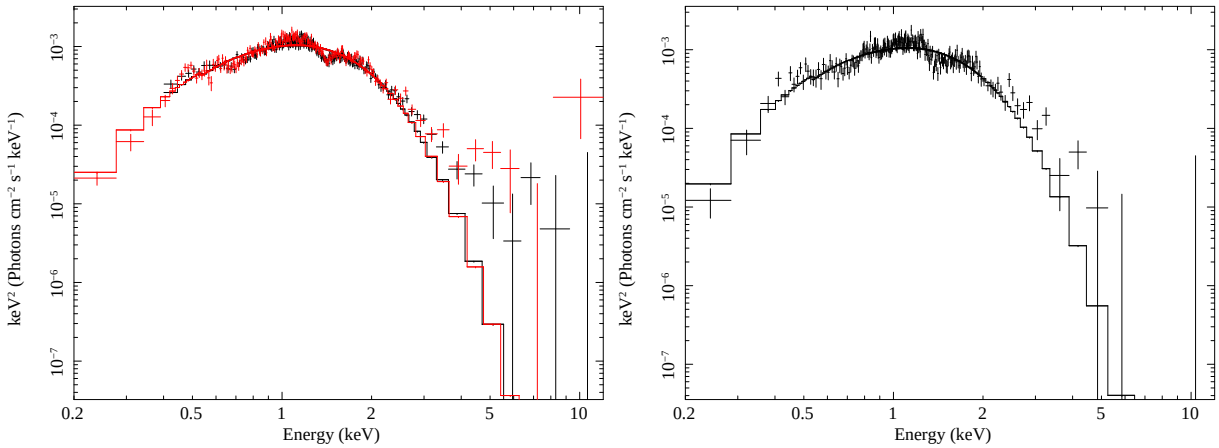

図 57: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 1: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.025\ ^{+0.006}_{-0.005}$	$0.034\ ^{+0.013}_{-0.010}$
bbodyrad	kT	keV	$0.275\ ^{+0.002}_{-0.002}$	$0.272\ ^{+0.006}_{-0.006}$
bbodyrad	norm	—	$39.0\ ^{+2.1}_{-1.9}$	$42.0\ ^{+5.5}_{-4.4}$
		km♯	$1.25\ ^{+0.03}_{-0.03}$	$1.30\ ^{+0.08}_{-0.07}$
$\chi^2/d.o.f$			1348.31/428(3.15)	351.29/217(1.62)
Null hypothesis probability			8.04E-96	2.06E-08
Flux@0.2-12.0 keV		ergs $\mathrm{cm}^{-2}\,\mathrm{s}^{-1}$	2.10E-12 $^{+1.98E-14}_{-2.62E-14}$	2.09E-12 $^{+4.48E-14}_{-6.02E-14}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs $\mathrm{cm}^{-2}\,\mathrm{s}^{-1}$	2.08E-12 $^{+1.94E-14}_{-2.76E-14}$	2.07E-12 $^{+4.17E-14}_{-5.13E-14}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(powerlaw)

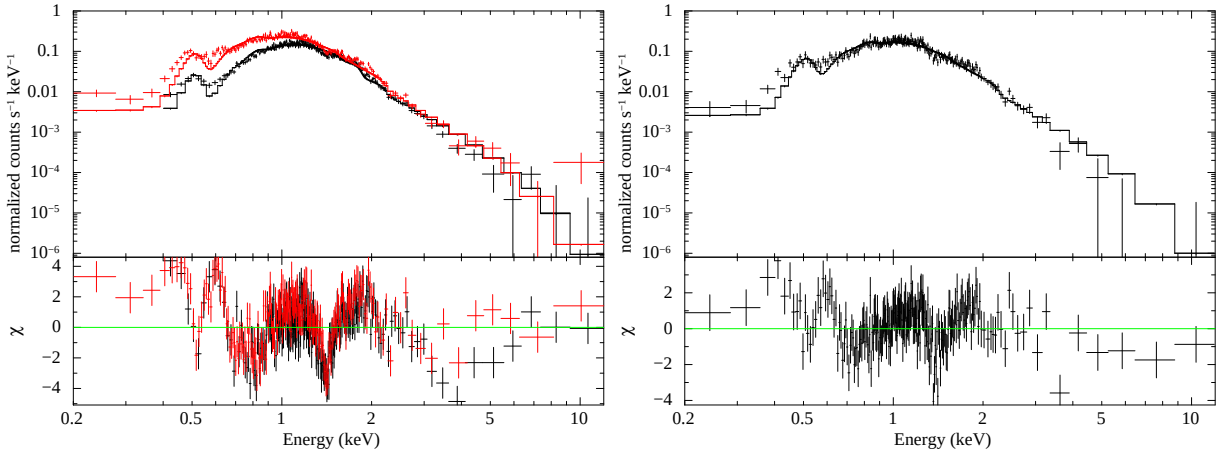

図 58: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

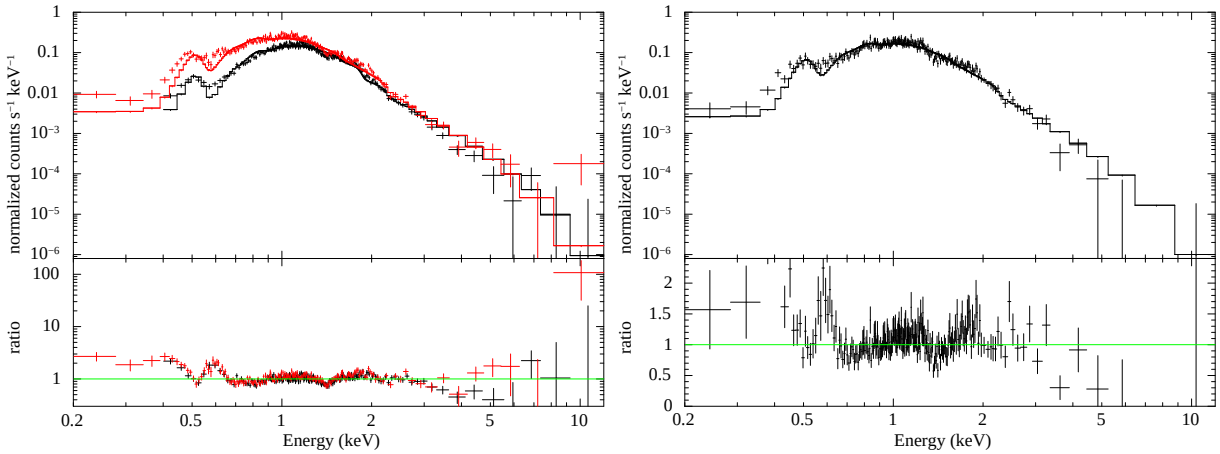

図 59: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

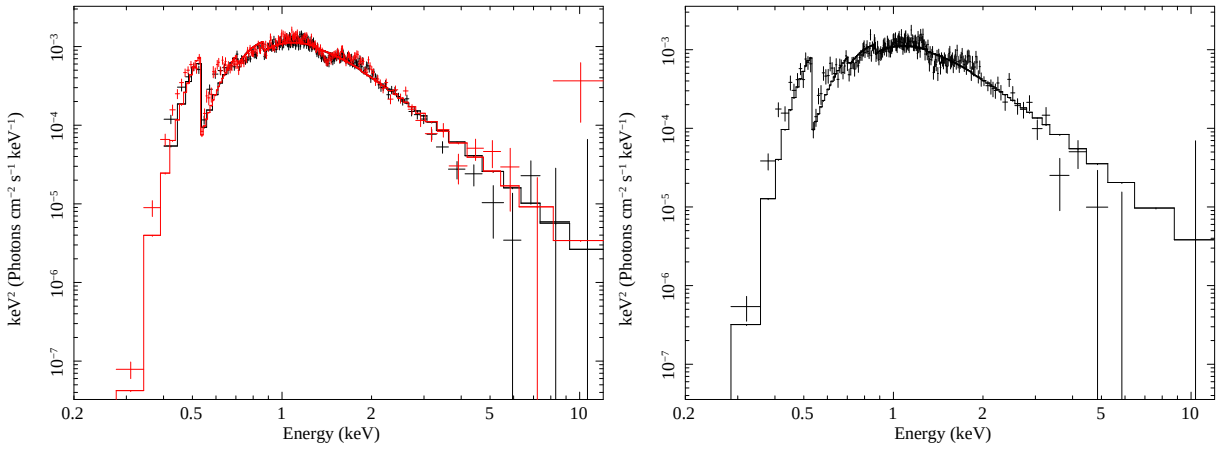

図 60: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 2: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.62\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.57\ ^{+0.03}_{-0.03}$
powerlaw	PhoIndex	—	$5.21\ ^{+0.06}_{-0.06}$	$5.05\ ^{+0.15}_{-0.14}$
powerlaw	norm	—	4.9E-03 $^{+1.9E-04}_{-1.8E-04}$	4.4E-03 $^{+4.3E-04}_{-3.8E-04}$
$\chi^2/d.o.f$			1252.51/428(2.93)	330.05/217(1.52)
Null hypothesis probability			8.04E-82	1.14E-06
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	1.97E-12 $^{+1.40E-14}_{-1.80E-14}$	2.03E-12 $^{+4.46E-14}_{-5.44E-14}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	1.94E-12 $^{+1.69E-14}_{-1.81E-14}$	2.00E-12 $^{+4.12E-14}_{-5.78E-14}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

wabs(cutoffpl)

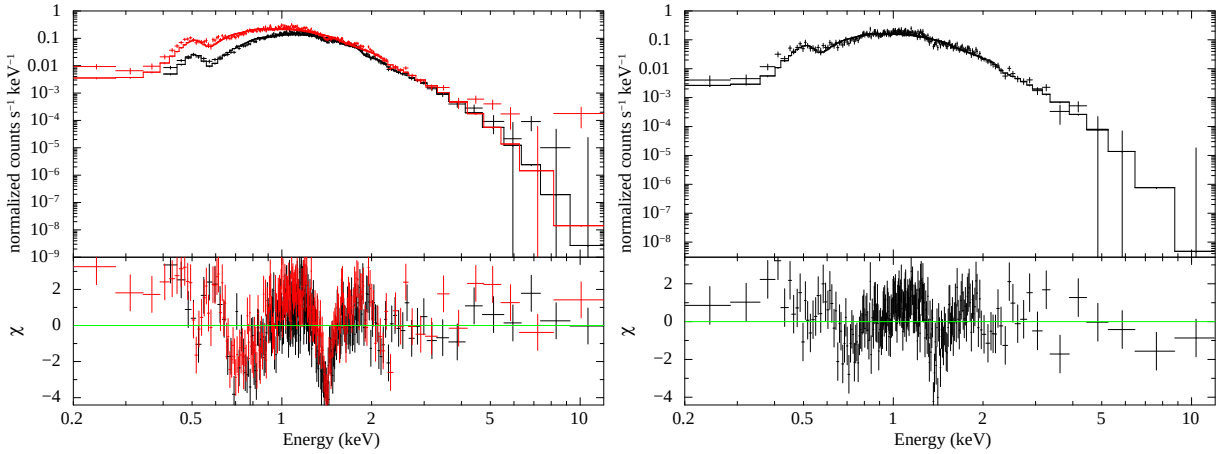

図 61: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

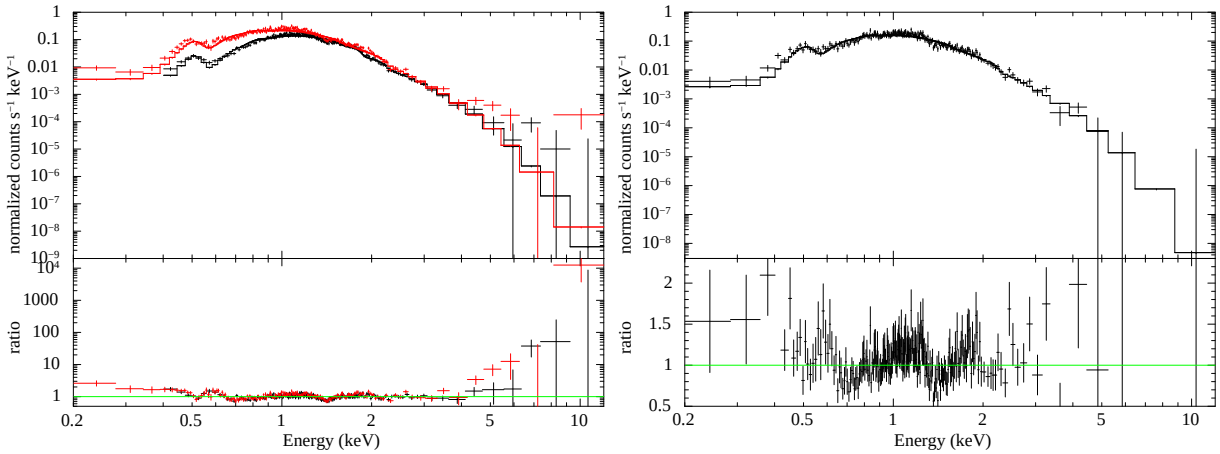

図 62: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

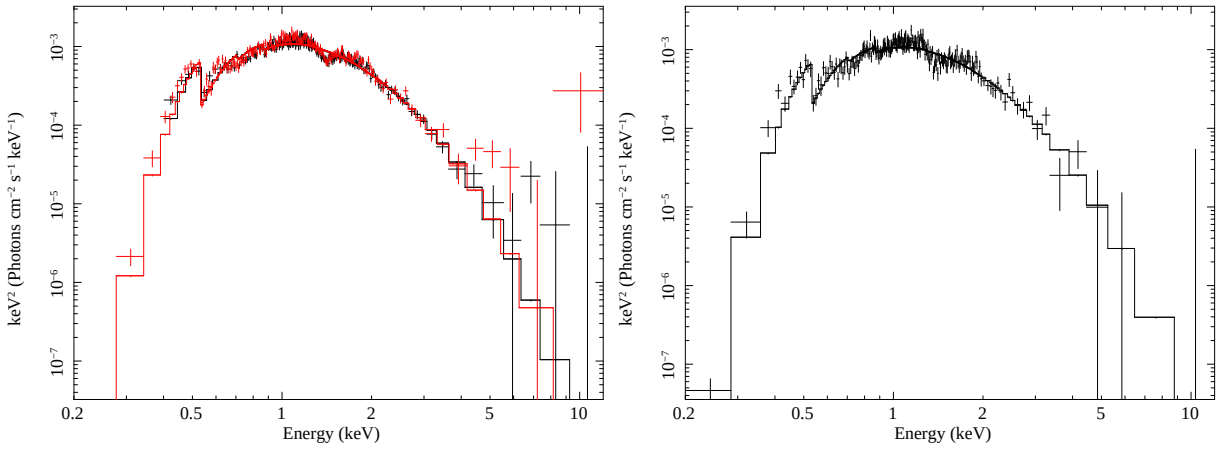

図 63: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 3: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.34\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$0.32\ ^{+0.10}_{-0.09}$
cutoffpl	PhoIndex	—	$2.4\ ^{+0.4}_{-0.4}$	$2.3\ ^{+1.0}_{-1.1}$
cutoffpl	HighECut	keV	$0.76\ ^{+0.31}_{0.05}$	$0.77\ ^{+0.63}_{-0.08}$
cutoffpl	norm	—	9.1E-03 $^{+1.2E-03}_{-1.0E-03}$	8.3E-03 $^{+3.3E-03}_{-2.1E-03}$
$\chi^2/d.o.f$			1121.51/427(2.63)	307.98/216(1.43)
Null hypothesis probability			8.88E-64	3.92E-05
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.006E-12 $^{+2.040E-14}_{-5.960E-14}$	2.051E-12 $^{+2.520E-14}_{-3.698E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	1.999E-12 $^{+1.030E-14}_{-5.070E-14}$	2.043E-12 $^{+1.010E-14}_{-2.799E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

wabs(bbodyrad+bbodyrad)

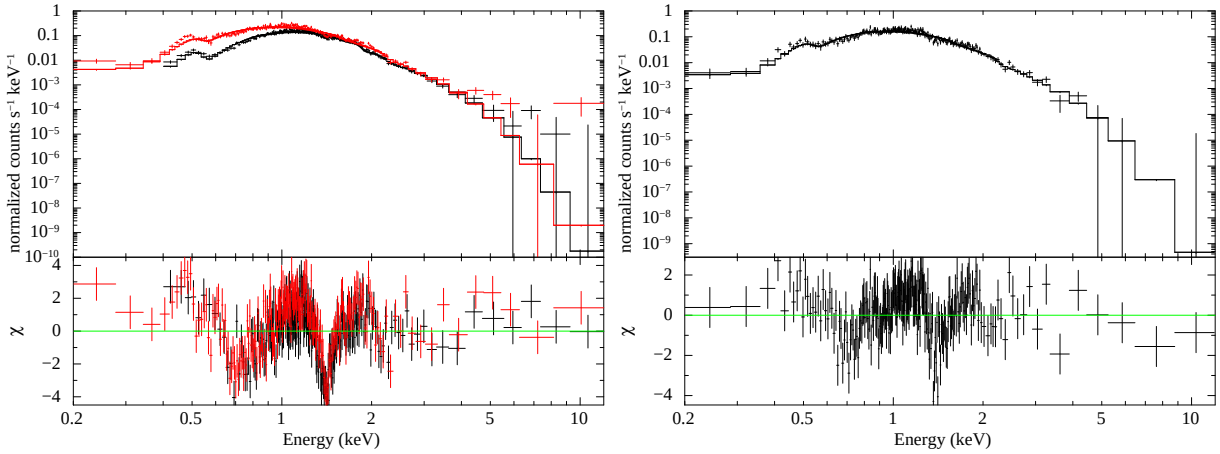

図 64: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

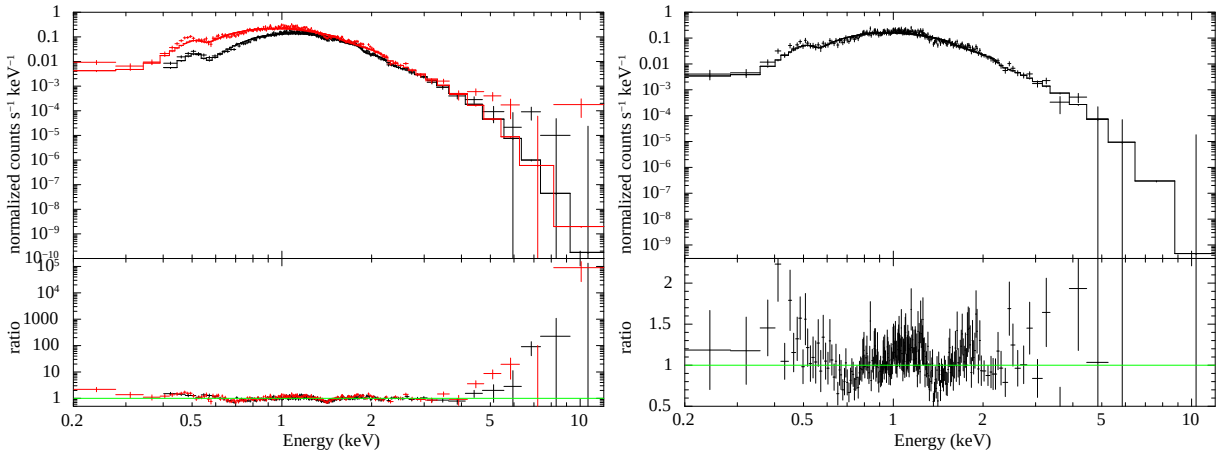

図 65: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

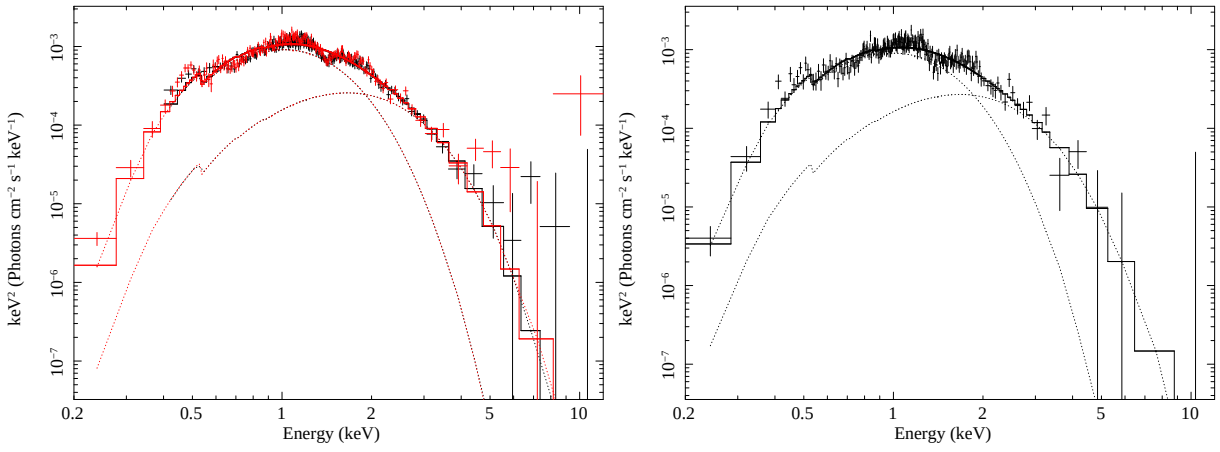

図 66: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 4: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.10\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.09\ ^{+0.05}_{-0.03}$
bbodyrad	kT	keV	$0.22\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.22\ ^{+0.02}_{-0.03}$
bbodyrad	norm	—	$100.1\ ^{+32.7}_{-21.8}$	$96.1\ ^{+78.5}_{-32.5}$
		km♯	$2.0\ ^{+0.3}_{-0.2}$	$2.0\ ^{+0.7}_{-0.4}$
bbodyrad	kT	keV	$0.40\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.41\ ^{+0.09}_{-0.05}$
bbodyrad	norm	—	$2.10\ ^{+1.65}_{-1.05}$	$2.03\ ^{+3.89}_{-1.52}$
		km♯	$0.29\ ^{+0.10}_{-0.09}$	$0.28\ ^{+0.20}_{-0.14}$
$\chi^2/d.o.f$			1129.92/426(2.65)	308.19/215(1.43)
Null hypothesis probability			3.95E-65	3.13E-05
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.06E-12 $^{+1.30E-14}_{-1.62E-13}$	2.10E-12 $^{+-4.20E-15}_{-6.64E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.05E-12 $^{+9.30E-15}_{-2.20E-13}$	2.09E-12 $^{+-3.70E-15}_{-7.25E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(bbodyrad+powerlaw)

