

2011年度 芝浦工業大学大学院

修 士 論 文

題目:

『MAXIによる Be 型 X 線連星パルサーのアウトバーストの観測』

専 攻 工学研究科 (修士課程) 電気電子情報工学専攻

学籍番号 m110060-1

ふりがな そおとめ てつや

氏 名 五月女 哲哉

指導教員 久保田あや 准教授
理化学研究所 前任研究員 三原建弘

目次

第1章 はじめに、研究目的	1
第2章 Be 型連星パルサーとは	2
2.1 X 線天文学	2
2.2 X 線検出器	4
2.3 エディントン光度	5
2.4 X 線連星の構造	5
2.5 輝線を示す恒星	6
2.6 Be 星	7
2.7 中性子星	9
2.8 回転駆動型パルサー	10
2.9 X 線連星	11
2.9.1 放射機構	11
2.9.2 質量降着機構	11
2.9.3 大質量 X 線連星	12
2.9.4 低質量 X 線連星	13
2.9.5 Be 型 X 線連星	14
2.9.6 X 線連星パルサー	14
第3章 MAXI	16
3.1 国際宇宙ステーション	16
3.2 日本実験棟「きぼう」	16
3.3 全天 X 線監視装置	17
3.4 GSC (Gas Slit Cameras)	17
3.5 SSC(Solid-state Slit Cameras)	19
3.6 観測原理	21
3.7 運用体系	22
3.7.1 データ通信	22
3.7.2 放射線異常領域での運用	22
3.8 MAXI の視野と特徴	22
第4章 データ解析	24
4.1 各天体の光度曲線	24
4.2 アウトバーストのリストアップ	30
4.3 各天体の畳み込み光度曲線	31
4.3.1 GRO J1008-57	33
4.3.2 XTE J1858+034	35
4.4 スペクトル解析	37

4.4.1	光度曲線と硬度比 による観測期間の分割	37
4.4.2	Be 型 X 線連星パルサーのスペクトルモデル	40
4.5	A 0535+262 のスペクトル	42
4.6	GX 304-1 のスペクトル	48
4.7	フェーズ毎に足し合わせた解析	55
4.7.1	A 0535+262	55
4.7.2	GX 304-1	57
4.7.3	GRO J1008-57	59
4.7.4	LS V +44 17	60
4.7.5	V 0332+53	61
4.7.6	XTE J1946+274	62
4.8	ピーク光度と増光の傾きの相関	63
4.8.1	直線でのフィット	63
4.9	ノーマライズした光度曲線でのアウトバーストの比較	67
4.10	ガウス関数での近似	74
第 5 章	議論	76
5.1	スペクトル解析	76
5.2	光度曲線の傾き解析	78
5.2.1	FWHM とピーク Flux	78
5.2.2	FWHM と他のパラメータとの比較	80
5.2.3	2 段階の傾きがあるとき	84
第 6 章	まとめ	86
6.1	光度曲線の軌道周期での畳み込み	86
6.2	スペクトル解析	86
6.3	ピーク光度と増光の傾きの相関	86
付 録 A	MAXI で得られた PSR B1259-63 の光度曲線と先行研究との比較	88
A.1	イメージによる確認	89
A.2	光度曲線の作成	91
付 録 B	アウトバーストの直線でのフィット	92
付 録 C	アウトバーストのガウス関数でのフィット	98

第1章 はじめに、研究目的

私たちが夜空を眺めたときたくさんの恒星の輝きを目にすることができる。目に見えている可視光では穏やかな星空が広がっているが、実際には目に見える輝きだけではなく想像もできないような激しい活動が起こっている。

光り輝く恒星はその寿命の最後に超新星爆発を起こす。元の質量が太陽の8倍から20倍までの恒星は爆発後、中心に中性子星を残す。中性子星は1930年代から原子物理学の発展の過程で理論的に予想されていた特殊な天体である。1967年に電波による観測から、周期的に電波強度が増減するパルサーが見つかり、その存在は現実のものとなった。