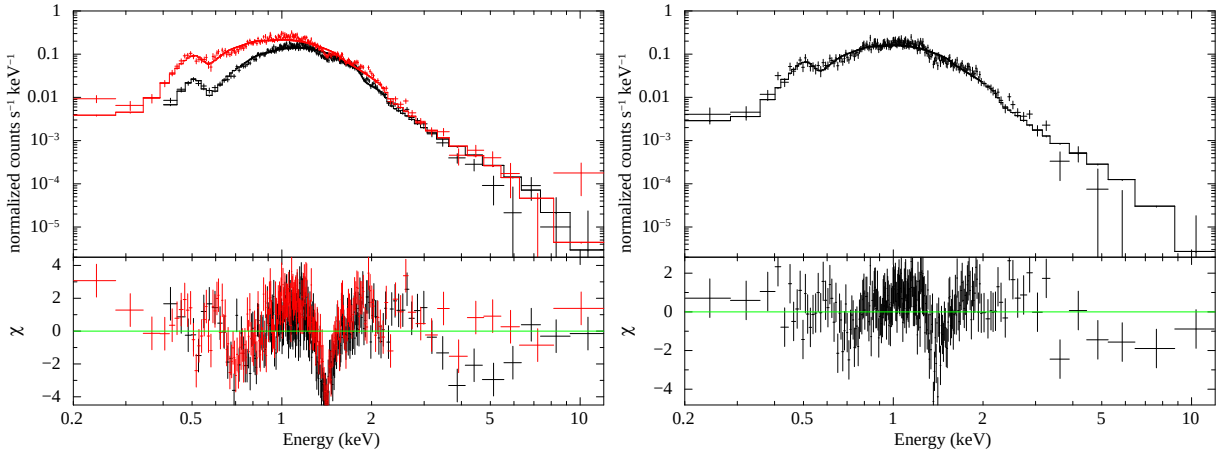

図 67: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

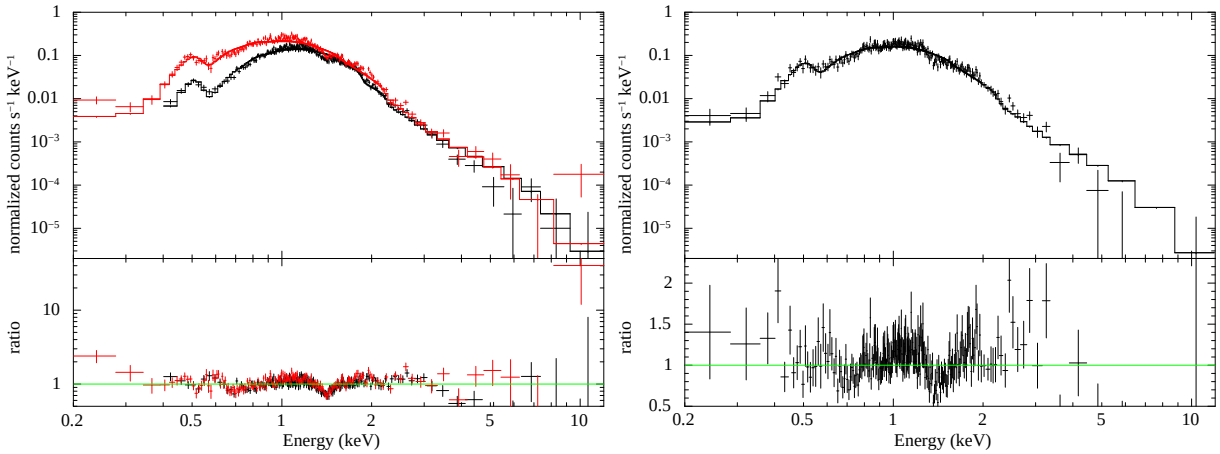

図 68: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

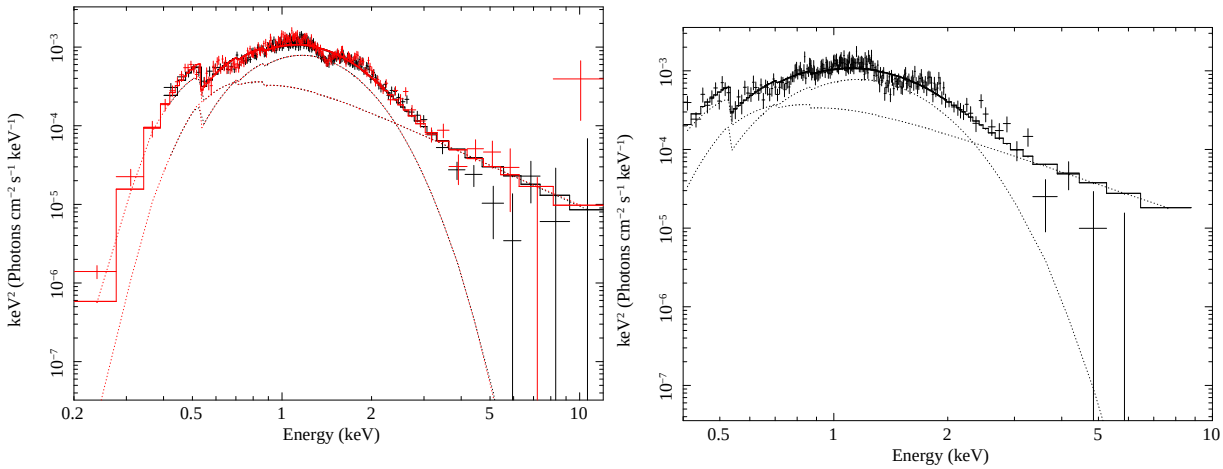

図 69: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 5: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.21\ ^{+0.06}_{-0.05}$	$0.20\ ^{+0.17}_{-0.09}$
bbodyrad	kT	keV	$0.240\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$0.239\ ^{+0.016}_{-0.022}$
bbodyrad	norm	—	$73\ ^{+12}_{-10}$	$73\ ^{+23}_{-20}$
		km♯	$1.7\ ^{+0.1}_{-0.1}$	$1.7\ ^{+0.2}_{-0.3}$
powerlaw	PhoIndex	—	$3.8\ ^{+0.3}_{-0.3}$	$3.7\ ^{+0.7}_{-0.5}$
powerlaw	norm	—	5.3E-04 $^{+2.9E-04}_{-1.8E-04}$	5.4E-04 $^{+1.1E-03}_{-3.1E-04}$
$\chi^2/d.o.f$			1146.28/426(2.69)	314.14/215(1.46)
Null hypothesis probability			2.31E-67	1.18E-05
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.10E-12 $^{+1.65E-14}_{-5.85E-14}$	2.13E-12 $^{+3.96E-14}_{-1.79E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.06E-12 $^{+1.54E-14}_{-3.76E-14}$	2.08E-12 $^{+3.31E-14}_{-1.67E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(bbodyrad+cutoffpl)

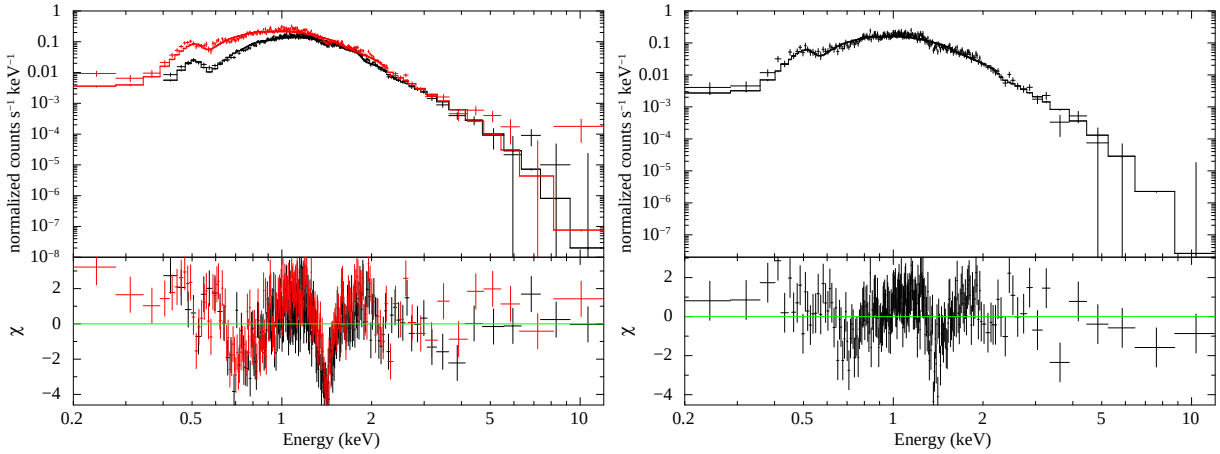

図 70: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

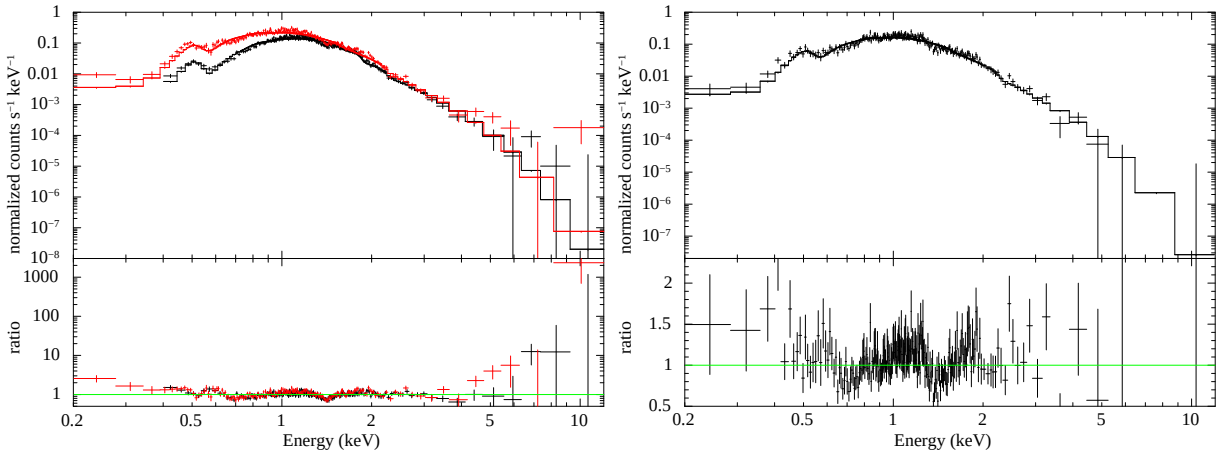

図 71: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

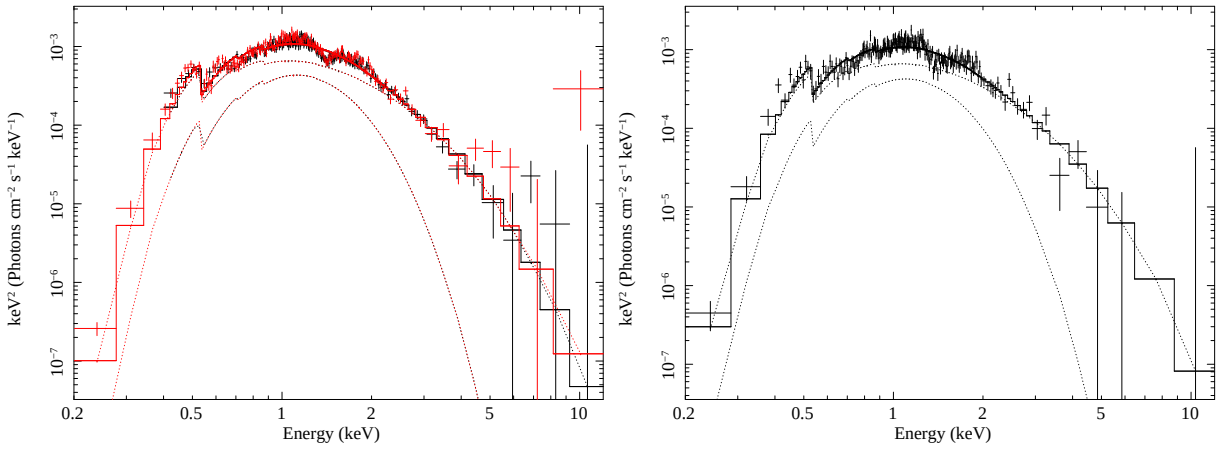

図 72: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 6: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.24\ ^{+0.05}_{-0.05}$	$0.22\ ^{+0.11}_{-0.09}$
bbodyrad	kT	keV	$0.22\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.22\ ^{+0.02}_{-0.04}$
bbodyrad	norm	—	$68.4\ ^{+15.9}_{-14.7}$	$68.3\ ^{+61.2}_{-38.4}$
		km♯	$1.7\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$1.7\ ^{+0.6}_{-0.6}$
cutoffpl	PhoIndex	—	$2.3\ ^{+0.5}_{-0.5}$	$2.1\ ^{+1.1}_{-1.3}$
cutoffpl	HighECut	keV	$0.97\ ^{+0.36}_{-0.19}$	$0.95\ ^{+1.04}_{-0.31}$
cutoffpl	norm	—	3.3E-03 $^{+1.8E-03}_{-1.2E-03}$	3.2E-03 $^{+4.0E-03}_{-2.0E-03}$
$\chi^2/d.o.f$			1095.19/425(2.58)	302.32/214(1.41)
Null hypothesis probability			1.17E-60	6.58E-05
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.04E-12 $^{+5.62E-14}_{-1.49E-13}$	2.08E-12 $^{+1.18E-13}_{-7.53E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.03E-12 $^{+5.56E-14}_{-1.48E-13}$	2.07E-12 $^{+5.47E-14}_{-7.87E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

ガウス型吸収構造を 1 本入れた場合

まず、1.4keV 付近に見える大きな吸収構造についてガウス型の吸収構造 (gabs) でフィッティングし、度の連続成分がもっともらしいか確かめた。以下に結果をまとめる。

wabs(bbodyrad)*gabs

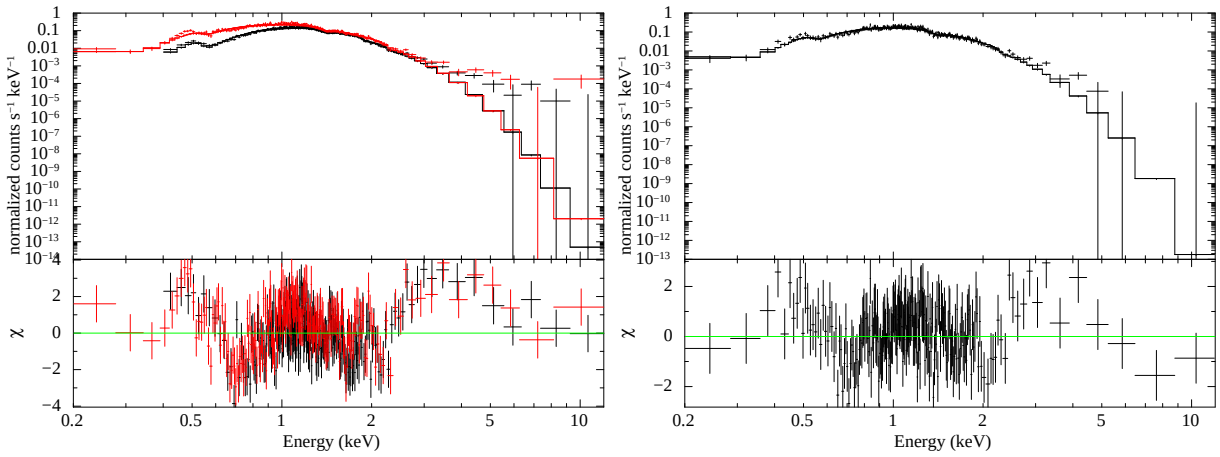

図 73: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

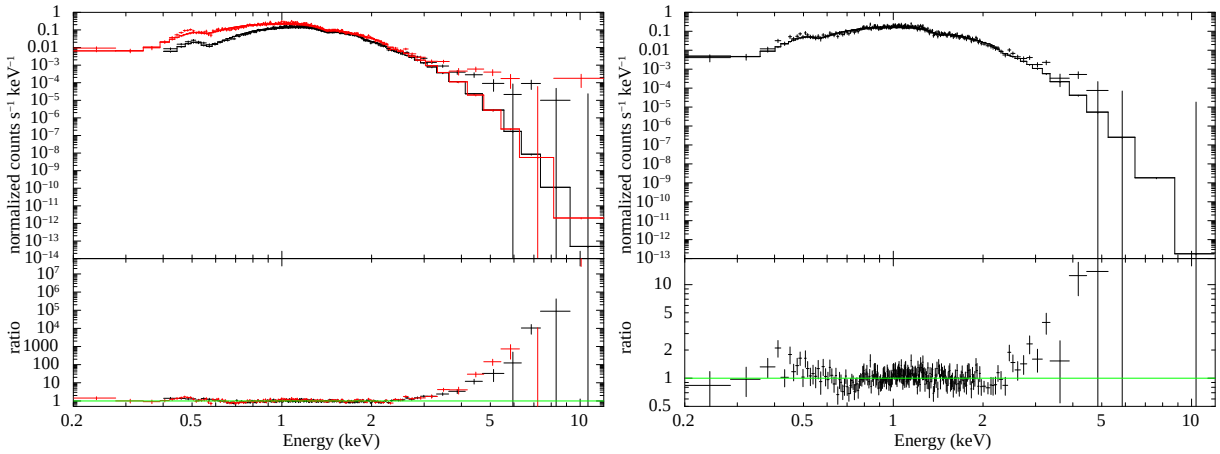

図 74: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

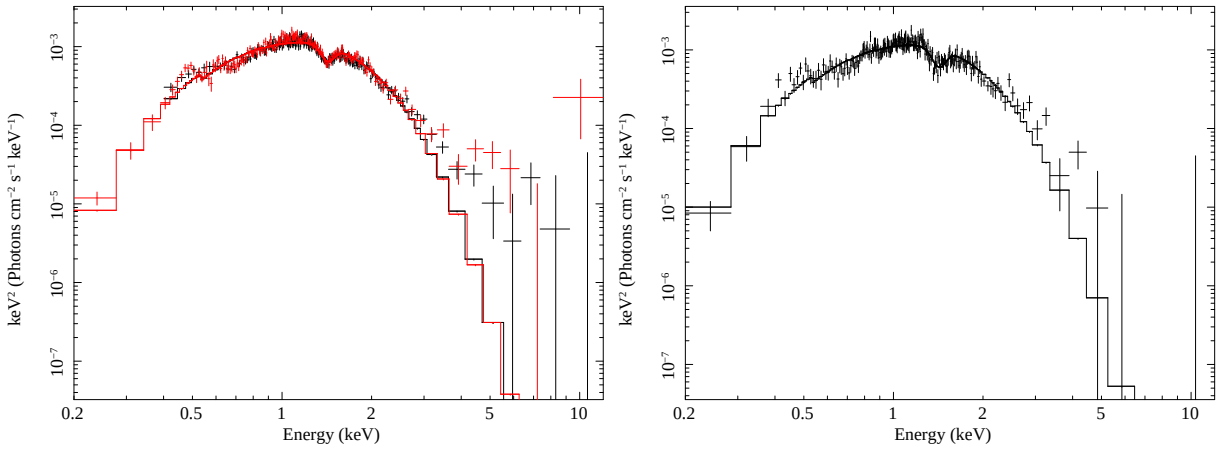

図 75: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

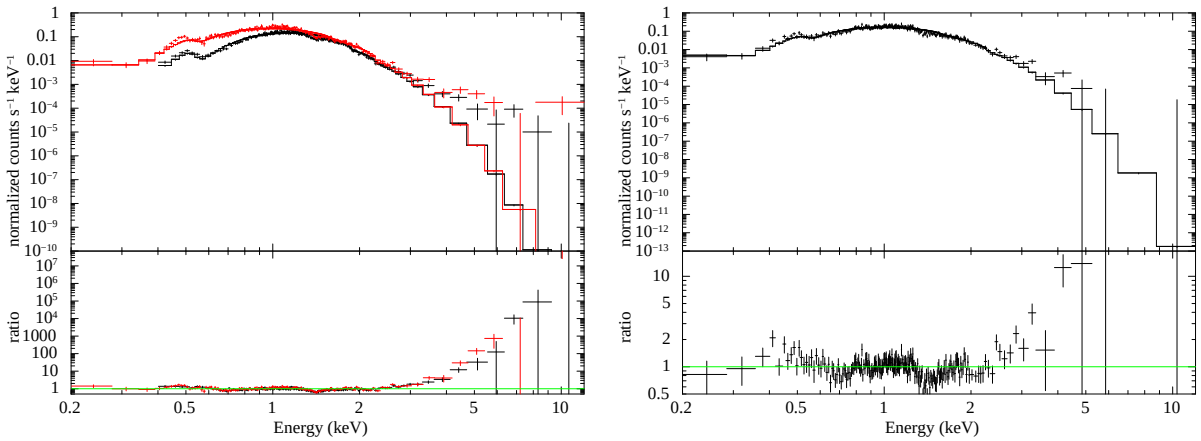

図 76: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 7: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.052\ ^{+0.010}_{-0.009}$	$0.051\ ^{+0.019}_{-0.015}$
bbodyrad	kT	keV	$0.273\ ^{+0.003}_{-0.003}$	$0.275\ ^{+0.006}_{-0.006}$
bbodyrad	norm	—	$45.1\ ^{+3.2}_{-2.8}$	$45.1\ ^{+6.9}_{-5.3}$
		km♯	$1.34\ ^{+0.05}_{-0.04}$	$1.34\ ^{+0.10}_{-0.08}$
gabs	LineE	keV	$1.425\ ^{+0.010}_{-0.009}$	$1.422\ ^{+0.023}_{-0.020}$
gabs	Sigma	keV	$0.076\ ^{+0.011}_{-0.010}$	$0.077\ ^{+0.023}_{-0.020}$
gabs	Tau	—	$0.082\ ^{+0.010}_{-0.009}$	$0.102\ ^{+0.025}_{-0.022}$
$\chi^2/d.o.f$			839.94/425(1.98)	242.91/214(1.14)
Null hypothesis probability			1.62E-29	8.52E-02
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.079E-12 $^{+3.120E-14}_{-2.680E-14}$	2.105E-12 $^{+4.540E-14}_{-6.560E-14}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.070E-12 $^{+2.640E-14}_{-2.260E-14}$	2.095E-12 $^{+3.900E-14}_{-4.800E-14}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(powerlaw)*gabs

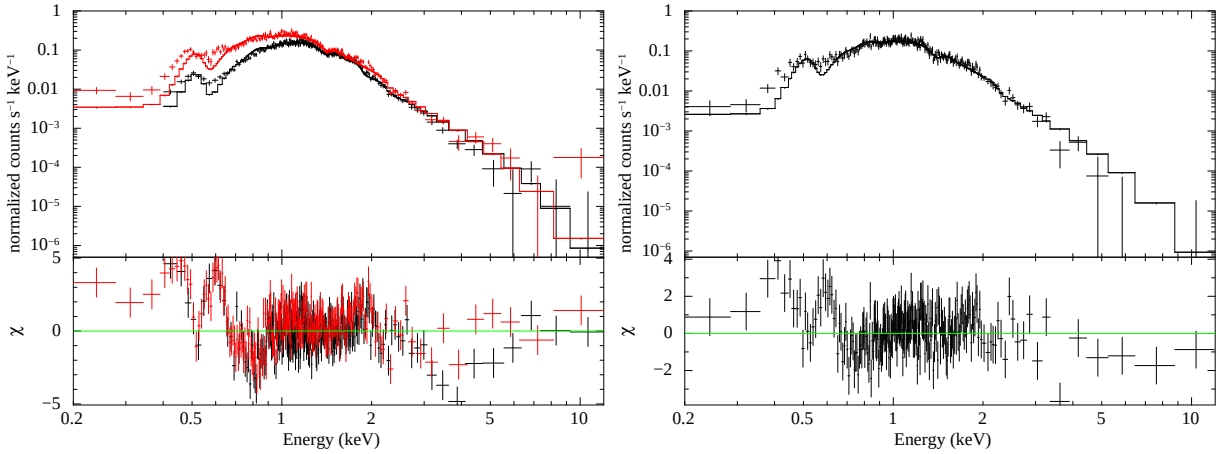

図 77: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

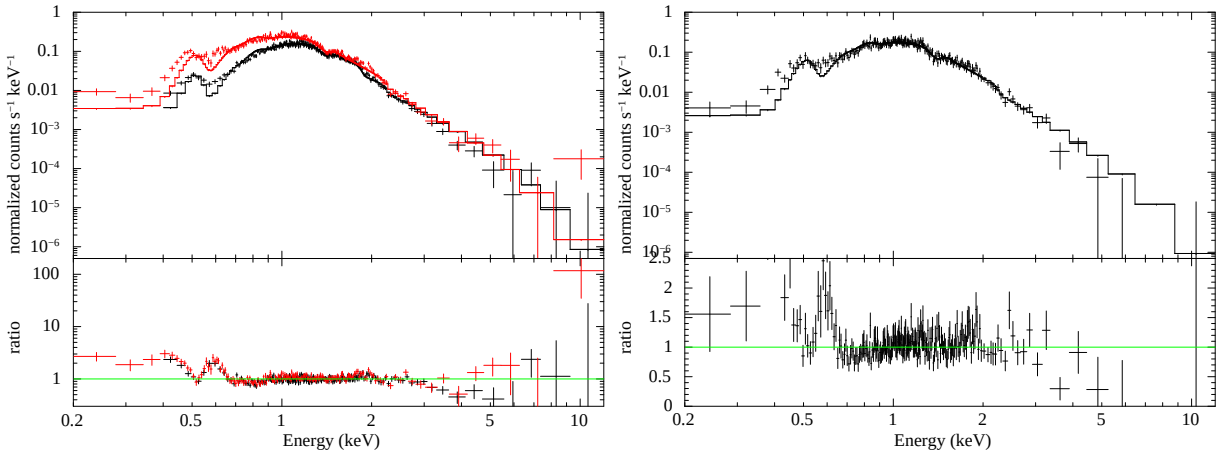

図 78: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

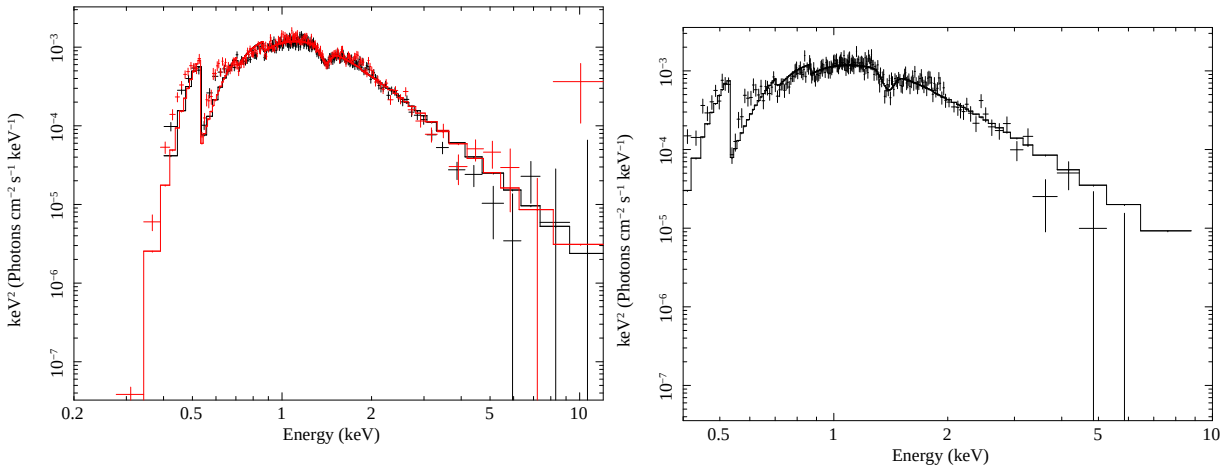

図 79: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

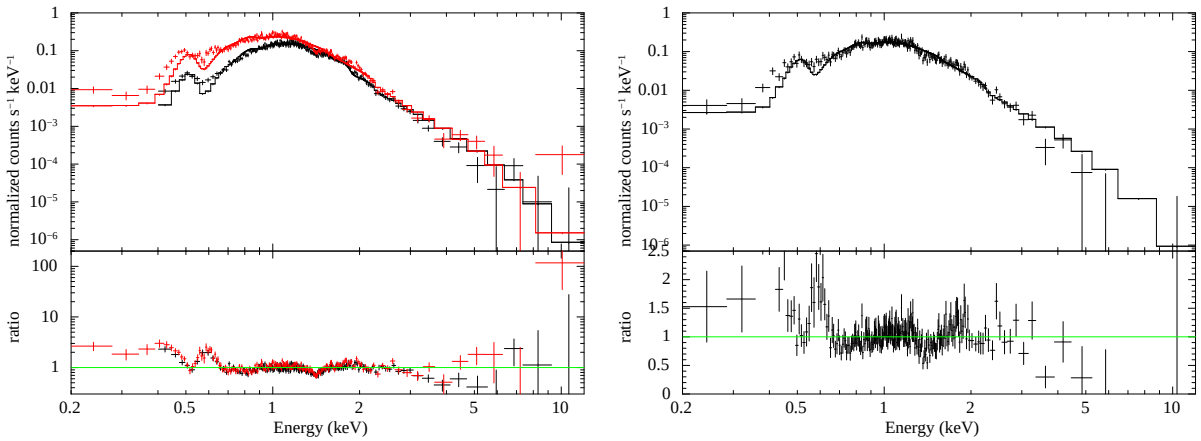

図 80: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 8: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	10^{22}cm^{-2}	$0.66\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.61\ ^{+0.04}_{-0.03}$
powerlaw	PhoIndex	—	$5.31\ ^{+0.06}_{-0.06}$	$5.14\ ^{+0.15}_{-0.14}$
powerlaw	norm	—	5.6E-03 $^{+2.6E-04}_{-2.4E-04}$	5.0E-03 $^{+5.5E-04}_{-4.8E-04}$
gabs	LineE	keV	$1.402\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$1.395\ ^{+0.022}_{-0.020}$
gabs	Sigma	keV	$0.05\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.05\ ^{+0.02}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.048\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$0.058\ ^{+0.019}_{-0.016}$
$\chi^2/d.o.f$			1015.77/425(2.39)	280.12/214(1.31)
Null hypothesis probability			2.63E-50	1.60E-03
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	1.96E-12 $^{+2.17E-14}_{-1.63E-14}$	2.03E-12 $^{+3.28E-14}_{-5.02E-14}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	1.93E-12 $^{+1.76E-14}_{-1.74E-14}$	2.00E-12 $^{+3.77E-14}_{-3.83E-14}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

wabs(cutoffpl)*gabs

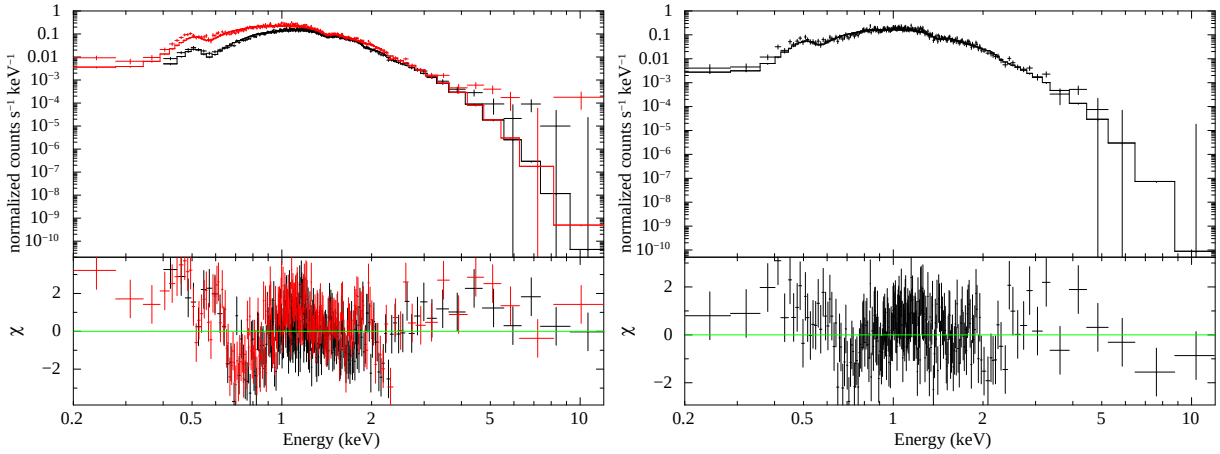

図 81: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

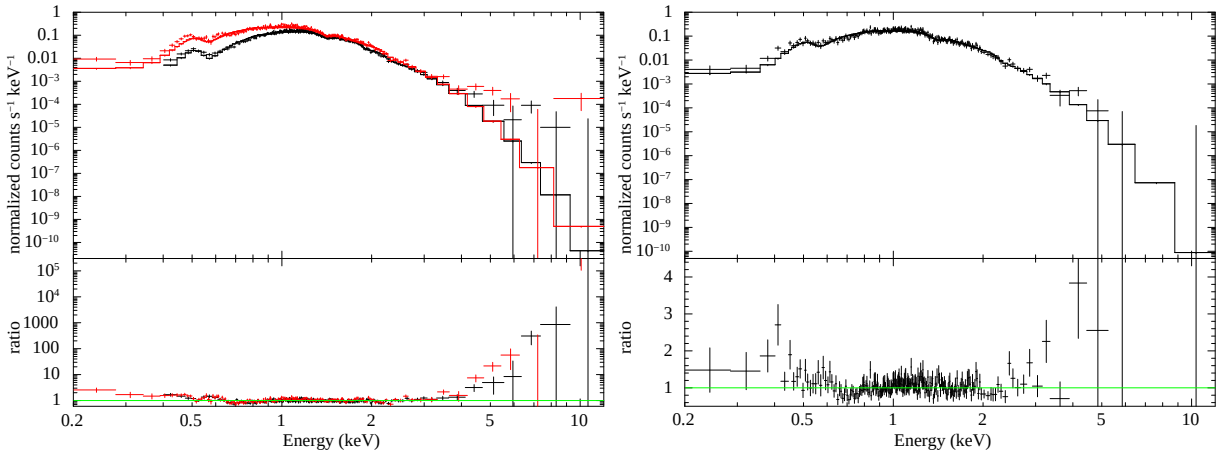

図 82: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

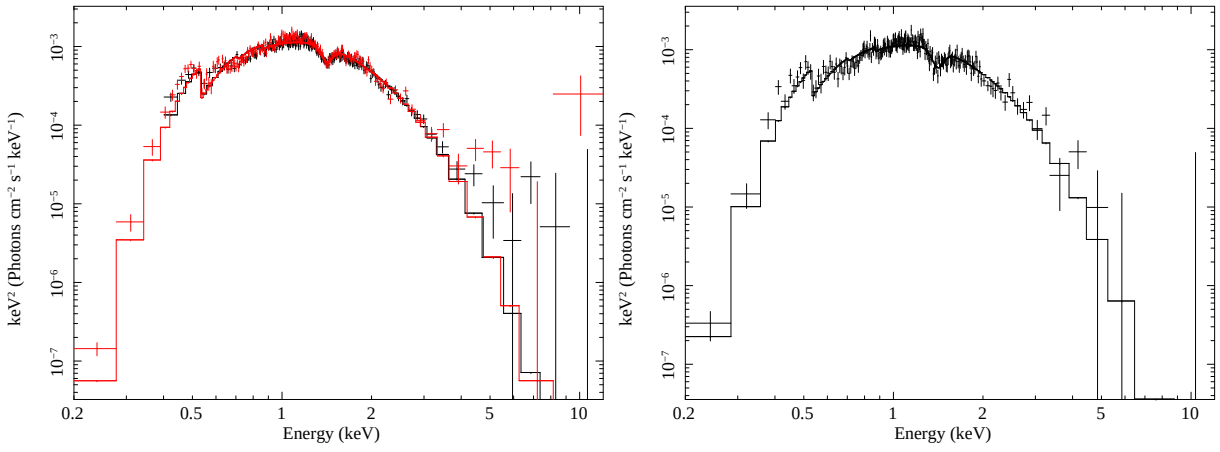

図 83: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

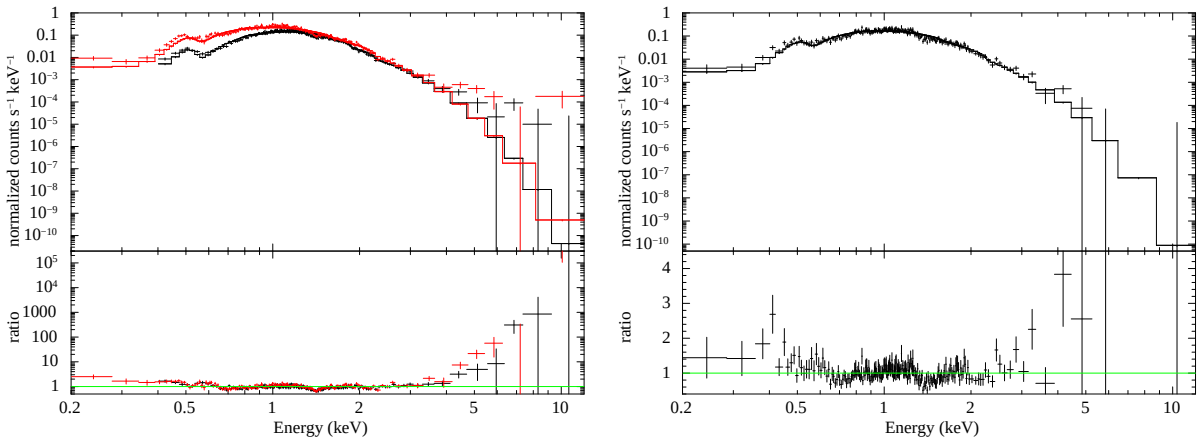

図 84: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 9: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.24\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$0.21\ ^{+0.11}_{-0.03}$
cutoffpl	PhoIndex	—	$0.73\ ^{+0.82}_{-0.04}$	$0.57\ ^{+0.11}_{-0.09}$
cutoffpl	HighECut	keV	$0.46\ ^{+0.73}_{-0.34}$	$0.45\ ^{+0.83}_{-0.25}$
cutoffpl	norm	—	$0.018\ ^{+2.6E-04}_{-3.7E-04}$	$0.017\ ^{+3.8E-04}_{-0.006}$
gabs	LineE	keV	$1.415\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$1.412\ ^{+0.022}_{-0.020}$
gabs	Sigma	keV	$0.062\ ^{+0.010}_{-0.009}$	$0.064\ ^{+0.023}_{-0.021}$
gabs	Tau	—	$0.064\ ^{+0.008}_{-0.007}$	$0.080\ ^{+0.022}_{-0.020}$
$\chi^2/d.o.f$			795.43/424(1.88)	239.25/213(1.12)
Null hypothesis probability			5.78E-25	1.05E-01
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.02E-12 $^{+1.97E-14}_{-6.73E-14}$	2.07E-12 $^{+2.29E-14}_{-2.95E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.01E-12 $^{+1.57E-14}_{-5.53E-14}$	2.07E-12 $^{+3.24E-14}_{-3.21E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs

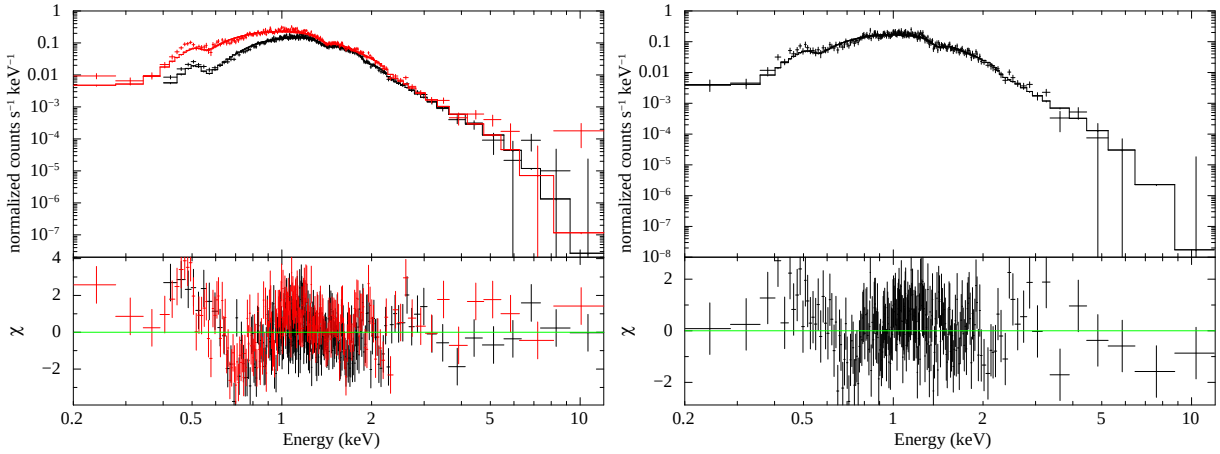

図 85: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

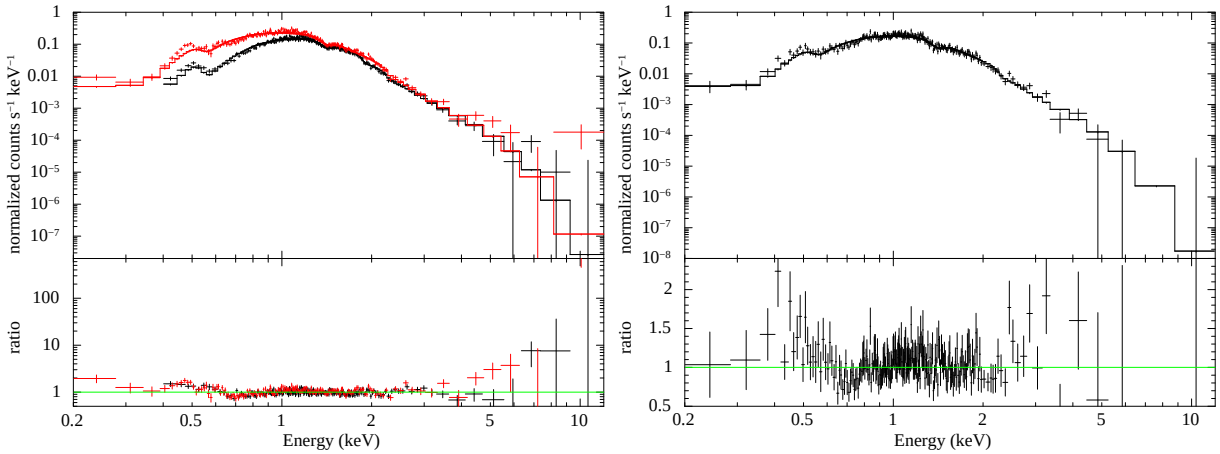

図 86: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

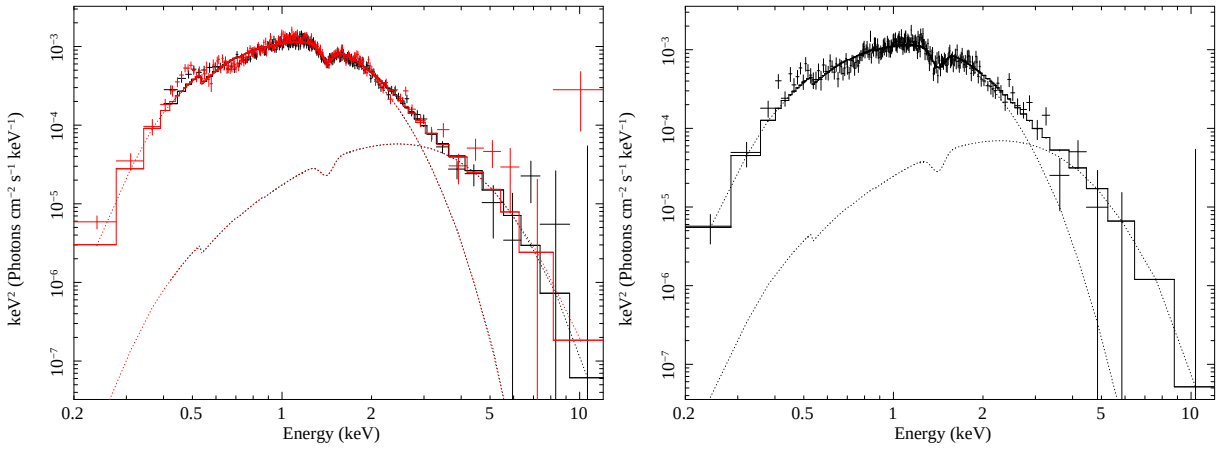

図 87: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

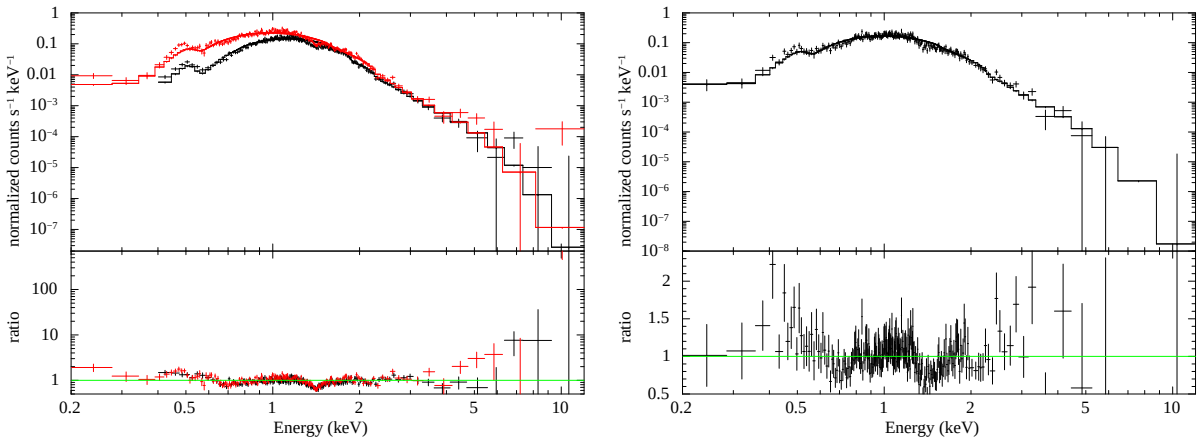

図 88: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 10: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	10^{22}cm^{-2}	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.07\ ^{+0.03}_{-0.02}$
bbodyrad	kT	keV	$0.258\ ^{+0.005}_{-0.006}$	$0.259\ ^{+0.011}_{-0.016}$
bbodyrad	norm	—	$60.4\ ^{+7.7}_{-6.1}$	$57.7\ ^{+18.5}_{-10.8}$
		km$^\sharp$	$1.6\ ^{+0.1}_{-0.1}$	$1.5\ ^{+0.2}_{-0.1}$
bbodyrad	kT	keV	$0.62\ ^{+0.11}_{-0.09}$	$0.57\ ^{+0.27}_{-0.15}$
bbodyrad	norm	—	$0.08\ ^{+0.13}_{-0.05}$	$0.13\ ^{+0.96}_{-0.12}$
		km$^\sharp$	$0.06\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.07\ ^{+0.14}_{-0.05}$
gabs	LineE	keV	$1.418\ ^{+0.009}_{-0.008}$	$1.415\ ^{+0.022}_{-0.020}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.07\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.09\ ^{+0.02}_{-0.02}$
$\chi^2/d.o.f$			727.44/423(1.72)	228.14/212(1.08)
Null hypothesis probability			1.84E-18	2.13E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.07E-12 $^{+1.43E-14}_{-7.87E-14}$	2.12E-12 $^{+1.22E-14}_{-2.73E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.06E-12 $^{+1.45E-14}_{-6.55E-14}$	2.10E-12 $^{+2.16E-14}_{-3.15E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
$\sharp$ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(bbodyrad+powerlaw)*gabs