X線パルスを出す中性子星の中には恒星と連星系をなしているものもある。X線連星パルサーである。恒星からのガスが流れ込む事により輝くので、降着駆動型パルサーとも呼ばれている。X線連星パルサーには中性子星の回転によるパルス周期、伴星との連星周期の2つの周期変動を持つものがある。また、それらより長い超軌道周期を持つものもある。超軌道周期はその変動が30日以上と非常に長く、その周期の決定には長期間の連続的かつ継続的な観測が必要である。

X線連星パルサーのうち主星がパルサーで伴星がOB型星またはBe型星の大質量星であるX線連星系をBe型X線連星系と呼ぶ。長周期の楕円軌道を持ち、パルサーが伴星に一番近づく近星点でアウトバーストという増光現象を起こす。これは中性子星が伴星に作られた星周円盤を突っ切るときに発生していると考えられている。

国際宇宙ステーションに取り付けられた全天X線監視装置MAXIは現行の全天サーベイ型の検出器であり、RXTE衛星搭載の全天観測装置(ASM: All-Sky Monitor)の2~10倍の感度を持ち、RXTE/ASMで追う事の出来なかった5mCrabまでの暗い天体の変動まで追う事が出来る。また、時間分解能も高く(最大50マイクロ秒)、超長周期からミリ秒まで、幅広い時間の変動を追う事が出来る。MAXIで観測された天体の光度曲線はMAXIホームページ¹で公開されており、Be型連星もその中にある。2011年11月の時点でMAXIは25個のBe型X線連星パルサーの強度変動をモニターしている、そのうち13天体から35回のアウトバーストを観測することに成功した。

本研究では主にBe型X線連星パルサーの時間的変動をMAXIが全天の監視をし始めたときから今までのデータを使い解析し、加えてそのBe型X線連星パルサーから得られるX線のスペクトル解析を行いアウトバーストの発生の原因について調べる。また各アウトバーストの明るさと明るさの変化率などの比較を行いアウトバーストの特徴を調べ考察を行う。

¹<http://maxi.riken.jp>

第2章 Be型連星パルサーとは

2.1 X線天文学

電磁波の一つである X 線は、ドイツの物理学者レントゲンにより 1895 年に発見された。この X 線が広大な宇宙空間に無数に存在する天体から発せられているとは、当時は誰も知らなかった。なぜなら X 線は地球の厚い大気によって吸収されてしまうので、地表の観測装置まで到達しなかったのである。図 2.1¹は大気圏外から入射した電磁波が到達できる高度について示したものである。第二次世界大戦後、人類はロケットを手にし大気圏外まで観測装置を打ち上げることが可能になった。初めて天体からの X 線の検出に成功したのは太陽からのものであった。しかし、その X 線強度は太陽光に比べて極めて弱いものであった。図 2.2²は太陽を可視光・X 線で観測した図である。アメリカのロッシや、2002 年度ノーベル物理学賞を受賞したジャコーニらは太陽以外の天体も

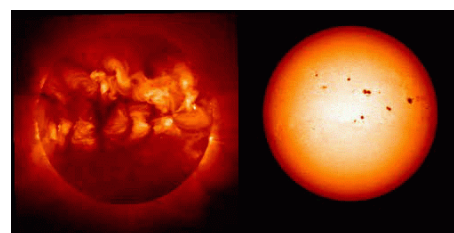
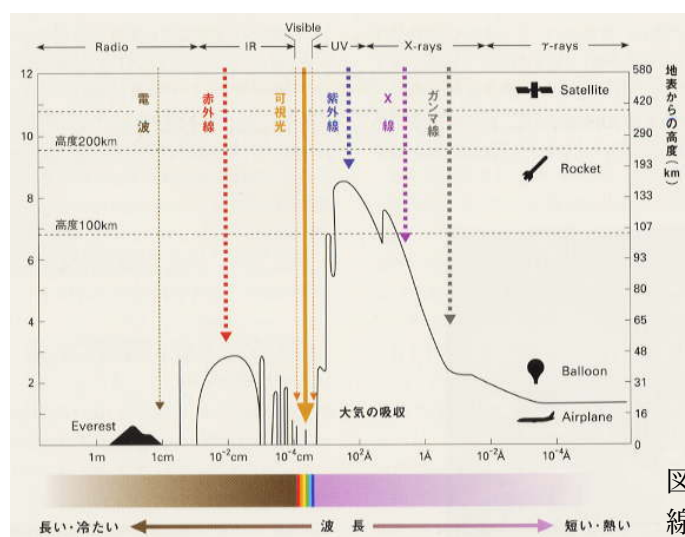