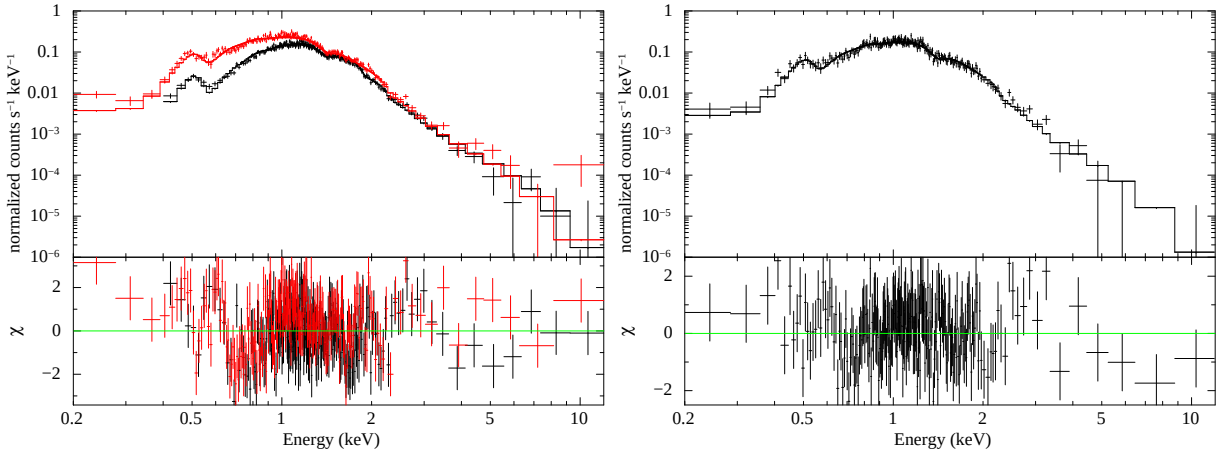

図 89: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

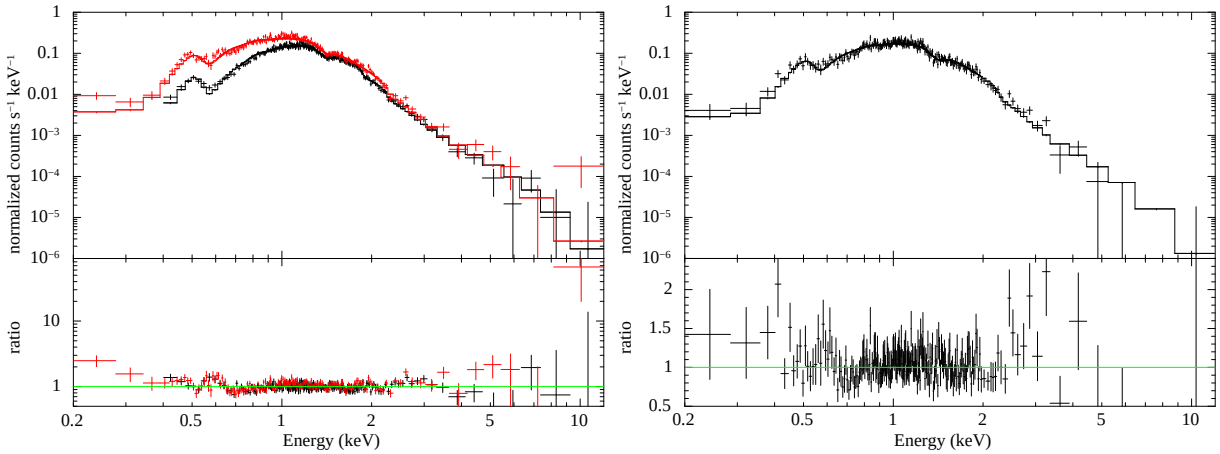

図 90: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

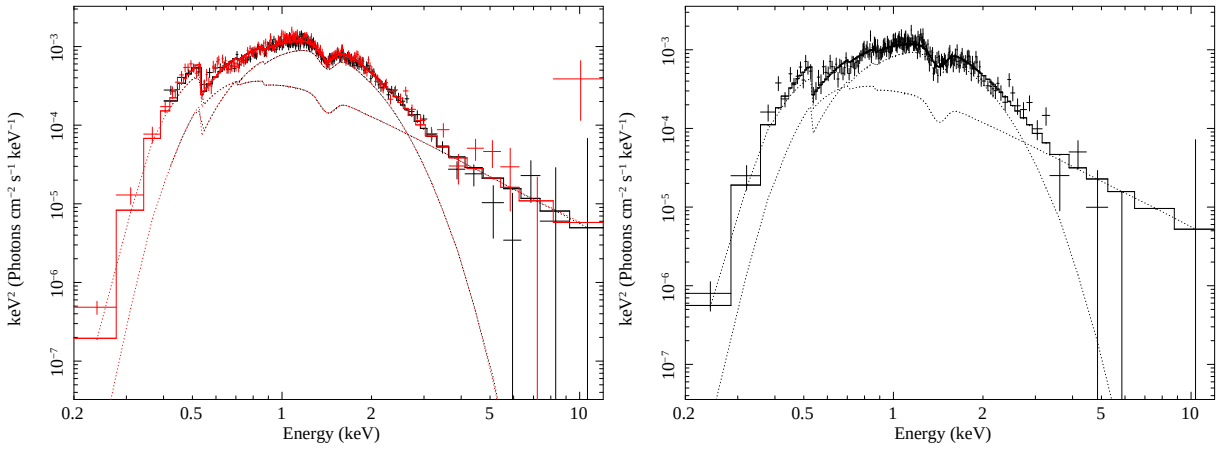

図 91: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

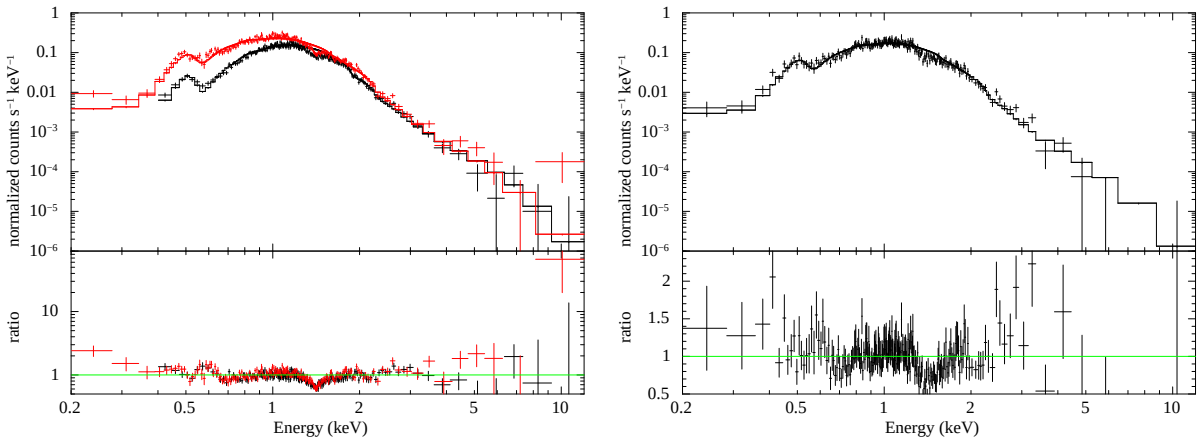

図 92: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 11: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	10^{22}cm^{-2}	0.25 $^{+0.04}_{-0.03}$	0.23 $^{+0.08}_{-0.07}$
bbodyrad	kT	keV	0.244 $^{+0.005}_{-0.005}$	0.248 $^{+0.011}_{-0.011}$
bbodyrad	norm	—	83 $^{+9}_{-8}$	77 $^{+21}_{-16}$
		km$^\sharp$	1.82 $^{+0.10}_{-0.09}$	1.75 $^{+0.22}_{-0.19}$
powerlaw	PhoIndex	—	4.0 $^{+0.2}_{-0.2}$	4.0 $^{+0.4}_{-0.4}$
powerlaw	norm	—	5.8E-04 $^{+1.7E-04}_{-1.3E-04}$	5.2E-04 $^{+4.0E-04}_{-2.4E-04}$
gabs	LineE	keV	1.420 $^{+0.009}_{-0.009}$	1.419 $^{+0.022}_{-0.020}$
gabs	Sigma	keV	0.08 $^{+0.01}_{-0.01}$	0.08 $^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	0.09 $^{+0.01}_{-0.01}$	0.11 $^{+0.03}_{-0.02}$
$\chi^2/d.o.f$			630.12/423(1.49)	208.29/212(0.98)
Null hypothesis probability			2.33E-10	5.59E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.08E-12 $^{+1.59E-14}_{-7.61E-14}$	2.12E-12 $^{+3.15E-14}_{-1.37E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.05E-12 $^{+2.17E-14}_{-3.63E-14}$	2.09E-12 $^{+3.57E-14}_{-1.61E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
$\sharp$ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(bbodyrad+cutoffpl)*gabs

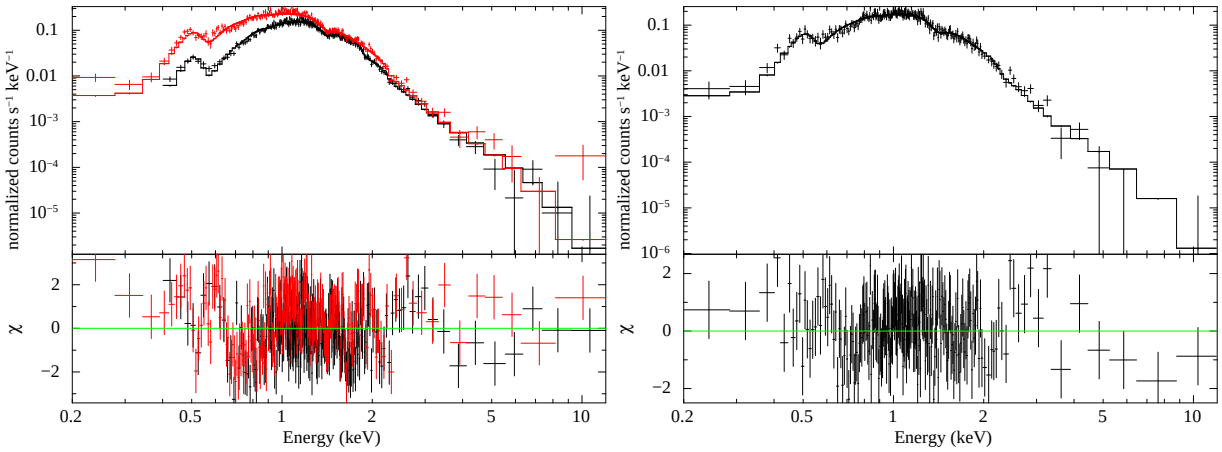

図 93: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

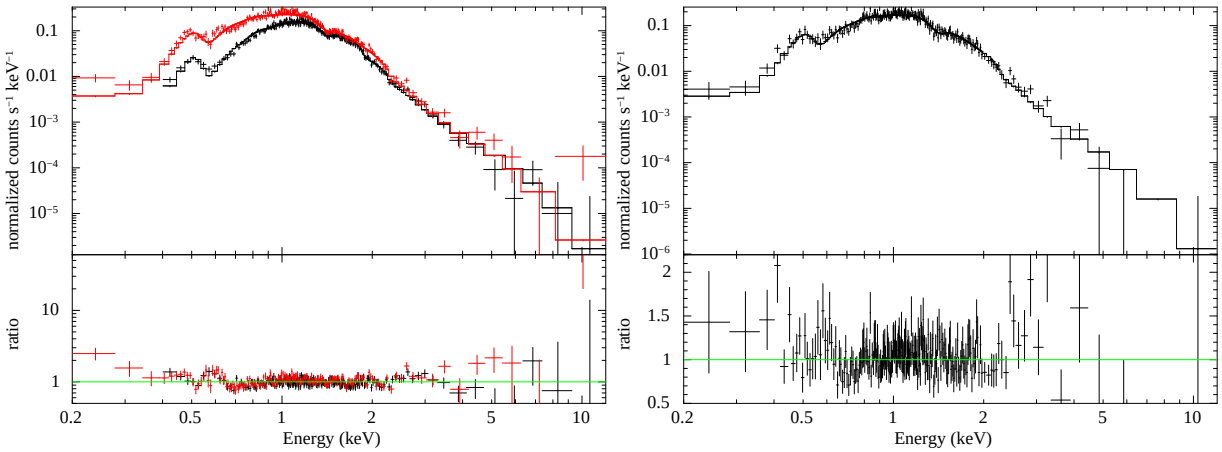

図 94: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

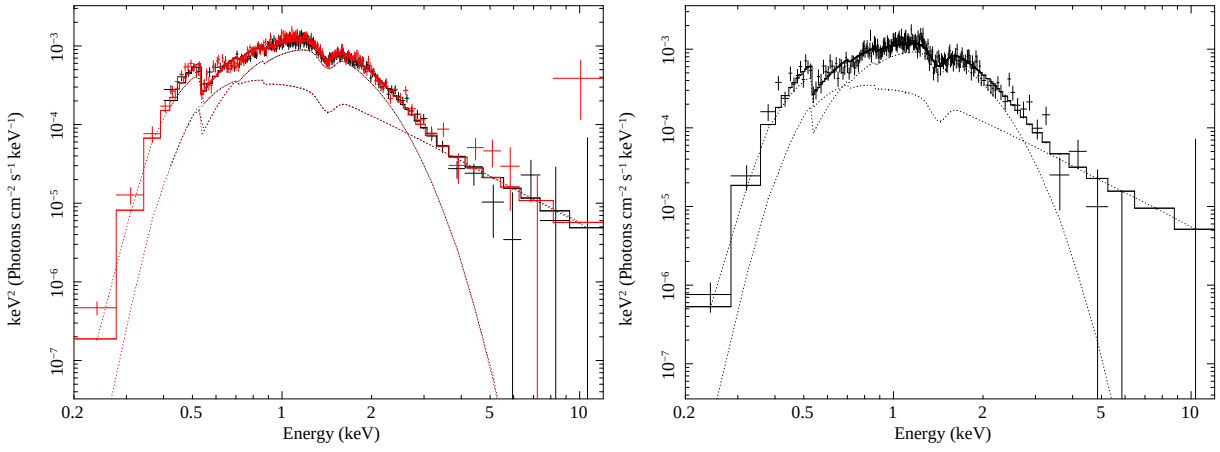

図 95: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

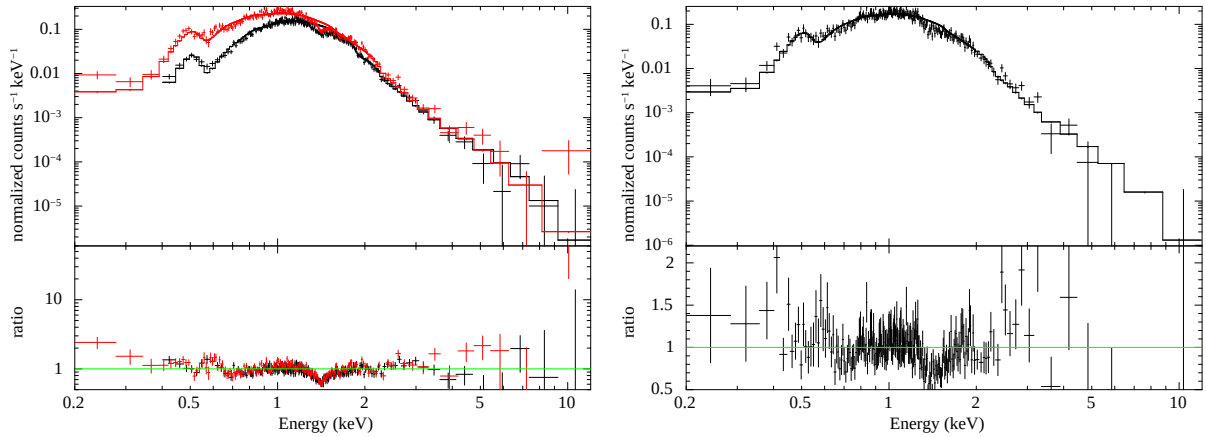

図 96: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 12: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	Group1	Group2
wabs	nH	10^{22}cm^{-2}	$0.25\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.23\ ^{+0.08}_{-0.07}$
bbodyrad	kT	keV	$0.243\ ^{+0.004}_{-0.004}$	$0.248\ ^{+0.011}_{-0.011}$
bbodyrad	norm	—	$83\ ^{+9}_{-8}$	$77\ ^{+20}_{-16}$
		km$^\sharp$	$1.82\ ^{+0.09}_{-0.09}$	$1.75\ ^{+0.22}_{-0.20}$
cutoffpl	PhoIndex	—	$4.0\ ^{+0.2}_{-0.2}$	$4.0\ ^{+0.41}_{-0.8}$
cutoffpl	HighECut	keV	$500\ ^{----}_{----}$	$500\ ^{----}_{----}$
cutoffpl	norm	—	$5.9\text{E-}04\ ^{+1.6E-04}_{-1.4E-04}$	$5.3\text{E-}04\ ^{+5.6E-04}_{-2.5E-04}$
gabs	LineE	keV	$1.420\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$1.419\ ^{+0.022}_{-0.020}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.11\ ^{+0.03}_{-0.02}$
$\chi^2/d.o.f$			630.17/422(1.49)	208.30/211(0.99)
Null hypothesis probability			1.88E-10	5.40E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	$2.08\text{E-}12\ ^{+3.46E-14}_{-9.53E-13}$	$2.12\text{E-}12\ ^{+2.97E-14}_{-1.03E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	$2.05\text{E-}12\ ^{+1.90E-14}_{-9.47E-13}$	$2.09\text{E-}12\ ^{+4.37E-14}_{-1.06E-12}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
$\sharp$ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

ガウス型吸収構造を 2 本入れた場合

1.4keV 付近に加え 0.7keV の吸収構造についてガウス型の吸収構造 (gabs) でフィッティングし、度の連続成分がもっともらしいか確かめた。以下に結果をまとめる。

wabs(bbodyrad)*gabs*gabs

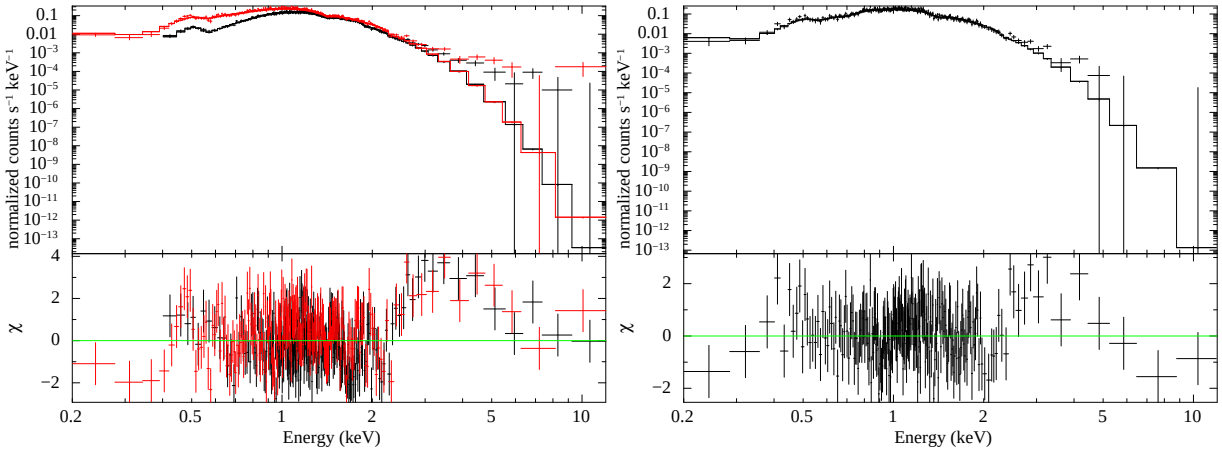

図 97: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

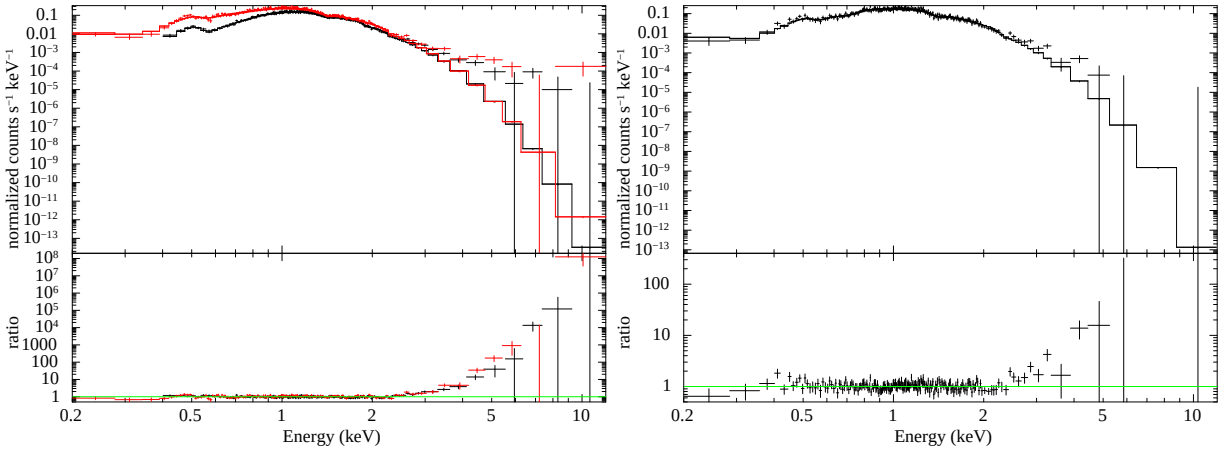

図 98: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

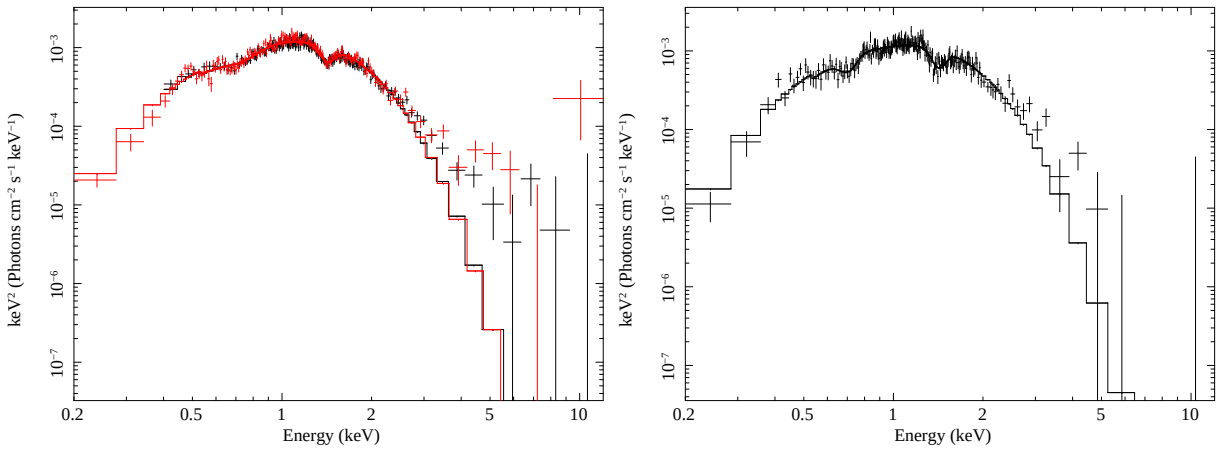

図 99: νF_ν スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

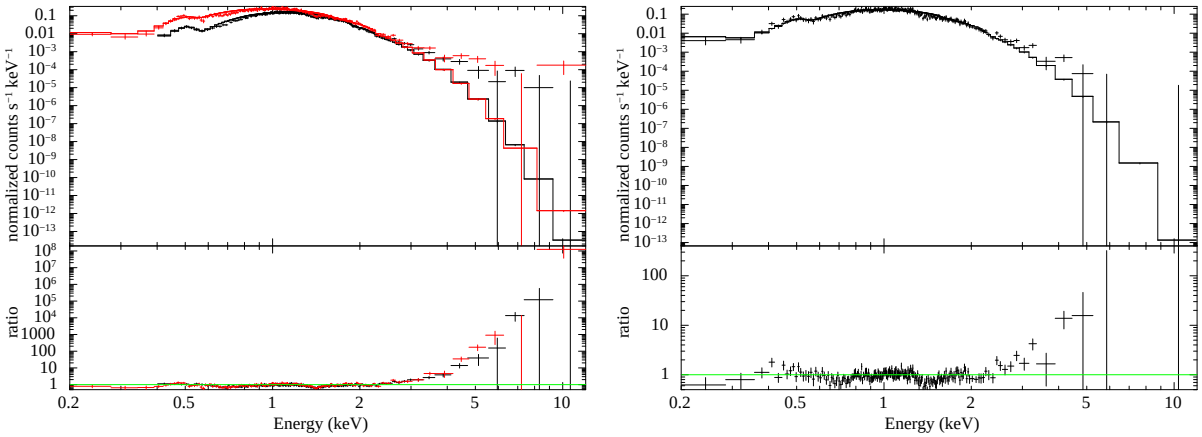

図 100: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 13: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.029\ ^{+0.006}_{-0.006}$	$0.039\ ^{+0.014}_{-0.011}$
bbodyrad	kT	keV	$0.270\ ^{+0.003}_{-0.003}$	$0.272\ ^{+0.005}_{-0.006}$
bbodyrad	norm	—	$48\ ^{+3}_{-3}$	$47\ ^{+6}_{-5}$
		km♯	$1.39\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$1.38\ ^{+0.08}_{-0.07}$
gabs	LineE	keV	$0.72\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.70\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Sigma	keV	$0.11\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.05\ ^{+0.04}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.05\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.422\ ^{+0.010}_{-0.009}$	$1.420\ ^{+0.022}_{-0.019}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.11\ ^{+0.03}_{-0.02}$
$\chi^2/d.o.f$			667.59/422(1.58)	211.47/211(1.00)
Null hypothesis probability			2.32E-13	4.78E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.14E-12 $^{+2.57E-14}_{-2.33E-14}$	2.13E-12 $^{+6.14E-14}_{-5.26E-14}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.11E-12 $^{+3.06E-14}_{-2.24E-14}$	2.12E-12 $^{+3.49E-14}_{-5.11E-14}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(powerlaw)*gabs*gabs