図 2.2: 太陽の X 線・可視光画像 (ようこう軟 X 線望遠鏡により撮影：宇宙研提供)

図 2.1: 大気圏外から入射した電磁波が到達できる高度

X 線を放出しているのではないかと推測し、まず、最初に月からの X 線 (太陽からの反射 X 線) を観測するために観測装置を打ち上げた。その時、偶然にも全天で一番明るい X 線天体が、観測装置の視野内に入ったことから X 線天文学は始まった。その天体は、さそり座で一番明るい X 線星「さそり座 X-1」と呼ばれるようになった。今では全天に無数に存在する各種の天体も多かれ少なかれ X 線を放射していることがわかっている。その後、米欧日はブラックホール候補天体からの X 線放射を捉えることなど数々の発見をしてきた。中でも日本は自国の観測衛星を持ちつづけ、世界の X 線天文学を発展させてきた。X 線で宇宙を観測するとブラックホール天体や超新星爆発、

¹<http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/11/p4.5.html>

²http://www-space.eps.s.u-tokyo.ac.jp/introduction/corona_heating.html

活動銀河核などが明るく輝いており、爆発や衝突などのダイナミックな現象に富んだ世界を見ることができる。このように、宇宙の全貌を把握するにはX線での観測とそのデータ解析が必須となってくる。

2.2 X線検出器

日本を含め世界各国で現在までに打ち上げられ運用されてきた X 線観測衛星は様々な特徴を持つ X 線検出器を搭載してきた。これらの検出器は目で見えない X 線を捉えるために、基本的には検出器内のセンサ部分の媒体と X 線との相互作用で放出される電子やシンチレーション光を捉え、それを電子信号に変換し X 線の強度とエネルギーを求める方法を採用してきた。これらのセンサ部分と電気回路をあわせた検出器は打ち上げ時の振動と、宇宙空間における苛酷な環境に耐えられるものでなくてはならないので、壊れにくく動作が安定したものでなければならない。このような厳しい制限を満たし今までに打ち上げられてきた代表的な検出器を挙げると、ガス比例計数管、シンチレーション検出器、半導体検出器などがある。

中でもガス比例計数管は構造が比較的簡単であるので他の検出器に比べ容易に X 線の受光面積を大きくできる利点がある。またシンチレーション検出器の放射化や半導体検出器の格子欠陥のように宇宙空間において性能を決定的に劣化させてしまう現象は起こりにくく、安定した性能を実現できる。さらに、検出器内に詰めるガスの種類を変えることにより X 線のエネルギー感度を 0.1 ~ 100keV まで変えられるなどの汎用性もある。

2.3 エディントン光度

質量 M を持ち、光度 L で光っている天体への、水素原子からなる球対称な降着流を考える。質量の違いから重力はほぼ陽子に、光子との断面積の違いから放射圧はほぼ電子に働くと思なせる。陽子と電子はクーロン力で結ばれているとする。すると、天体から距離 r にある水素原子に働く重力は

$$F_g = \frac{GMm_H}{r^2} \quad (2.1)$$

で表される。ここで m_H は水素原子の質量である。一方で光度が L なので、天体から放射されるエネルギーフラックス f は

$$f = \frac{L}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

で表され、よって運ばれる運動量フラックスは

$$\frac{f}{c} = \frac{L}{4\pi r^2 c} \quad (2.3)$$

となる。したがって、水素原子に働く放射圧は

$$\frac{\sigma_T}{c} f = \frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c} \quad (2.4)$$

である。重力と放射圧がつりあった場合、水素原子は降着することができなくなる。このときの光度をエディントン光度 L_{edd} と呼び、

$$L_{edd} = \frac{4\pi c G M m_H}{\sigma_T} = 2 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{erg s}^{-1} \quad (2.5)$$

で与えられる。ここで σ_T はトムソン散乱面積である。つまり質量 M の天体への球対称降着流では、天体はエディントン光度 L_{edd} 以上では輝くことができない。