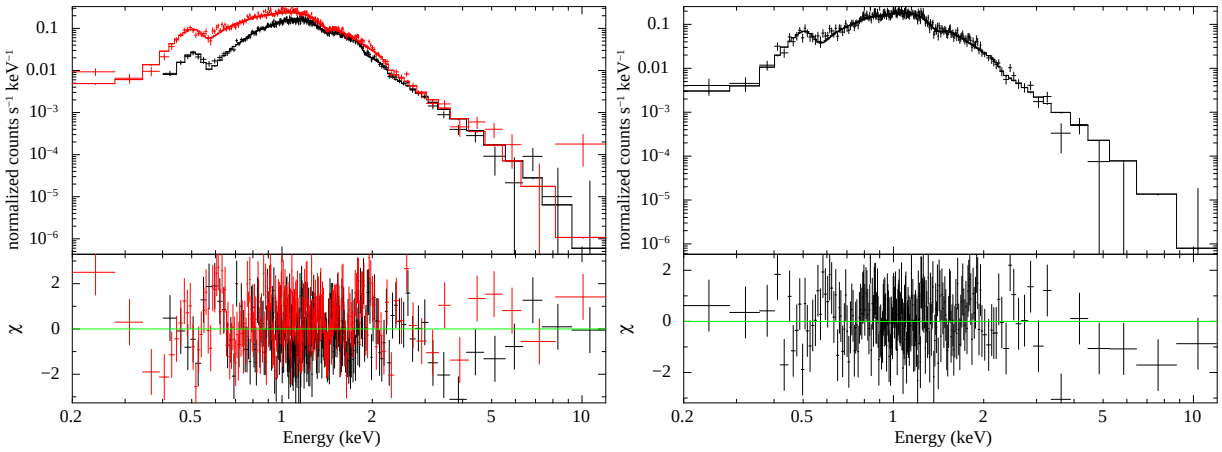

図 101: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

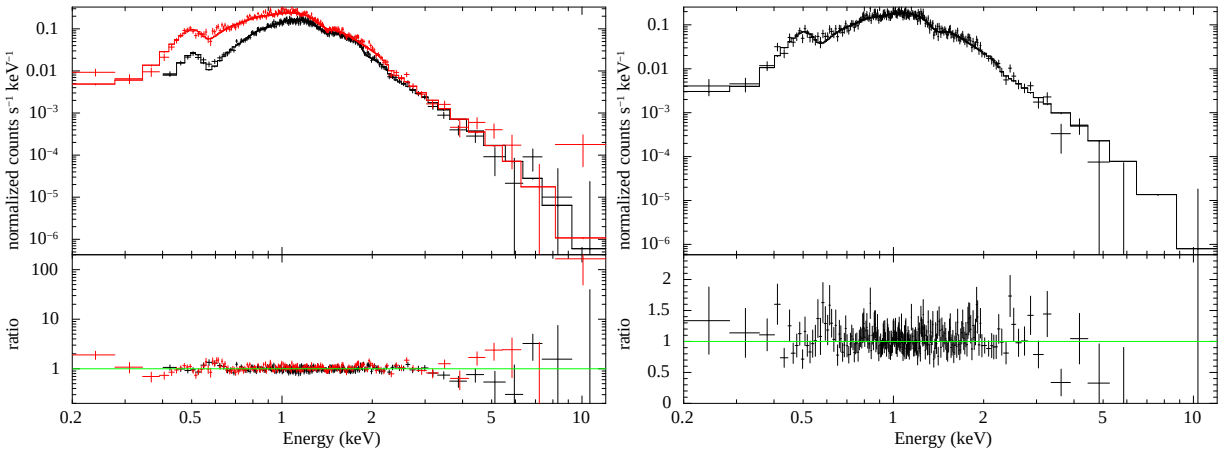

図 102: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

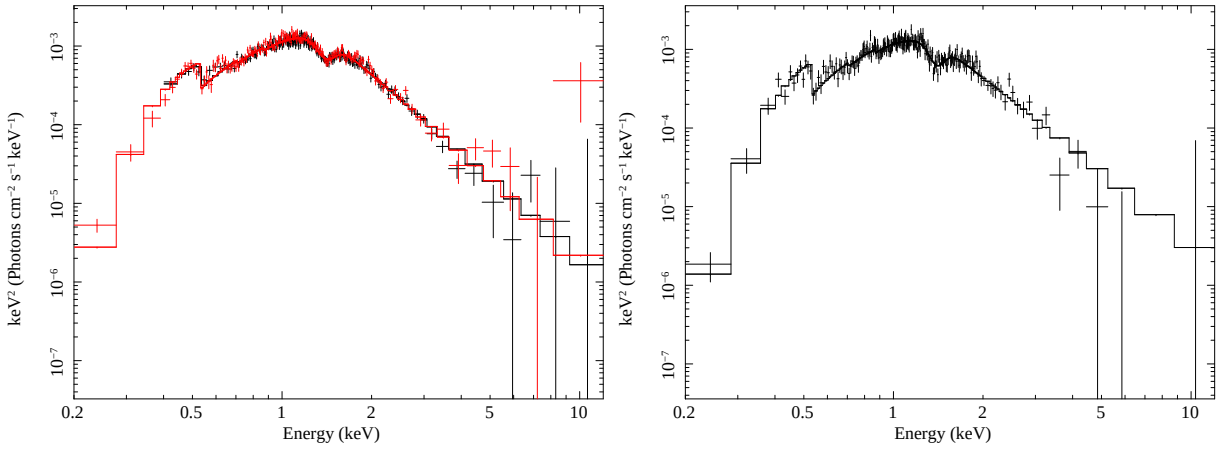

図 103: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

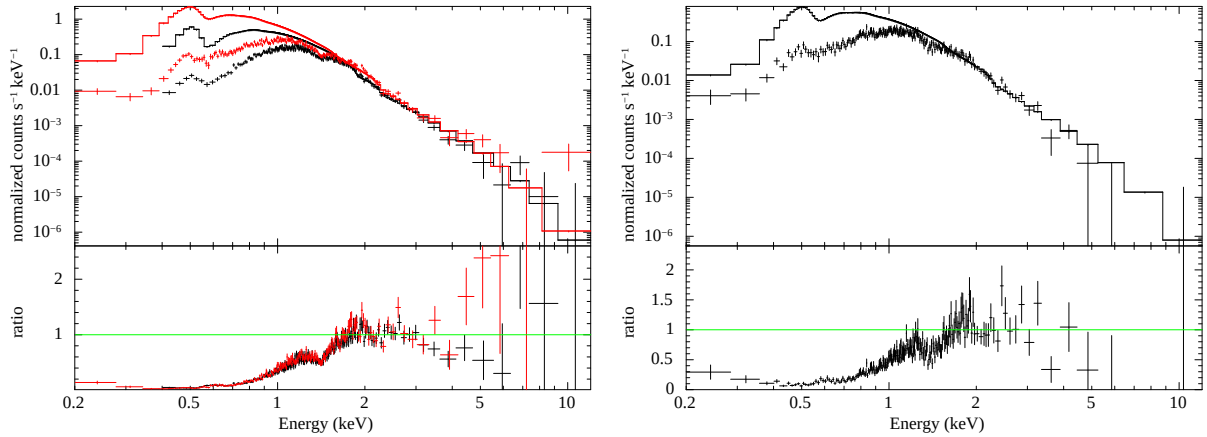

図 104: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 14: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	10^{22}cm^{-2}	0.19 $^{+0.03}_{-0.01}$	0.23 $^{+0.03}_{-0.02}$
powerlaw	PhoIndex	—	5.43 $^{+0.09}_{-0.03}$	5.15 $^{+0.18}_{-0.21}$
powerlaw	norm	—	5.1E-03 $^{+3.9E-04}_{-9.9E-05}$	4.3E-03 $^{+4.8E-04}_{-5.0E-04}$
gabs	LineE	keV	0.29 $^{+0.18}_{0.07}$	0.39 $^{+0.04}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	0.45 $^{-----}_{-----}$	0.39 $^{-----}_{-----}$
gabs	Tau	—	4.0 $^{+0.9}_{0.3}$	2.5 $^{+0.7}_{-1.2}$
gabs	LineE	keV	1.404 $^{+0.008}_{-0.008}$	1.399 $^{+0.018}_{-0.017}$
gabs	Sigma	keV	0.10 $^{+0.02}_{-0.01}$	0.08 $^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	0.12 $^{+0.02}_{-0.01}$	0.11 $^{+0.02}_{-0.03}$
$\chi^2/d.o.f$			537.64/422(1.27)	195.70/211(0.93)
Null hypothesis probability			1.13E-04	7.68E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.14E-12 $^{+1.09E-12}_{-6.84E-13}$	
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.12E-12 $^{+1.64E-12}_{-8.12E-13}$	

各パラメータの誤差は 90% confidence。

wabs(cutoffpl)*gabs*gabs

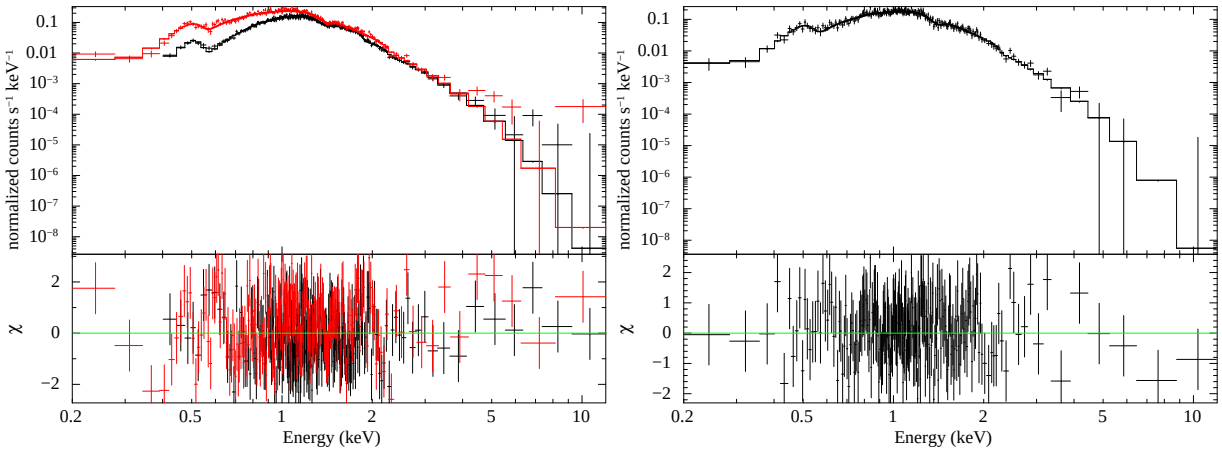

図 105: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

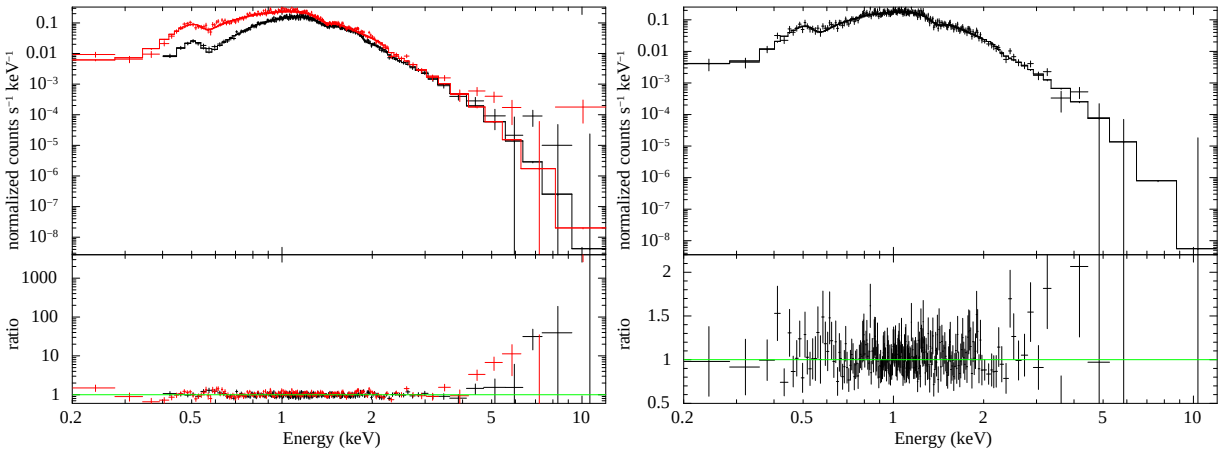

図 106: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

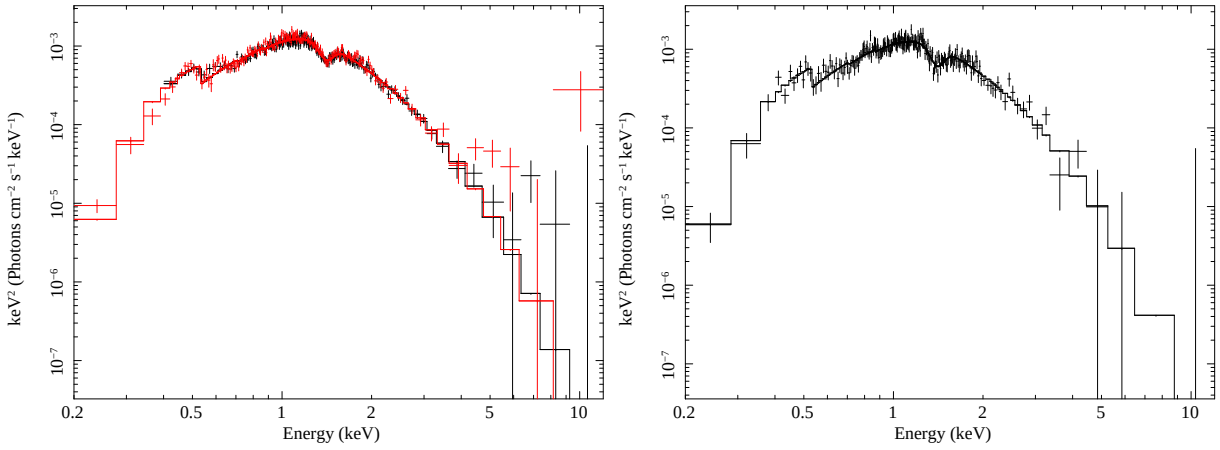

図 107: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

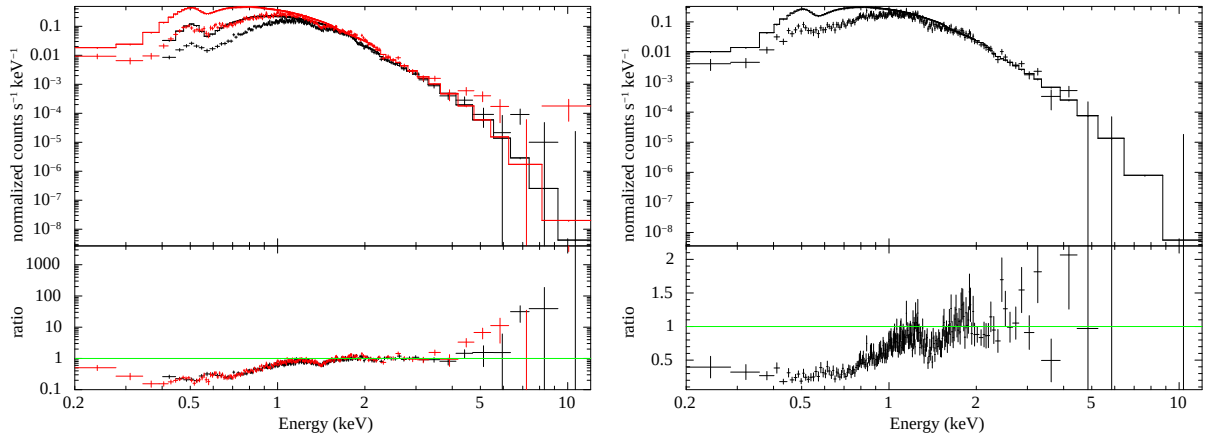

図 108: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 15: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	10^{22}cm^{-2}	$0.14\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.15\ ^{+0.07}_{-0.04}$
cutoffpl	PhoIndex	—	$2.65\ ^{+0.08}_{-0.10}$	$2.55\ ^{+0.60}_{-1.51}$
cutoffpl	HighECut	keV	$0.84\ ^{+0.21}_{-0.12}$	$0.82\ ^{+0.57}_{-0.20}$
cutoffpl	norm	—	$0.008\ ^{+0.002}_{-0.001}$	$0.008\ ^{+0.005}_{-0.003}$
gabs	LineE	keV	$0.46\ ^{+0.12}_{-0.01}$	$0.47\ ^{+0.16}_{-0.02}$
gabs	Sigma	keV	$0.34\ ^{+0.18}_{-0.34}$	$0.33\ ^{+0.06}_{-0.19}$
gabs	Tau	—	$1.4\ ^{+0.1}_{-0.7}$	$1.2\ ^{+0.2}_{-0.8}$
gabs	LineE	keV	$1.404\ ^{+0.008}_{-0.008}$	$1.404\ ^{+0.018}_{-0.019}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.08\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.02}$	$0.10\ ^{+0.03}_{-0.03}$
$\chi^2/d.o.f$			509.91/421(1.21)	183.69/210(0.87)
Null hypothesis probability			1.90E-03	9.05E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.15E-12 $^{+4.32E-13}_{-1.03E-13}$	2.17E-12 $^{+9.35E-13}_{-1.09E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.13E-12 $^{+4.38E-13}_{-7.60E-14}$	2.16E-12 $^{+7.61E-13}_{-8.14E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

wabs(bbodyrad+bbodyrad)*gabs*gabs

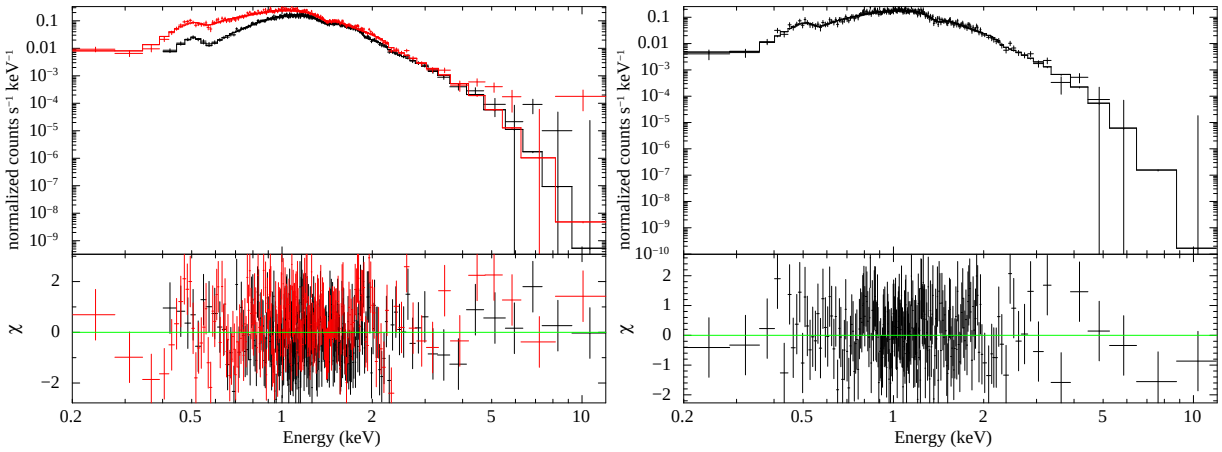

図 109: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

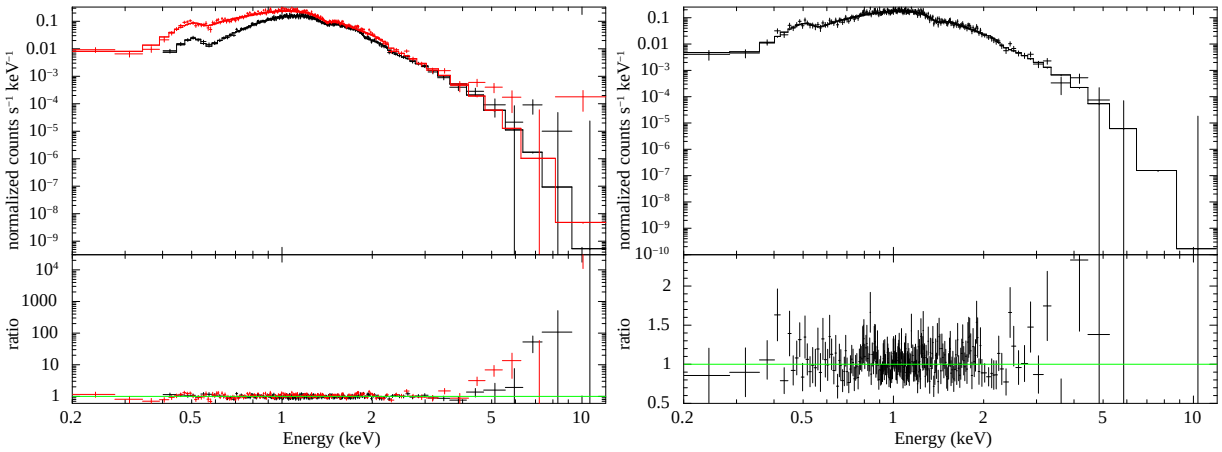

図 110: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

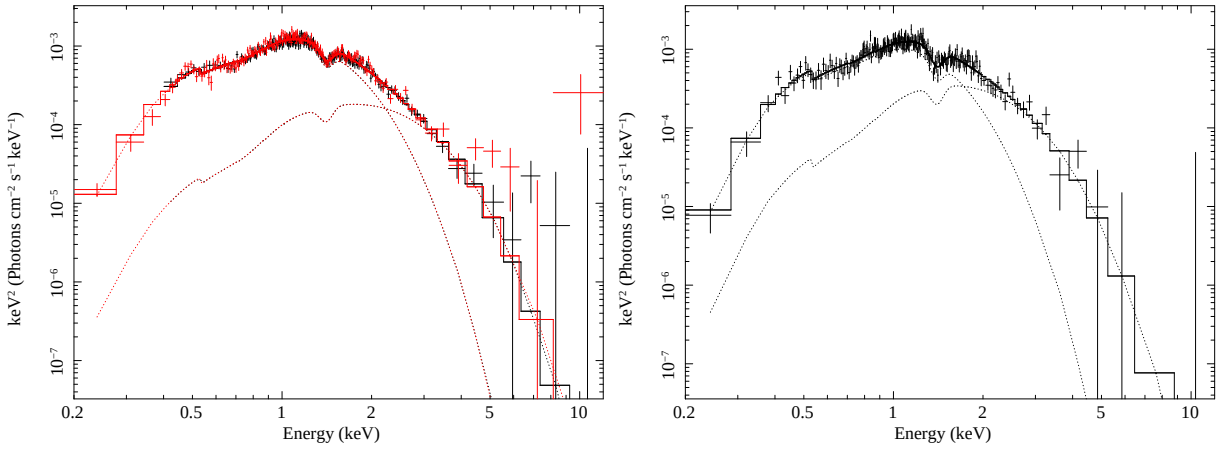

図 111: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

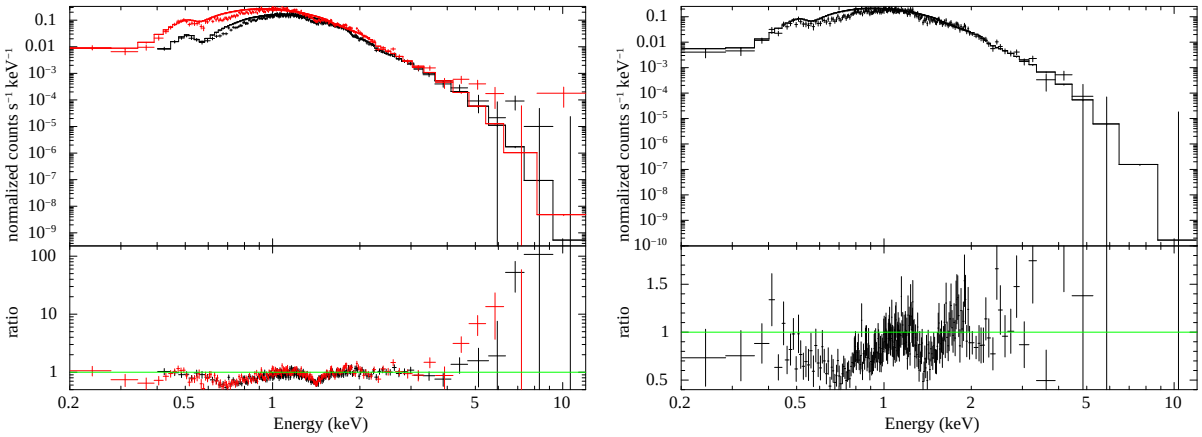

図 112: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 16: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	Group1	Group2
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.05\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.07\ ^{+0.05}_{-0.03}$
bbodyrad	kT	keV	$0.23\ ^{+0.01}_{-0.02}$	$0.21\ ^{+0.04}_{-0.07}$
bbodyrad	norm	—	$92\ ^{+36}_{-18}$	$169\ ^{+1099}_{-91}$
		km$^{\sharp}$	$1.9\ ^{+0.3}_{-0.2}$	$2.6\ ^{+4.5}_{-0.8}$
bbodyrad	kT	keV	$0.44\ ^{+0.07}_{-0.05}$	$0.38\ ^{+0.12}_{-0.06}$
bbodyrad	norm	—	$1.0\ ^{+1.9}_{-0.7}$	$3.4\ ^{+6.2}_{-2.9}$
		km$^{\sharp}$	$0.20\ ^{+0.14}_{-0.09}$	$0.37\ ^{+0.25}_{-0.23}$
gabs	LineE	keV	$0.72\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.70\ ^{+0.05}_{-0.09}$
gabs	Sigma	keV	$0.15\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.19\ ^{+0.27}_{-0.07}$
gabs	Tau	—	$0.16\ ^{+0.06}_{-0.04}$	$0.25\ ^{+1.07}_{-0.15}$
gabs	LineE	keV	$1.407\ ^{+0.009}_{-0.008}$	$1.401\ ^{+0.021}_{-0.020}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.07\ ^{+0.06}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.09\ ^{+0.13}_{-0.03}$
$\chi^2/d.o.f$			500.70/420(1.19)	184.90/209(0.88)
Null hypothesis probability			4.07E-03	8.84E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.16E-12 $^{+1.89E-14}_{-2.27E-13}$	2.17E-12 $^{+-3.11E-14}_{-1.36E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.14E-12 $^{+1.14E-14}_{-2.80E-13}$	2.16E-12 $^{+-3.70E-14}_{-1.27E-12}$

2006 年の誤差は 90% confidence。
2007 年の誤差は 68% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(bbodyrad+powerlaw)*gabs*gabs

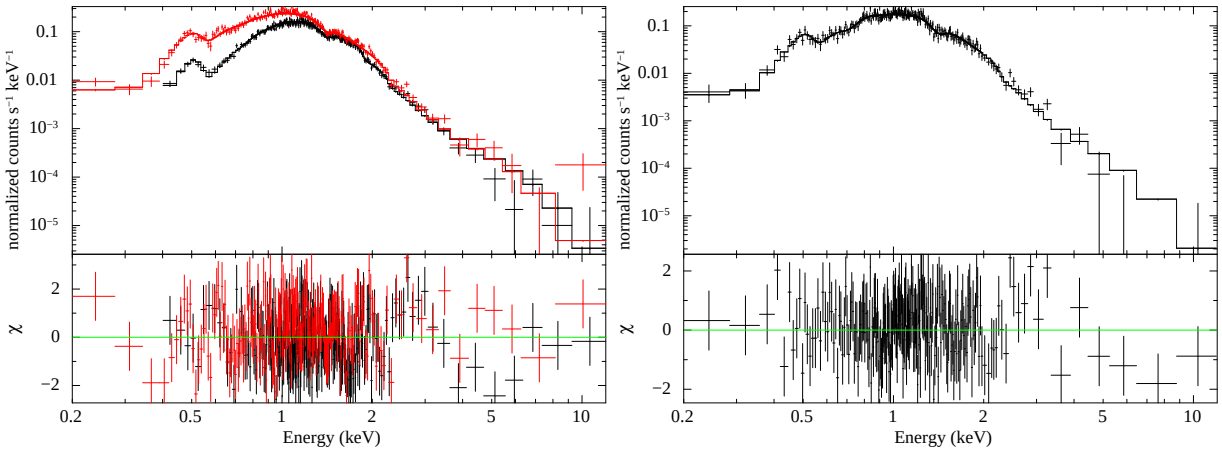

図 113: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

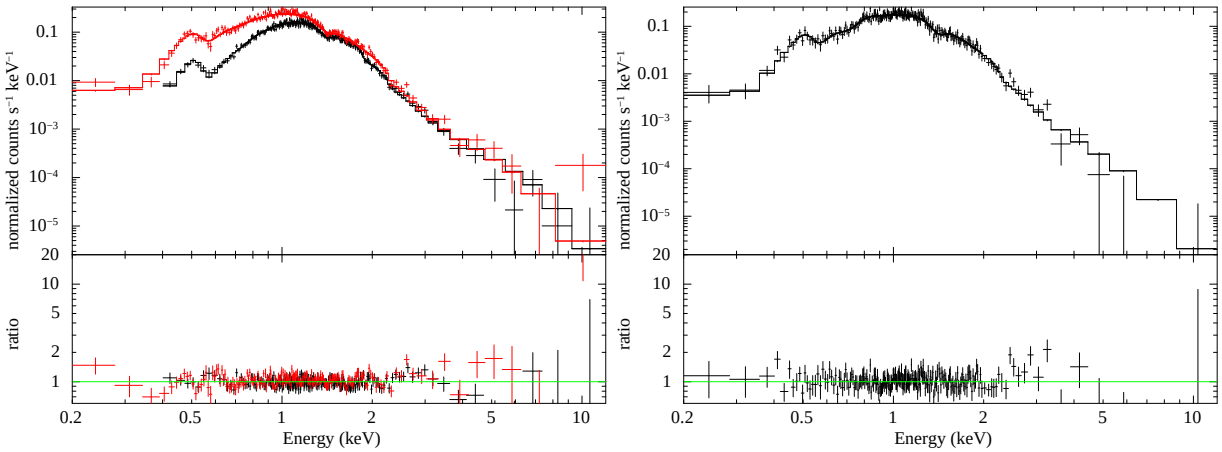

図 114: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

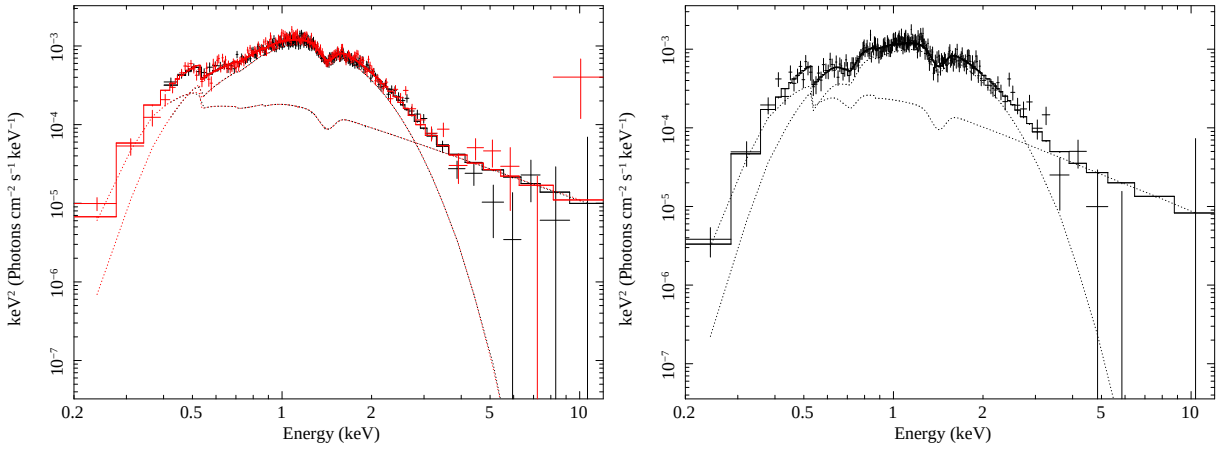

図 115: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

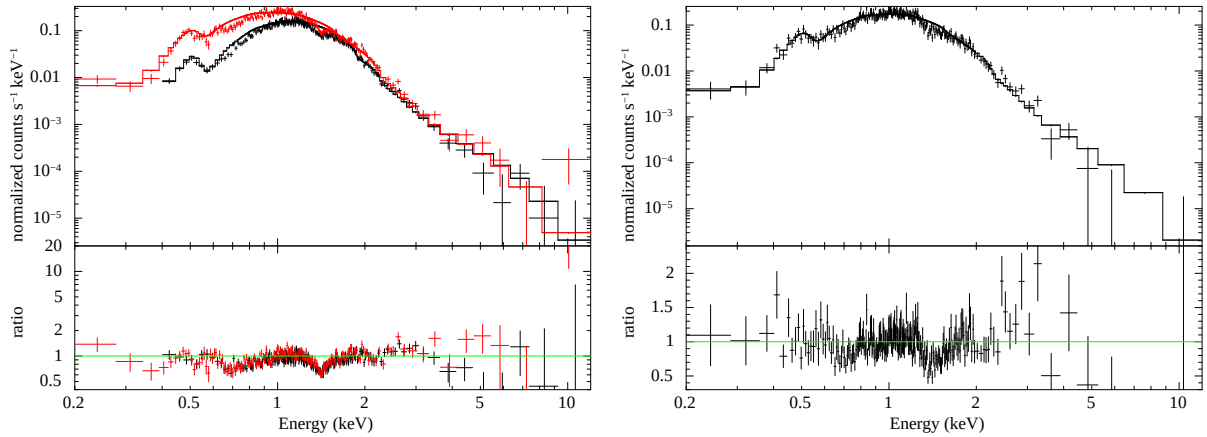

図 116: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 17: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	10^{22}cm^{-2}	$0.12\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.15\ ^{+0.09}_{-0.06}$
bbodyrad	kT	keV	$0.250\ ^{+0.005}_{-0.006}$	$0.252\ ^{+0.010}_{-0.012}$
bbodyrad	norm	—	$68\ ^{+9}_{-7}$	$67\ ^{+20}_{-12}$
		km$^\sharp$	$1.65\ ^{+0.11}_{-0.08}$	$1.64\ ^{+0.22}_{-0.16}$
powerlaw	PhoIndex	—	$3.4\ ^{+0.3}_{-0.3}$	$3.6\ ^{+0.51}_{-0.5}$
powerlaw	norm	—	$2.5\text{E-}04\ ^{+1.2E-04}_{-8.1E-05}$	$3.3\text{E-}04\ ^{+3.4E-04}_{-1.6E-04}$
gabs	LineE	keV	$0.72\ ^{+0.03}_{-0.05}$	$0.71\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Sigma	keV	$0.13\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.04\ ^{+0.04}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.05}_{-0.03}$	$0.04\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$1.415\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$1.416\ ^{+0.022}_{-0.019}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.08\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.09\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.10\ ^{+0.03}_{-0.02}$
$\chi^2/d.o.f$			524.49/420(1.25)	187.99/209(0.90)
Null hypothesis probability			3.81E-04	8.49E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	$2.17\text{E-}12\ ^{+2.34E-14}_{-3.76E-14}$	$2.17\text{E-}12\ ^{+4.10E-14}_{-1.27E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	$2.13\text{E-}12\ ^{+1.92E-14}_{-2.98E-14}$	$2.14\text{E-}12\ ^{+4.15E-14}_{-2.18E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
$\sharp$ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

wabs(bbodyrad+cutoffpl)*gabs*gabs

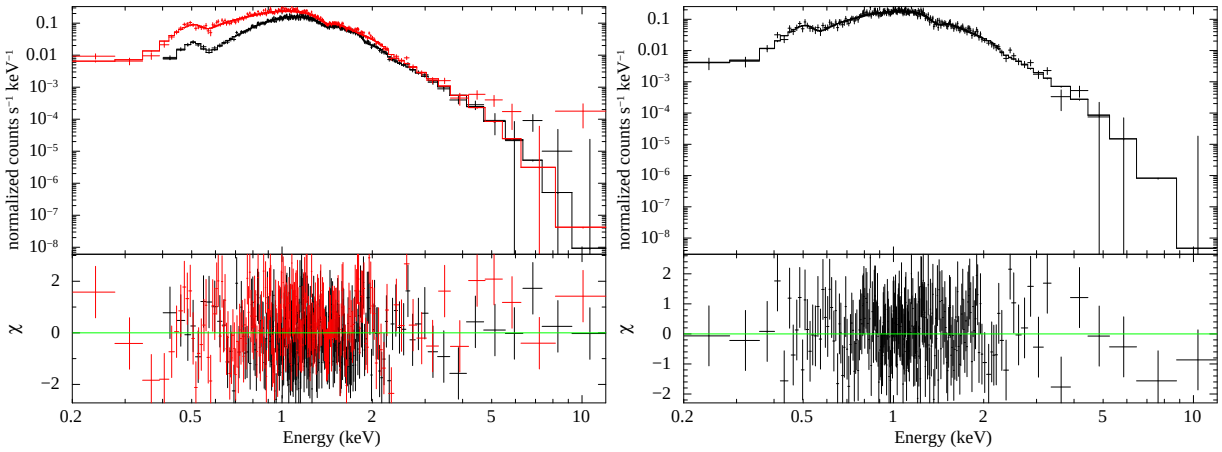

図 117: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

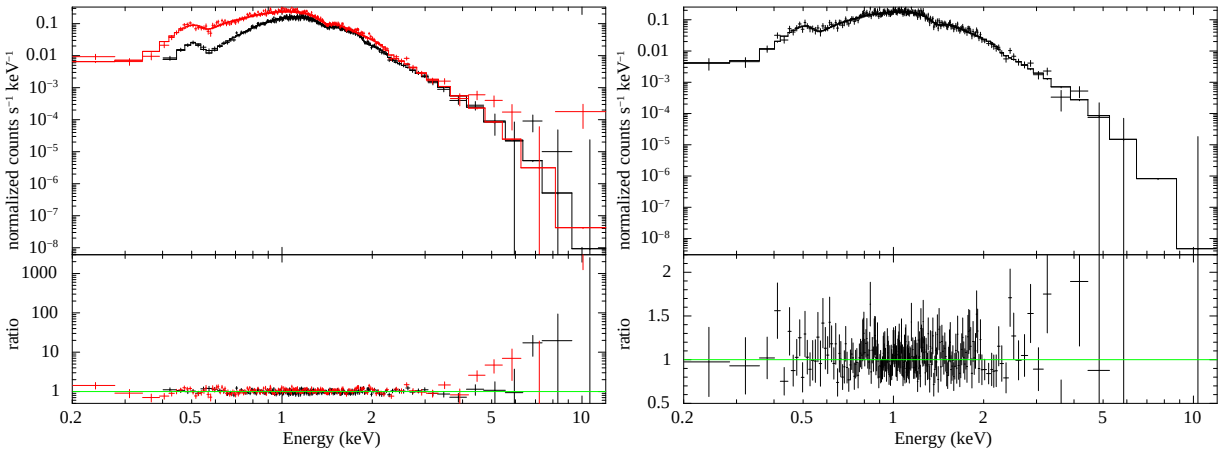

図 118: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

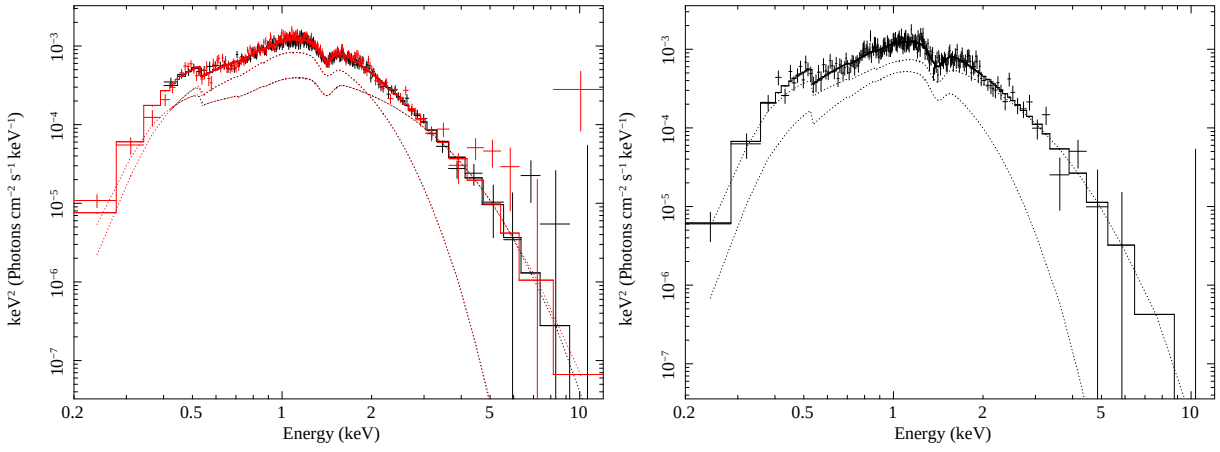

図 119: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

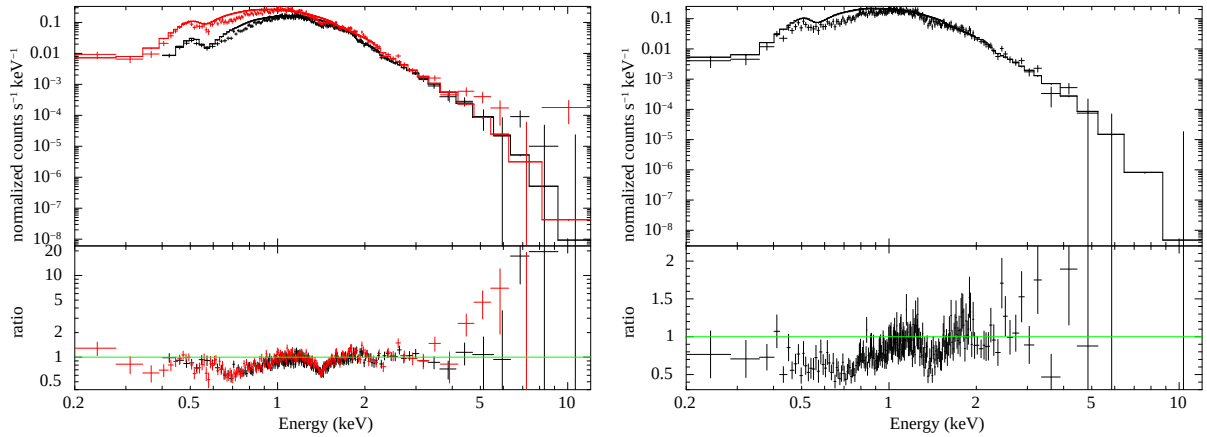

図 120: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

表 18: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	10^{22}cm^{-2}	$0.09\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.12\ ^{+0.07}_{-0.06}$
bbodyrad	kT	keV	$0.23\ ^{+0.01}_{-0.02}$	$0.21\ ^{+0.04}_{-0.05}$
bbodyrad	norm	—	$74\ ^{+24}_{-11}$	$87\ ^{+117}_{-87}$
		km$^\sharp$	$1.7\ ^{+0.3}_{-0.1}$	$1.9\ ^{+1.0}_{-1.8}$
cutoffpl	PhoIndex	—	$1.1\ ^{+0.9}_{-1.3}$	$1.4\ ^{+0.6}_{-2.3}$
cutoffpl	HighECut	keV	$0.76\ ^{+0.58}_{-0.06}$	$0.69\ ^{+0.96}_{-0.27}$
cutoffpl	norm	—	$0.002\ ^{+0.002}_{-0.001}$	$0.005\ ^{+0.007}_{-0.004}$
gabs	LineE	keV	$0.71\ ^{+0.03}_{-0.04}$	$0.64\ ^{+0.10}_{-0.05}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.22\ ^{+0.09}_{-0.14}$
gabs	Tau	—	$0.17\ ^{+0.10}_{-0.05}$	$0.34\ ^{+0.06}_{-0.25}$
gabs	LineE	keV	$1.408\ ^{+0.009}_{-0.008}$	$1.404\ ^{+0.022}_{-0.019}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.07\ ^{+0.02}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.10\ ^{+0.03}_{-0.03}$
$\chi^2/d.o.f$			495.62/419(1.18)	183.05/208(0.88)
Null hypothesis probability			5.81E-03	8.93E-01
Flux@0.2-12.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.15E-12 $^{+3.89E-14}_{-2.82E-13}$	2.17E-12 $^{+8.22E-13}_{-2.15E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		ergs cm^{-2} s^{-1}	2.14E-12 $^{+3.42E-14}_{-2.82E-13}$	2.16E-12 $^{+1.02E-12}_{-2.14E-12}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

$\sharp$ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

すざくスペクトルについて 4 本目の吸収構造は有意か?

すざくの 2006 年、2007 年のスペクトルに対して 4 本目の吸収構造を入れてフィッティングを行った。

連続成分は wabs(bbodyrad+bbodyrad) と wabs(bbodyrad+cutoffpl) の 2 種類で試した。

またそれぞれについて 1 本目の深い場合と浅い場合でフィッティングした。

連続成分: wabs(bbodyrad+bbodyrad) 1 本目が深い

2006 年については、吸収線の中心エネルギーの比率を固定した場合、エラーまで求めることが出来た。固定しない場合、うまくエラーを計算出来なかった。

2007 年については比率を固定しても 4 本目の 1σ エラーが決まらなかった。

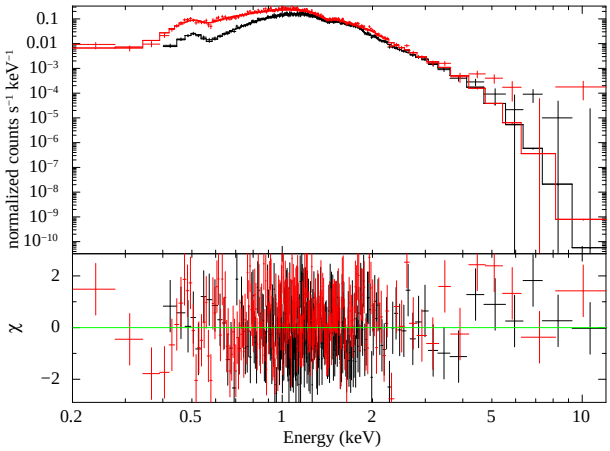

図 121: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。

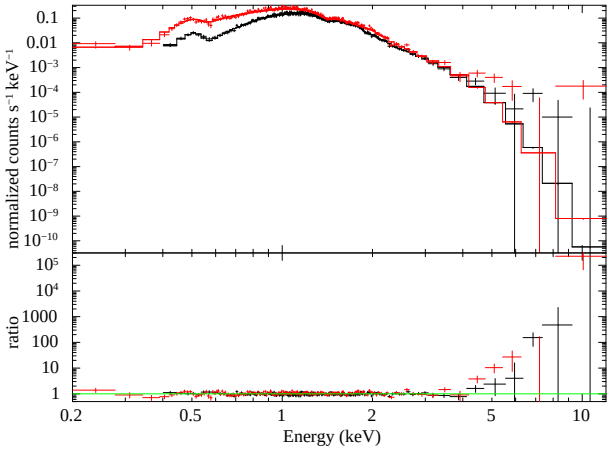

図 122: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。

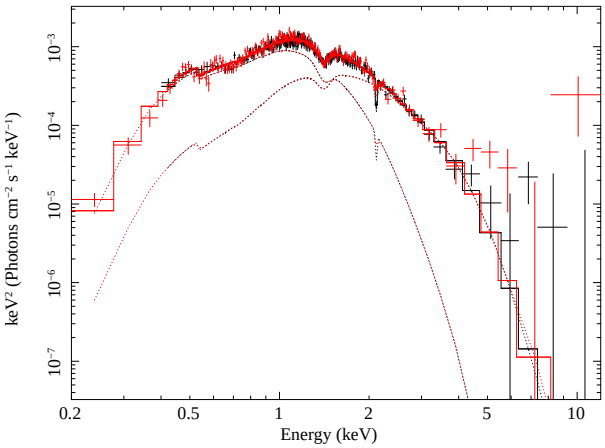

図 123: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。

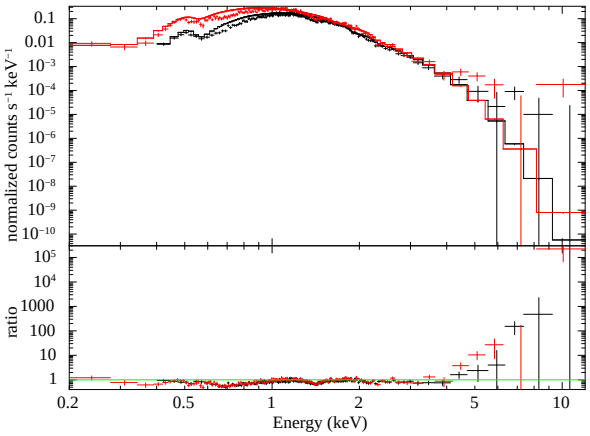

図 124: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。残差はフルスケール。左:グループ 1。

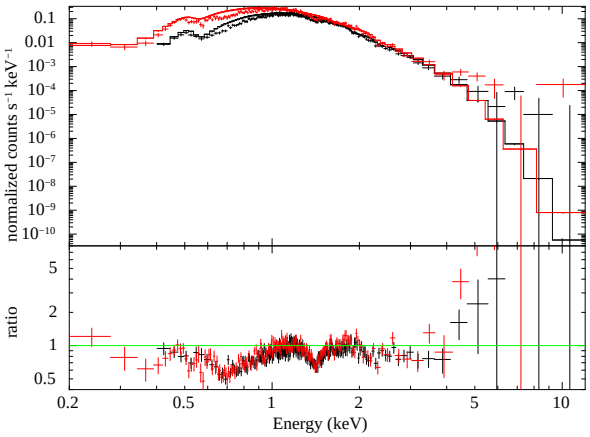

図 125: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。残差を調整したもの。左:グループ 1。

表 19: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年 (エネルギー比固定)
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.071\ ^{+0.017}_{-0.009}$
bbodyrad	kT	keV	$0.200\ ^{+0.015}_{-0.009}$
bbodyrad	norm	—	$167\ ^{+19}_{-44}$
		$\mathrm{km}^{\sharp}$	$2.6\ ^{+0.1}_{-0.4}$
bbodyrad	kT	keV	$0.372\ ^{+0.018}_{-0.010}$
bbodyrad	norm	—	$5.0\ ^{+0.6}_{-1.6}$
		$\mathrm{km}^{\sharp}$	$0.45\ ^{+0.03}_{-0.08}$
gabs	LineE	keV	$0.705\ ^{+0.004}_{-0.004}$
gabs	Sigma	keV	$0.171\ ^{+0.009}_{-0.010}$
gabs	Tau	—	$0.22\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.07\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Sigma	keV	$0.008\ ^{+0.632}_{-0.007}$
gabs	Tau	—	$0.03\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	Sigma	keV	$0.5\ ^{+0.4}_{-0.3}$
gabs	Tau	—	$0.3\ ^{+0.1}_{-0.2}$
$\chi^2/d.o.f$			492.35/417(1.18)
Null hypothesis probability			6.40E-03
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.15E-12 $^{+1.39E-14}_{-5.19E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.14E-12 $^{+1.38E-14}_{-4.69E-13}$

また pow 成分を連続成分に追加してもスペクトルを説明できなかった。

連続成分: wabs(bbodyrad+bbodyrad) 1 本目が浅い

1 本目が浅いモデルの場合、2006、2007 年共に吸収線の中心エネルギーの比率を固定しなくとも 90%エラーまで求めることが出来た。しかし、4 本目の中心エネルギーが 3.5keV 付近になってしまう。