2.4 X線連星の構造

X線星とは、X線を大量に放出しているコンパクト天体のことをいう。これらは銀河面上や球状星団などに多く発見されている (図 3.4) ことから、銀河系内の天体であることがわかる。大半のX線天体は連星系を成しており、それは軌道周期に対応するX線の強度変動 (modulation) などからわかる。質量降着によって輝く天体の絶対光度には、エディントン限界光度の制限があるので、天体のX線光度には上限がある。X線連星は縮退した天体と通常の恒星によって構成される。縮退した天体には中性子星、ブラックホール、白色矮星があり、そこに恒星からの質量降着 (accretion) が起こり、降着円盤 (accretion disk) が形成されている。X線連星は伴星の質量によって低質量X線連星 (Low-Mass X-ray Binary) と大質量X線連星 (High-Mass X-ray Binary) の2つのタイプに分類されている。本研究では主に大質量X線連星に分類される「Be型X線連星」について詳しく解析を行う。

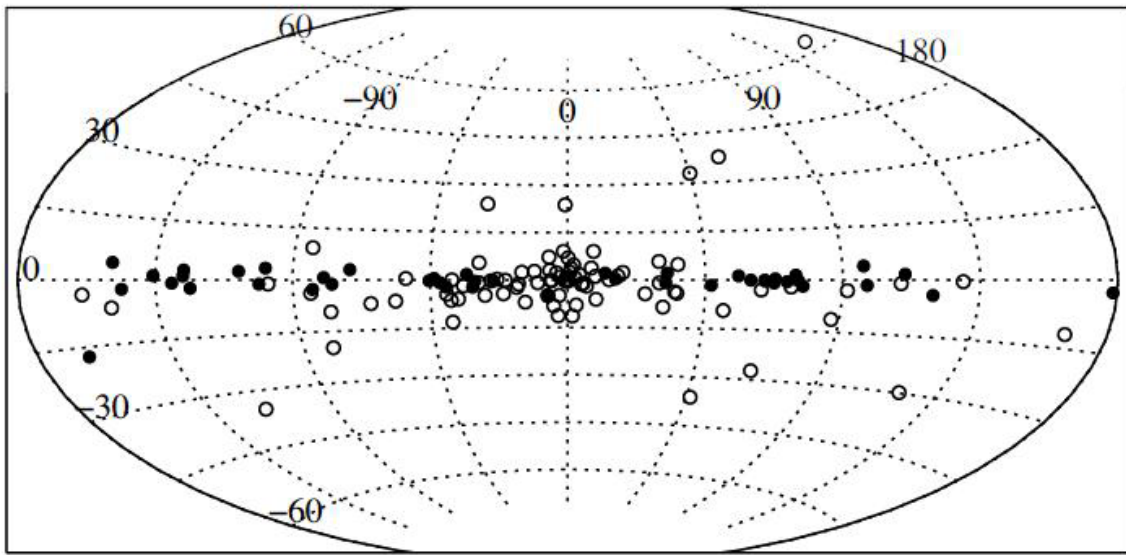


図 2.3: 大質量 X 線連星と低質量 X 線連星の分布図 [8]。黒丸は大質量 X 線連星 (52 天体) を、白丸は低質量 X 線連星 (86 天体) を表している。座標は銀河座標であり、数字はそれぞれ銀経・銀緯を示している。

2.5 輝線を示す恒星

恒星のスペクトル中に見られるスペクトル線は太陽のフラウンホーファー線のように通常は吸収線のみである。これは、恒星が内部ほど高温であるということに関係している。しかし、恒星の中には輝線を示すものも存在する。輝線は背景にくらべて温度の高い領域があるときに見られる。星の光球の外に広く希薄な大気や恒星風があれば、視線が光球と重なる部分では星の光を吸収するがそれ以外の部分は放射に寄与するので、観測されるスペクトルには輝線が見られることになる。星が星周円盤を持つ場合も同じである。

このような外層大気・恒星風や星周円盤を持つ星にはさまざまな質量・進化段階のものが存在する。例えば前主系列段階の星には降着円盤があり、そこから輝線が出ている。これらの星には、低質量の T タウリ型星と中質量星のハービッグ Ae 星 (スペクトル型が A 型) とハービック Be 星 (スペクトル型が B 型) がある。後者は総称してハービッグ Ae/Be 星と呼ばれる。