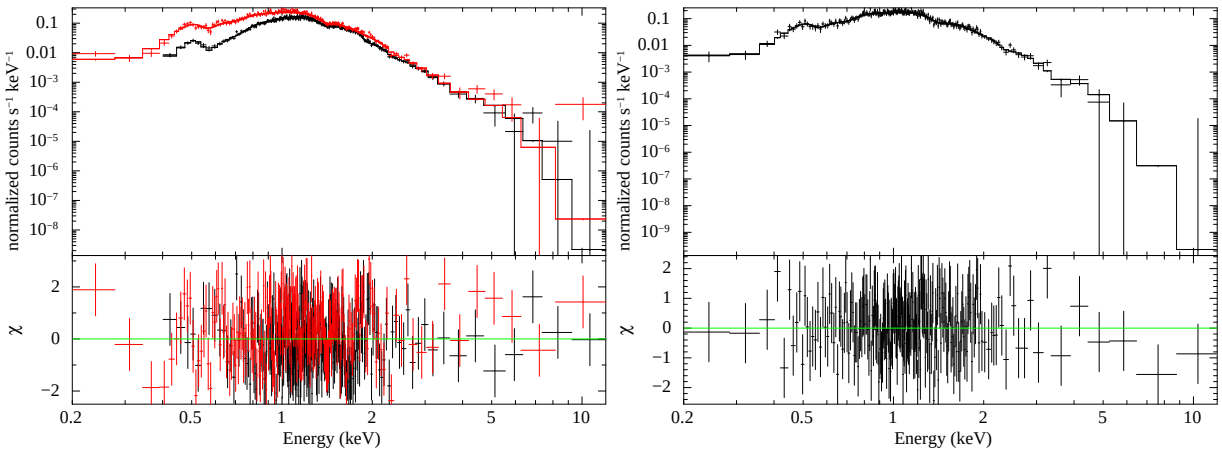

図 126: フィッティングしたモデルとその残差。左:グループ 1。右:グループ 2。

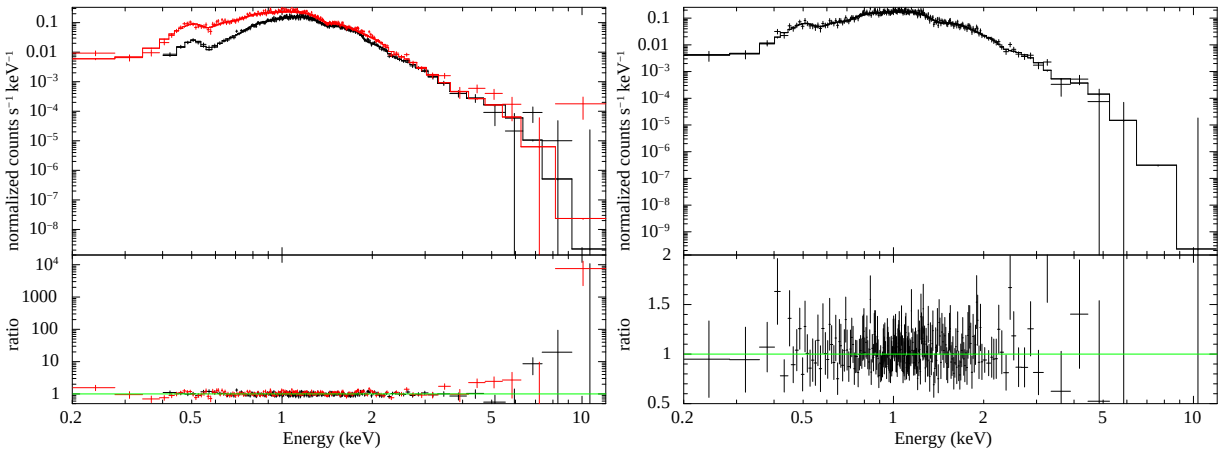

図 127: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

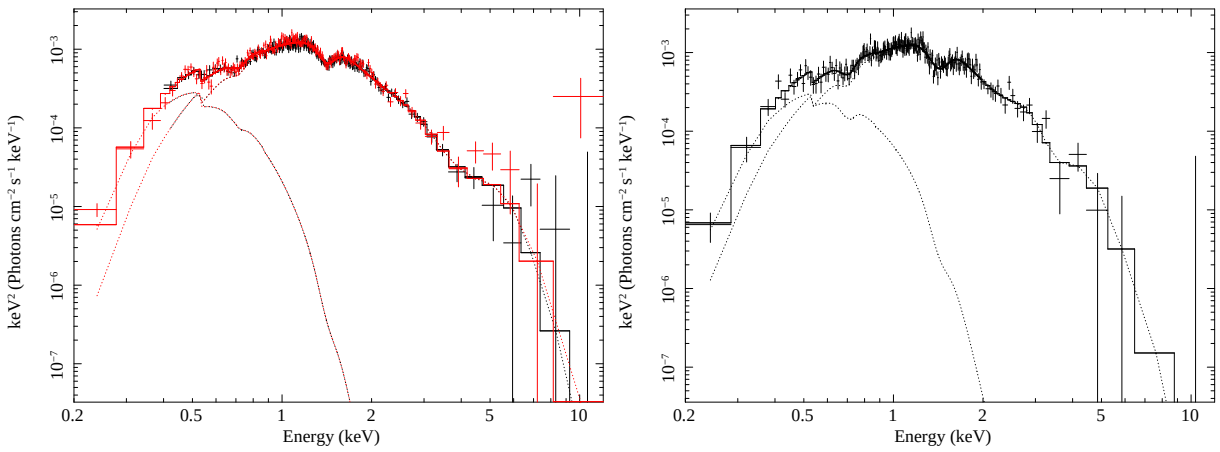

図 128: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

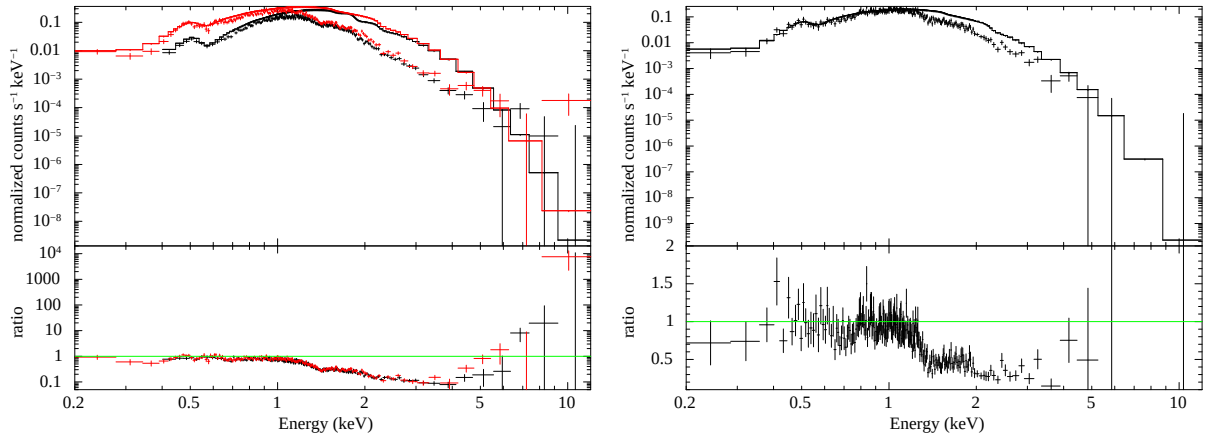

図 129: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。残差はフルスケール。左:グループ 1。右:グループ 2。

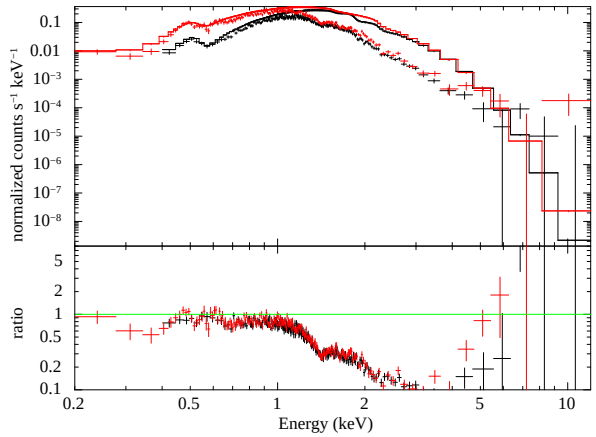

図 130: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。残差を調整したもの。グループ 1 のみ。

表 20: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年	2007 年
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.10\ ^{+0.04}_{-0.03}$	$0.10\ ^{+0.04}_{-0.03}$
bbodyrad	kT	keV	$0.09\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$0.10\ ^{+0.02}_{-0.02}$
bbodyrad	norm	—	$2676\ ^{+41600}_{-1938}$	$1207\ ^{+674}_{-891}$
		km♯	$10.4\ ^{+31.7}_{-4.9}$	$6.9\ ^{+1.7}_{-3.4}$
bbodyrad	kT	keV	$0.41\ ^{+0.03}_{-0.05}$	$0.35\ ^{+0.11}_{-0.05}$
bbodyrad	norm	—	$19.0\ ^{+4.4}_{-2.2}$	$22.6\ ^{+4.2}_{-10.2}$
		km♯	$0.87\ ^{+0.10}_{-0.05}$	$0.95\ ^{+0.08}_{-0.25}$
gabs	LineE	keV	$0.71\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.70\ ^{+0.02}_{-0.03}$
gabs	Sigma	keV	$0.04\ ^{+0.08}_{-0.03}$	$0.03\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.02\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$0.03\ ^{+0.02}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$1.413\ ^{+0.010}_{-0.009}$	$1.421\ ^{+0.019}_{-0.018}$
gabs	Sigma	keV	$0.09\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.10\ ^{+0.02}_{-0.03}$
gabs	Tau	—	$0.11\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.16\ ^{+0.07}_{-0.05}$
gabs	LineE	keV	$2.03\ ^{+0.06}_{-0.06}$	$2.23\ ^{+0.09}_{-0.15}$
gabs	Sigma	keV	$0.55\ ^{+0.08}_{-0.07}$	$0.49\ ^{+0.07}_{-0.17}$
gabs	Tau	—	$1.2\ ^{+0.9}_{-0.5}$	$1.4\ ^{+1.4}_{-0.9}$
gabs	LineE	keV	$3.6\ ^{+0.2}_{-0.6}$	$3.5\ ^{+0.6}_{-0.2}$
gabs	Sigma	keV	$1.1\ ^{+0.3}_{-0.3}$	$0.5\ ^{+0.7}_{-0.2}$
gabs	Tau	—	$6.6\ ^{+2.0}_{-6.6}$	$1.5\ ^{+1.8}_{-0.6}$
$\chi^2/d.o.f$			492.87/414(1.19)	170.71/203(0.84)
Null hypothesis probability			4.57E-03	9.52E-01
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.16E-12 $^{+1.25E-12}_{-1.52E-12}$	2.18E-12 $^{+8.40E-12}_{-8.73E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	2.13E-12 $^{+5.45E-13}_{-1.66E-12}$	2.16E-12 $^{+7.52E-12}_{-8.33E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

また、連続成分に powerlaw を追加してフィッティングしたところ 2006 年の powerlaw 成分のエラーが大きく、norm の下限値が 0 になった。つまり pow があるとは言えない。また 2007 年のデータでは pow を入れるとエラーを計算出来なかった。

連続成分: wabs(bbodyrad+cutoffpl) 1 本目が深い

2006 年については、吸収線の中心エネルギーの比率を固定しても、エラーを求めることが出来なかった。

2007 年については初期値を 1 本目が深いモデルにしても、1 本目が浅くなるモデルに落ち着く様だった。しかし 1sigma エラーを求めることが出来なかった。

連続成分: wabs(bbodyrad+cutoffpl) 1 本目が浅い

1 本目が浅いモデルの場合、

2006 年については、吸収線の中心エネルギーの比率を固定することで 1σ エラーを求められた。比率を解いてしまうとエラーを計算出来なかった。

2007 年にについては吸収線の中心エネルギーの比率を固定するとエラーが大きく、計算出来なかった。しかし比率を固定しないと 4 本目は 3.5keV になって 1σ エラーまで求めることが出来た。

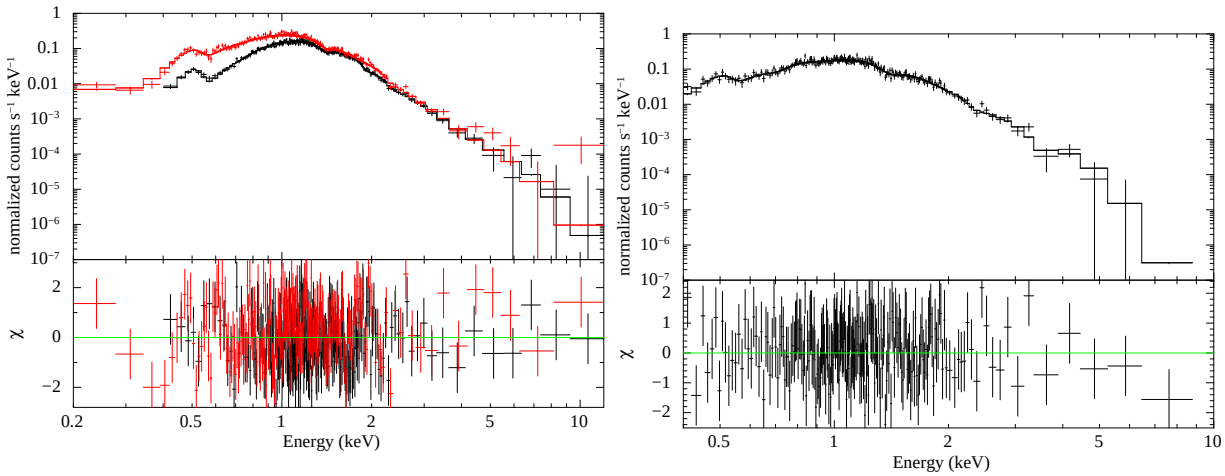

図 131: フィッティングしたモデルとその残差 (pl ld del)。左:グループ 1。右:グループ 2。

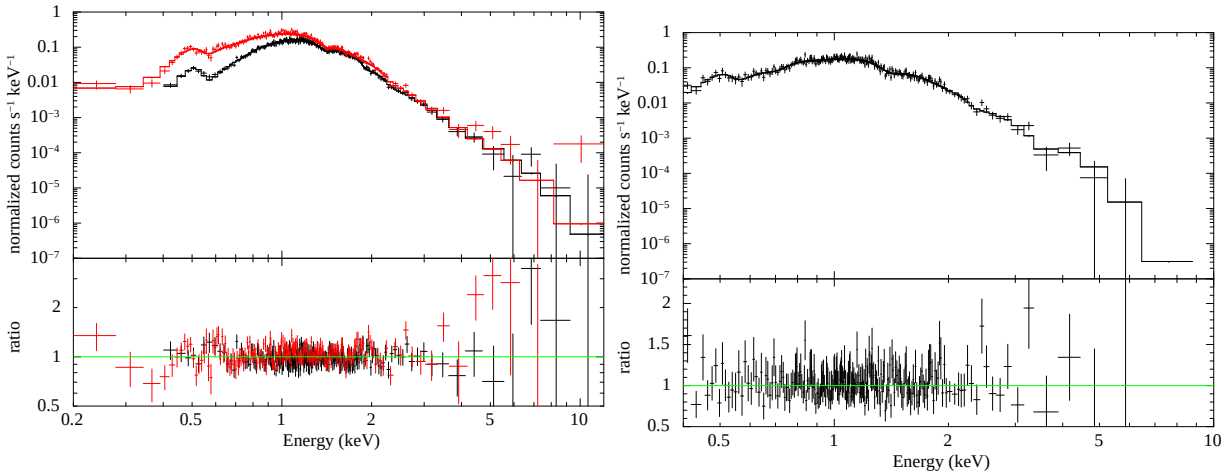

図 132: フィッティングしたモデルとその残差の比。左:グループ 1。右:グループ 2。

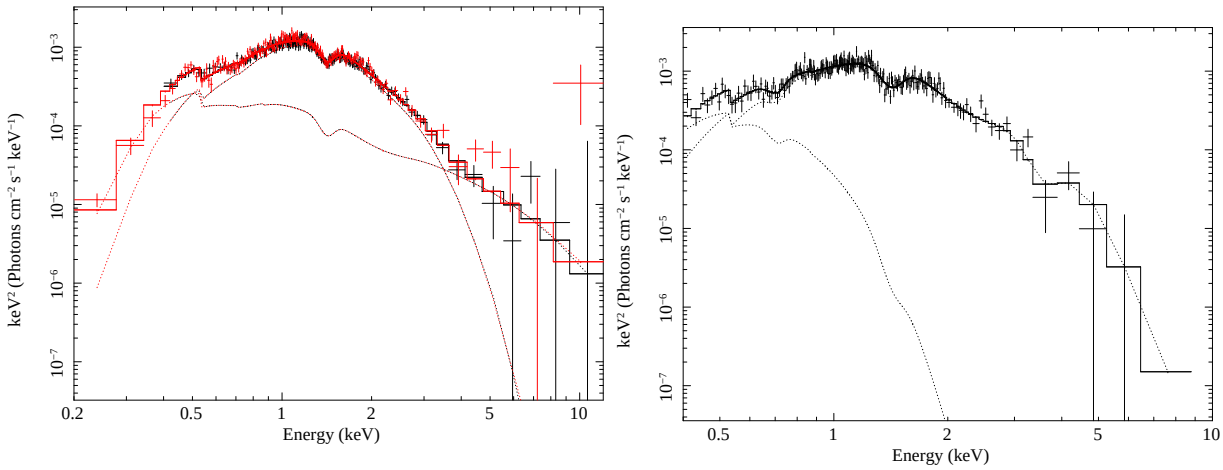

図 133: $\nu F\nu$ スペクトル。左:グループ 1。右:グループ 2。

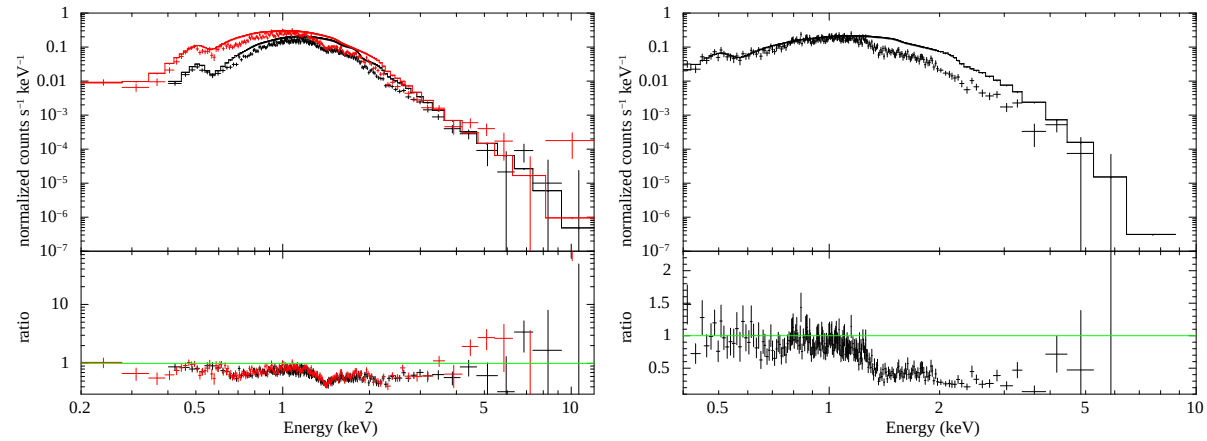

図 134: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。残差はフルスケール。左:グループ 1。右:グループ 2。

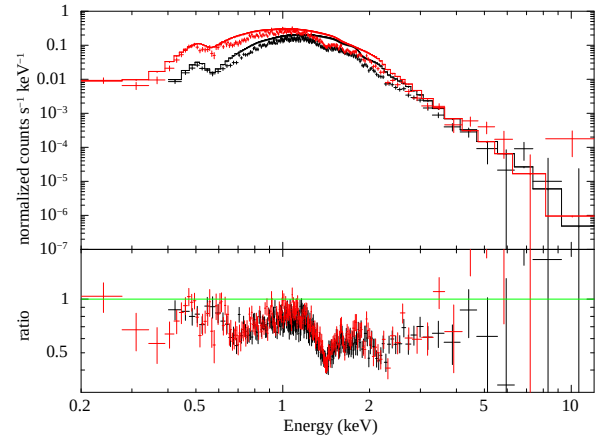

図 135: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差の比。残差を調整したもの。グループ 1 のみ。

表 21: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	2006 年 (E 比固定)	2007 年 (E 比フリー)
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.104\ ^{+0.007}_{-0.011}$	$0.10\ ^{+0.04}_{-0.03}$
bbodyrad	kT	keV	$0.287\ ^{+0.009}_{-0.002}$	$0.36\ ^{+0.03}_{-0.02}$
bbodyrad	norm	—	$48\ ^{+1}_{-7}$	$24\ ^{+10}_{-7}$
		km♯	$1.39\ ^{+0.02}_{-0.10}$	$0.98\ ^{+0.18}_{-0.16}$
cutoffpl	PhoIndex	—	$2.9\ ^{+0.3}_{-0.1}$	$-1.2\ ^{+0.7}_{-3.8}$
cutoffpl	HighECut	keV	$2.9\ ^{+3.6}_{-0.8}$	$0.11\ ^{+0.12}_{-0.06}$
cutoffpl	norm	—	$4.2\text{E-}04\ ^{+4.1E-05}_{-1.4E-04}$	$0.5\ ^{+2.2}_{-0.5}$
gabs	LineE	keV	$0.707\ ^{+0.003}_{-0.002}$	$0.703\ ^{+0.015}_{-0.015}$
gabs	Sigma	keV	$0.122\ ^{+0.012}_{-0.007}$	$0.033\ ^{+0.016}_{-0.016}$
gabs	Tau	—	$0.08\ ^{+0.01}_{-0.02}$	$0.03\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	—	$1.418\ ^{+0.007}_{-0.013}$
gabs	Sigma	keV	$0.08\ ^{+0.007}_{-0.007}$	$0.10\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.088\ ^{+0.006}_{-0.007}$	$0.14\ ^{+0.03}_{-0.03}$
gabs	LineE	keV	—	$2.33\ ^{+0.11}_{-0.08}$
gabs	Sigma	keV	$0.51\ ^{+0.04}_{-0.06}$	$0.61\ ^{+0.09}_{-0.19}$
gabs	Tau	—	$0.41\ ^{+0.04}_{-0.09}$	$2.1\ ^{+0.5}_{-0.6}$
gabs	LineE	keV	—	$3.6\ ^{+0.1}_{-0.2}$
gabs	Sigma	keV	$1.6\ ^{+0.7}_{-1.6}$	$0.4\ ^{+0.4}_{-0.1}$
gabs	Tau	—	$1.4\ ^{+22.8}_{-1.4}$	$1.4\ ^{+0.7}_{-0.9}$
$\chi^2/d.o.f$			496.63/416(1.19)	170.43/202(0.84)
Null hypothesis probability			3.96E-03	9.48E-01
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	—	$2.18\text{E-}12\ ^{+3.12E-12}_{-1.02E-12}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.13\text{E-}12\ ^{+1.48E-11}_{-1.86E-12}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+3.72E-12}_{-1.03E-12}$

各パラメータの誤差は 68% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

2006 年と 2007 年でスペクトルモデルの形が異なる。こちらも 2007 年の 4 本目は 3.5keV。

Ftest

連続成分としては 2bb の分だけまとめた。χ^2,dof は以下の通り

```
Group1,3gabs(pow 無し)                : 487.51/417(1.17)
Group2,3gabs(shallow1st,pow 無し)     : 173.16/206(0.84)
Group1,3gabs(shallow1st,pow 無し)     : 509.13/417(1.22)
Group1,3gabs(shallow1st,pow 有り)     : 491.00/415(1.18)
Group1,4gabs                         : 492.35/417(1.18) (Fix E ratio)
Group1,4gabs(shallow1st,pow 無し)     : 492.87/414(1.19)
Group2,4gabs(shallow1st,pow 無し)     : 170.71/203(0.84)
```

4 本目を追加した場合、

```
= Group1 ============
```

- 1 本目が深いモデルの場合

χ^2/dofは大きくなってしまっている。
つまりいらない、無くても良い。

- 1 本目が浅いモデル (pow 無し)

```
ftest 492.87 414 509.13 417
 F statistic value = 4.55268 and probability 0.00375136
```

```
= Group2 ============
```

- 1 本目が浅いモデル (pow 無し)

```
ftest 170.71 203 173.16 206
 F statistic value = 0.97114 and probability 0.407331
```

まとめると、2006 年については 1 本目が深いモデルの場合、4 本目は入らない。しかし、1 本目が浅いモデルでは有意水準 0.4%程度で 4 本目が存在していると言える。ただし、その吸収構造は 2.8keV ではなく 3.5keV 付近である。

2007 年については 1 本目が浅いモデルで有意水準 40%程度で 4 本目が存在していると言える。つまり、偶然の確率が高い。

E.2　すざくと Newton データのジョイントフィット

2006 年のすざく XIS データと 2002 年の Newton pn データについて同一のモデルでフィッティングした。使用したモデルは吸収線の 1 本目が浅いもの。

しかし、フィッティングしたところ pn と XIS の残差に低エネルギー側でずれがあった。これは XIS と pn のレスポンスのずれによるものと考えられる。Tsujimoto et al. 2011 では各衛星の検出器でレスポンスが異なるために得られるフィッティングパラメータにずれができる事が報告されており、その中で pn と XIS の間にもずれがあることが指摘されている。

Suzaku と Newton の観測時期は大きく異なるので、XIS の wabs と pn の wabs を独立したものとして捉え、定数モデルを加えると共に wabs の値を別々の値としてフィッティングを行った。

その結果、χ^2/d.o.f=1.2 程度でフィットできた。

また、このモデルに powerlaw を加えた場合のフィッティングも行った。powerlaw の norm は誤差を考慮しても 0 にならなかった。しかし χ^2/d.o.f 等はほぼ変わっていないため、powerlaw 成分は必要としない。以下に結果をまとめる。

まず、ずれの補正を行わない場合。

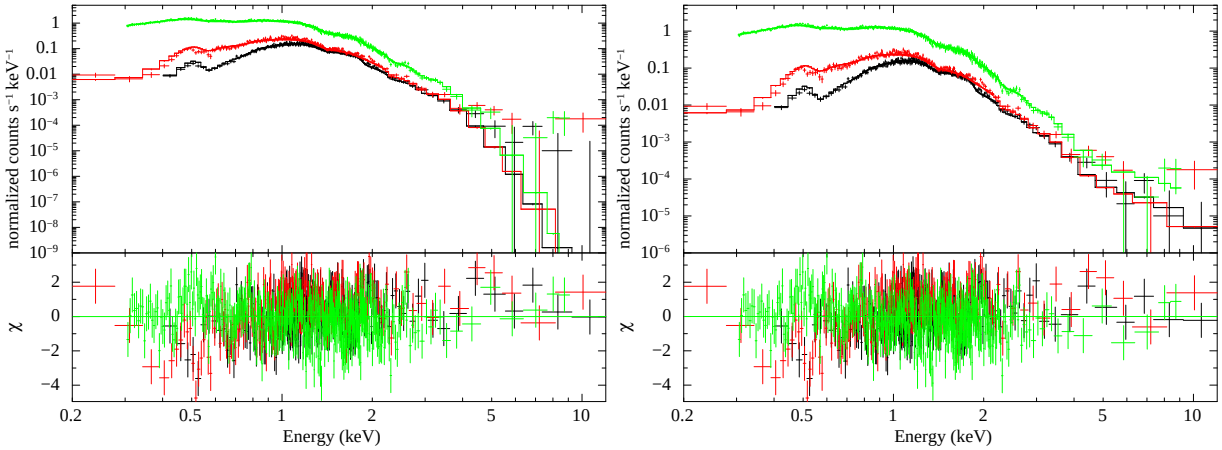

図 136: フィッティングしたモデルとその残差。左:pow 無し。右:pow 有り。

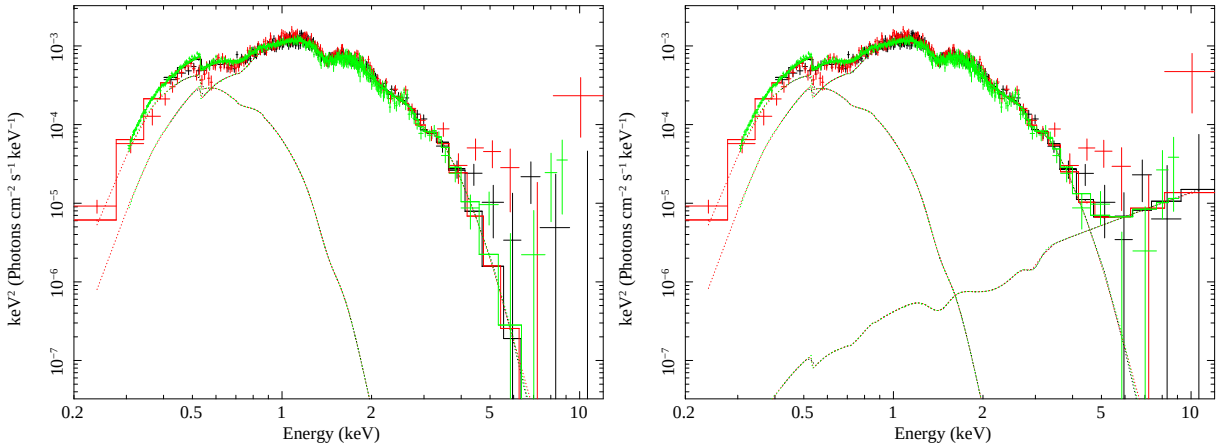

図 137: $\nu F\nu$ スペクトル。左:pow 無し。右:pow 有り。

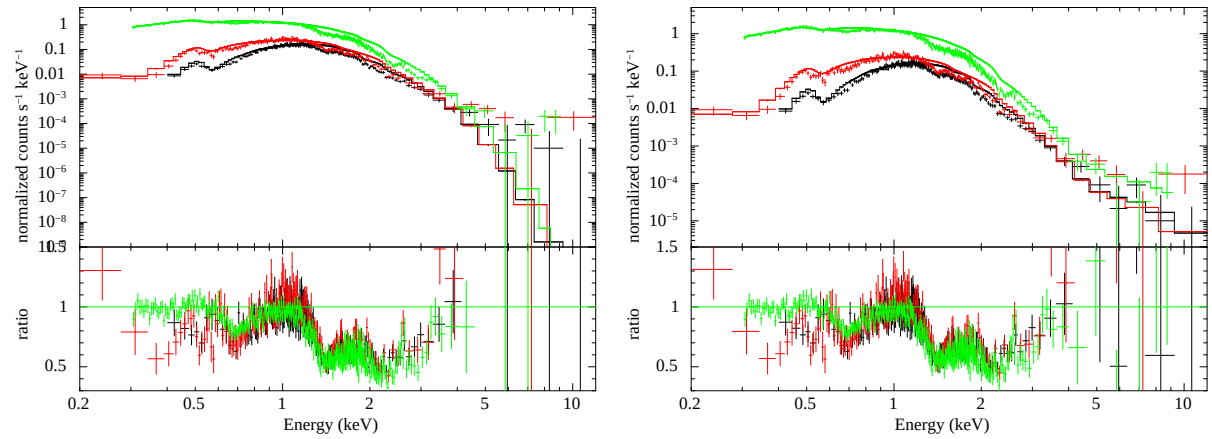

図 138: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差。左:pow 無し。右:pow 有り。

表 22: フィッティングパラメータ

Model	Parameter	unit	Joint (no pow)	Joint (pow)
wabs	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.10\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.10\ ^{+0.02}_{-0.02}$
bbodyrad	kT	keV	$0.098\ ^{+0.015}_{-0.007}$	$0.098\ ^{+0.016}_{-0.008}$
bbodyrad	norm	—	$2248\ ^{+1702}_{-1228}$	$2229\ ^{+1595}_{-1245}$
		km♯	$9.5\ ^{+3.1}_{-3.1}$	$9.4\ ^{+2.9}_{-3.2}$
bbodyrad	kT	keV	$0.306\ ^{+0.005}_{-0.005}$	$0.301\ ^{+0.007}_{-0.009}$
bbodyrad	norm	—	$34.0\ ^{+3.3}_{-3.5}$	$35.6\ ^{+4.2}_{-3.9}$
		km♯	$1.17\ ^{+0.05}_{-0.06}$	$1.19\ ^{+0.07}_{-0.07}$
powerlaw	PhoIndex	—	—	$0.6\ ^{+2.4}_{-2.9}$
powerlaw	norm	—	—	$5.4\text{E-}07\ ^{+2.3E-05}_{-5.4E-07}$
gabs	LineE	keV	$0.720\ ^{+0.009}_{-0.008}$	$0.721\ ^{+0.008}_{-0.008}$
gabs	Sigma	keV	$0.07\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.07\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.04\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$0.05\ ^{+0.03}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$1.424\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$1.424\ ^{+0.009}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.11\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.11\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.13\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.21\ ^{+0.04}_{-0.04}$	$2.20\ ^{+0.05}_{-0.04}$
gabs	Sigma	keV	$0.45\ ^{+0.07}_{-0.05}$	$0.44\ ^{+0.07}_{-0.05}$
gabs	Tau	—	$0.8\ ^{+0.2}_{-0.1}$	$0.7\ ^{+0.2}_{-0.2}$
gabs	LineE	keV	$2.99\ ^{+0.09}_{-0.07}$	$2.97\ ^{+0.09}_{-0.08}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.07}_{-0.06}$	$0.14\ ^{+0.08}_{-0.06}$
gabs	Tau	—	$0.18\ ^{+0.11}_{-0.08}$	$0.15\ ^{+0.10}_{-0.08}$
$\chi^2/d.o.f$			1195.37/798(1.50)	1187.22/796(1.49)
Null hypothesis probability			2.16E-18	5.63E-18
Flux@0.2-12.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.20\text{E-}12\ ^{+3.30E-15}_{-1.68E-13}$	$2.21\text{E-}12\ ^{+-5.10E-15}_{-1.73E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV		$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.19\text{E-}12\ ^{+1.90E-15}_{-2.19E-13}$	$2.19\text{E-}12\ ^{+3.20E-15}_{-2.07E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。

♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

次に wabs を変えた場合。

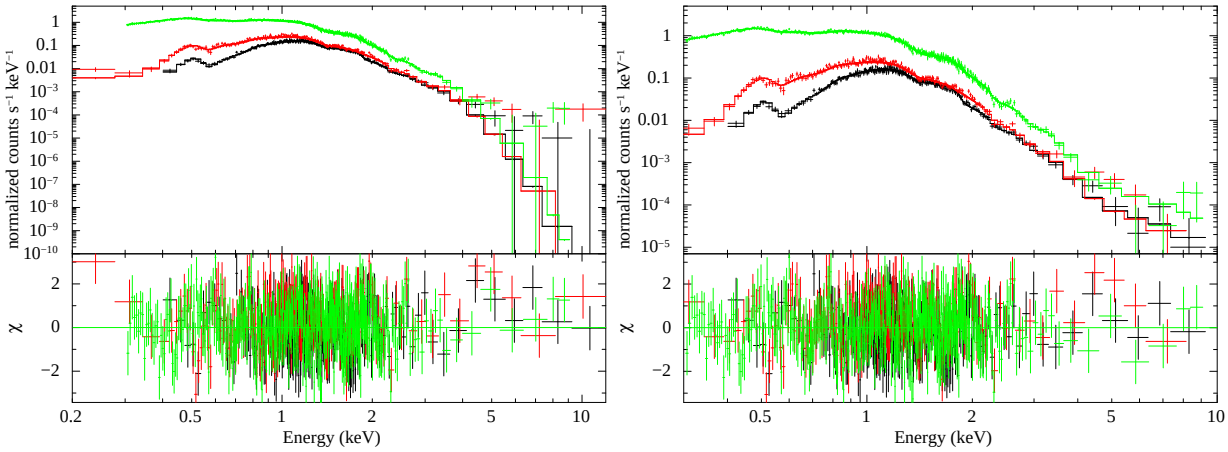

図 139: フィッティングしたモデルとその残差。左:pow 無し。右:pow 有り。

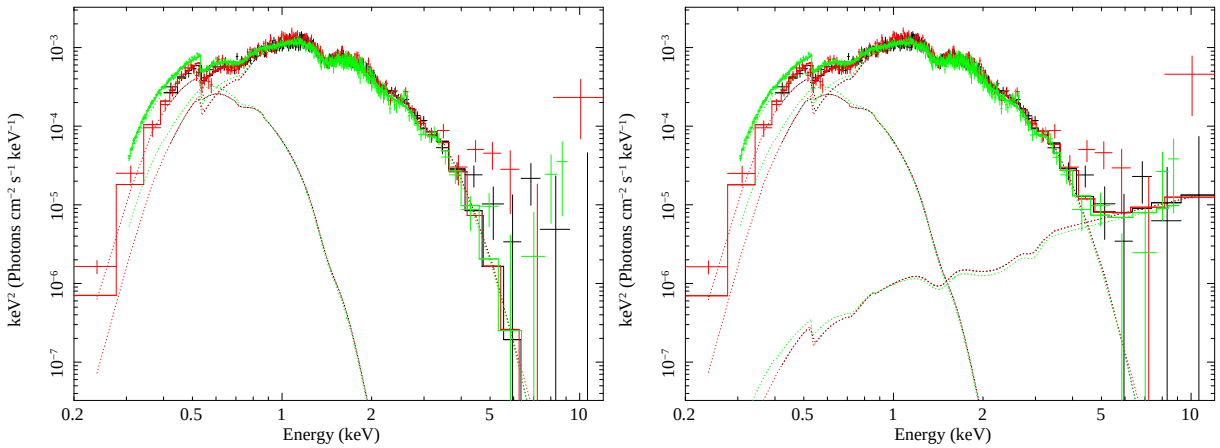

図 140: $\nu F\nu$ スペクトル。左:pow 無し。右:pow 有り。

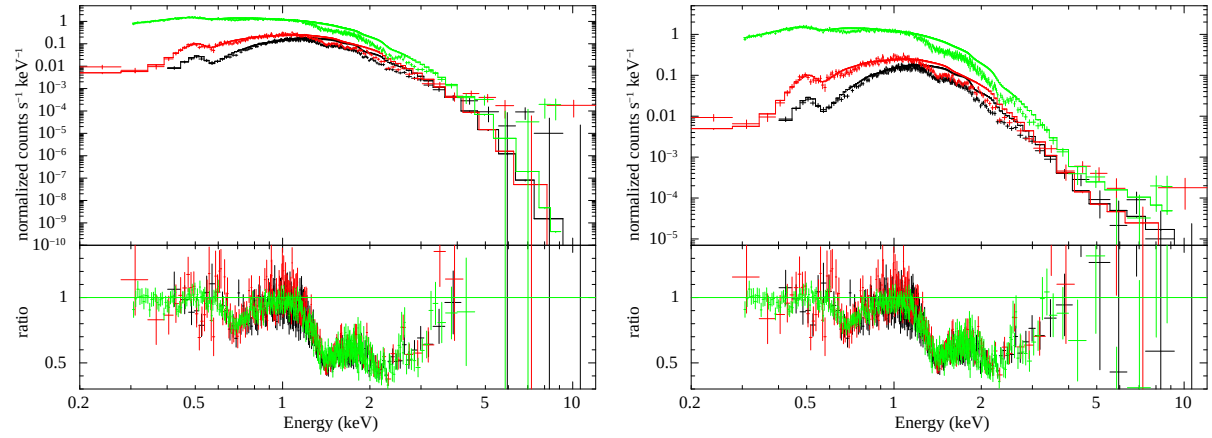

図 141: フィッティングしたモデルから gabs 成分を抜いたものとその場合の残差。左:pow 無し。右:pow 有り。

表 23: フィッティングパラメータ。

Model	Parameter	unit	Joint(diff. wabs, no pow)	Joint (diff. wabs, pow)
constant(XIS)	factor	—	$1.00\ ^{----}_{----}$	$1.00\ ^{----}_{----}$
constant(pn)	factor	—	$0.87\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.87\ ^{+0.01}_{-0.01}$
wabs(XIS)	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.17\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.17\ ^{+0.02}_{-0.02}$
wabs(pn)	nH	$10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$	$0.12\ ^{+0.02}_{-0.02}$	$0.12\ ^{+0.02}_{-0.02}$
bbodyrad	kT	keV	$0.094\ ^{+0.011}_{-0.006}$	$0.094\ ^{+0.011}_{-0.007}$
bbodyrad	norm	—	$4155\ ^{+3000}_{-2087}$	$4.193\ ^{+3134}_{-2093}$
		km♯	$12.9\ ^{+4.0}_{-3.8}$	$13.0\ ^{+4.2}_{-3.8}$
bbodyrad	kT	keV	$0.302\ ^{+0.006}_{-0.005}$	$0.297\ ^{+0.008}_{-0.009}$
bbodyrad	norm	—	$42.4\ ^{+4.4}_{-4.4}$	$45.0\ ^{+5.5}_{-5.2}$
		km♯	$1.30\ ^{+0.07}_{-0.07}$	$1.34\ ^{+0.08}_{-0.08}$
powerlaw	PhoIndex	—	—	$1.1\ ^{+2.1}_{-1.7}$
powerlaw	norm	—	—	$1.5\text{E-}06\ ^{+4.6E-05}_{-1.5E-06}$
gabs	LineE	keV	$0.718\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$0.718\ ^{+0.009}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.06\ ^{+0.01}_{-0.02}$	$0.06\ ^{+0.02}_{-0.02}$
gabs	Tau	—	$0.04\ ^{+0.02}_{-0.01}$	$0.04\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	LineE	keV	$1.423\ ^{+0.009}_{-0.009}$	$1.422\ ^{+0.009}_{-0.009}$
gabs	Sigma	keV	$0.11\ ^{+0.01}_{-0.01}$	$0.11\ ^{+0.01}_{-0.01}$
gabs	Tau	—	$0.14\ ^{+0.03}_{-0.02}$	$0.14\ ^{+0.03}_{-0.02}$
gabs	LineE	keV	$2.21\ ^{+0.05}_{-0.04}$	$2.19\ ^{+0.05}_{-0.05}$
gabs	Sigma	keV	$0.48\ ^{+0.08}_{-0.06}$	$0.47\ ^{+0.08}_{-0.06}$
gabs	Tau	—	$0.93\ ^{+0.25}_{-0.17}$	$0.81\ ^{+0.24}_{-0.20}$
gabs	LineE	keV	$3.00\ ^{+0.08}_{-0.08}$	$2.97\ ^{+0.01}_{-0.09}$
gabs	Sigma	keV	$0.16\ ^{+0.10}_{-0.06}$	$0.15\ ^{+0.09}_{-0.06}$
gabs	Tau	—	$0.17\ ^{+0.16}_{-0.09}$	$0.13\ ^{+0.11}_{-0.07}$
$\chi^2/d.o.f$			960.09/796(1.21)	950.51/794(1.20)
Null hypothesis probability			5.31E-05	1.03E-04
Flux@0.2-12.0 keV	(XIS)	$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.10\text{E-}12\ ^{+1.53E-13}_{-1.47E-13}$	$2.12\text{E-}12\ ^{+1.38E-13}_{-1.29E-13}$
Flux@0.2-12.0 keV	(pn)	$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+4.70E-15}_{-1.62E-13}$	$2.18\text{E-}12\ ^{+3.70E-15}_{-1.32E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV	(XIS)	$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.10\text{E-}12\ ^{+1.51E-13}_{-1.40E-13}$	$2.10\text{E-}12\ ^{+1.28E-13}_{-1.21E-13}$
Flux@0.3-4.0 keV	(pn)	$\mathrm{ergs\,cm^{-2}\,s^{-1}}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+4.70E-15}_{-1.68E-13}$	$2.16\text{E-}12\ ^{+1.30E-15}_{-1.51E-13}$

各パラメータの誤差は 90% confidence。
♯ bbodyrad モデルの Normalization は天体までの距離を 2.0 kpc と仮定した場合のソースの輻射領域半径 [km] を示す。

参考文献

[1] Araya, R. A. & Harding, A. K., 1999, ApJ., 517, 334-354

[2] Baym, G. & Pethick, C., 1979, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 17, 415-

[3] Bignami, G. F. et al., 2003, Nature, 423, 6941, 725-727

[4] Bignami, G. F. et al., 2004, Memorie della Societa Astronomica Italiana, 75, 448

[5] Bloom, J. S. et al., 2009, The Astrophysical Journal, 691, 723-737

[6] Buccheri, R. et al., 1983, Astronomy & Astrophysics, 128, 245-251

[7] Gal-Yam, A., 2012, Science, 337 ,927-932

[8] Gotthelf, E. V. & Halpern, J. P., 2007, The Astrophysical Journal, 664, L35-L38

[9] Hailey, C. J. & Mori, K., 2002, The Astrophysical Journal, 578, L133-L136

[10] Halpern, J. P. & Gotthelf, E. V., 2011, ApJ., 733, L28-L31

[11] Helfand, D. J. & Becker, R. H., 1984, Nature, 307, 215-221

[12] Kaluzienski, L. J. et al., 1977, ApJ, 212,202-

[13] Larson, S. , 1996, Astronomy & Astrophysics, 117, 197-201

[14] Liu, D. B. et al., 2006, The Astrophysical Journal, 644, 439-444

[15] Luca, A. De et al., 2004, Astronomy & Astrophysics, 418, 625-637

[16] Luca, A. De et al., 2011, Astronomy & Astrophysics, 525, A106

[17] Makishima, K. et al., 2006, The Astrophysical Journal, 525, 978-994

[18] Mereghetti, S. et al., 2002, The Astrophysical Journal, 581, 1280-1285

[19] Mészáros, P. & Nagel, W., 1985, The Astrophysical Journal, 298, 147-160

[20] Mihara, T. et al., 2004, The Astrophysical Journal, 610, 390-401

[21] Mori, K. et al., 2005, The Astrophysical Journal, 631, 1082-1093

[22] Mori, K. et al., 2006, The Astrophysical Journal, 648, 1139-1155

[23] Nakahira, S. et al., 2010, PASJ, 62, L27-L32

[24] Pavlov, G. G. et al., 2002, The Astrophysical Journal, 569, L95-L98

[25] Poutanen, J. & Vurm, I., 2009, The Astrophysical Journal, 690 L97-L100

[26] Racusin, J. L. et al., 2008, Nature, 455, 183-

[27] Sako, M. et al., The Astrophysical Journal, 623, 973-999

[28] Sato, R. et al., 2003, ApJ, 599, L9

[29] Santangelo, A., 1999, The Astrophysical Journal, 523, 85-88

[30] Sanwal et al., 2002, The Astrophysical Journal, 574, 61-64

[31] Takahashi et al., 2009, Advance in Astronomy, 2010, 1-6

[32] Tsujimoto, M. et al., 2011, Astronomy & Astrophysics, 525, A25

[33] Uemura, M. et al., 2003, Nature, 423, 843

[34] Zavlin, V. E. et al., 2000, The Astrophysical Journal, 540, L25-L28

[35] Zavlin, V. E. et al., 2004, The Astrophysical Journal, 606, 444-451

[36] Zdziarski, A. A. & Gierliński, M., 2004, Prog. Theor. Phys. Suppl., 155, 99

[37] Becker, W., 2009, 『Neutron Stars and Pulsars』

[38] Landau, L.D. & Lifshitz, E. M., 1969, 『Statistical Physics』

[39] Lorimer, D. R. & Kramer, M., 2004, 『Handbook of Pulsar Astronomy』

[40] Shapiro, S. & Teukolsky, S., 1983, 『Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars』

[41] 柴崎徳明, 1993, 『中性子星とパルサー』

[42] すざくヘルプデスク, 2009, 『「すざく」ファーストステップガイド第 4.0.3 版』 (http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep_web/fstep.html)

[43] XMM-Newton Community Support Team, 2012, 『XMM-Newton Users Handbook Issue 2.10』(http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xmm/uhb/)

[44] http://maxi.riken.jp/asj2010/asj2010_maxipress.html

[45] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/teachers/lessons/xray_spectra/background-lifecycles.html

[46] Nishimura, O., 2012, (private communication)

謝辞

この博士論文を執筆するにあたり、これまでの研究において様々な指導、助言をしていただいた指導教官の吉田 篤正先生に深く感謝致します。また、この論文の副査をして頂いた本大学の前田 はるか先生、三井 敏之先生、理化学研究所の三原 建弘氏には論文執筆にあたり様々な指摘、助言を頂きました。ありがとうございました。長野工業高等専門学校の西村 治氏には本研究の結果を議論するにあたり、理論面から協力していただきました。ここに感謝致します。

そして、私が所属していた吉田研究室の皆さんには研究だけでなく生活の面でも大変お世話になりました。おかげで博士課程の間、楽しく過ごすことができました。本当にありがとうございました。

本研究は平成 22 年度日本科学協会笹川科学研究助成金及び、青山学院大学大学院薦田先端学術奨学金の助成により実施されたものです。ここに記して感謝の意を表します。

最後になりましたが、博士課程に進学する機会を与えてくださり、あらゆる面で私を信じて温かく見守り続けてくれた家族に感謝致します。

本研究に携わってくださった全ての方々に重ねて厚く謝意を表し、謝辞といたします。