主系列段階から巨星段階にかけては、Be 星と呼ばれるグループの輝線星が存在する。Be 星は自転が速く星自身が放出した物質からなる星周円盤を持ち、そこから輝線が出ていると考えられている。主系列段階を終えた星で輝線を示すものとしては、O 型超巨星で輝線を示す Of 星、最も明るい星のグループである高輝度青色変光星 (Luminous Blue Variable, LBV)、大きな質量放出を行っているウォルフ-ライエ星がある。そのほかにも、漸近巨星分枝星 (Asymptotic Giant Branch) では固体微粒子 (塵) による輝線が赤外線域で見られる。(日本評論社, 恒星 (シリーズ現代の天文学) より)

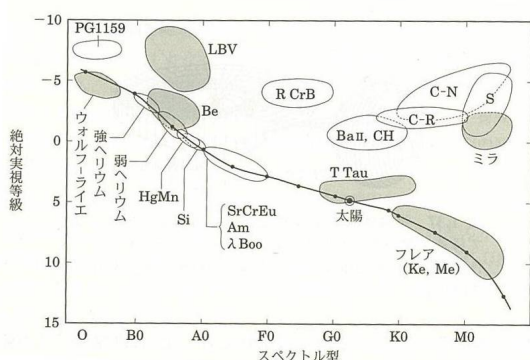


図 2.4: HR 図上での輝線を示す恒星

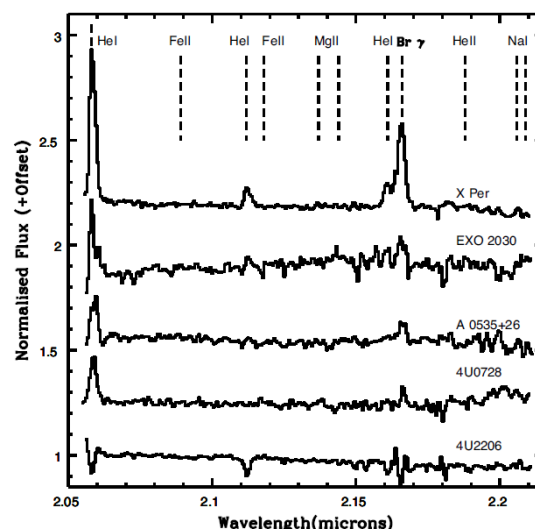


図 2.5: 輝線を持つ Be 型 X 線連星パルサーのスペクトル

2.6 Be 星

Be 型星とは光度クラスが III-V (巨星、準巨星、主系列星) で歴史上一度でも水素の輝線を示したとの記録がある星として定義される。しかしこの定義ではハービックの Ae/Be 星などもってしまうためそれら輝線星との混同をさけるために「典型的な Be 星」という言葉が使われることが多い。

一般に大質量星 (O 型星と B 型星。OB 型星と総称される。) は星の光により加速された強い恒星風をもつ。Be 星も比較的強い恒星風を持つが星の周囲 (赤道面方向) にガス円盤を持つところが他の OB 型星と異なる点である。Be 星の輝線はこのガス円盤からでている。このガス円盤は星自身が放出したガスにより作られており、動径方向には遠心力で、円盤の赤道面と垂直な方向 (z 方向) にはガスの圧力で支えられている。回転速度は数百 km s^{-1} 程度であるのに対し、音速は 20m s^{-1} 程度なので、Be 星のガス円盤は、動径方向の広がりに対して z 方向の広がりが 1/10 以下の薄い円盤である。回転はケプラー回転であり、動径方向の速度成分は非常に小さく、約 1km s^{-1} という上限が求められているだけである。回転で支えられている円盤の輝線は波長の長い側と短い側の両方にピークを持つ形となる。二つのピークの波長は円盤の外縁の回転速度に対応しているので、輝線を観測することにより Be 星ガス円盤の半径 (正確には、当該の輝線を出している半径) を知ることができる。大まかにそれは星の半径の約 10 倍である。前述のように、Be 星のガス円盤は星自身が放出したガスにより作られている。ケプラー回転している円盤では、単位質量あたりの角運動量は星からの距離 r とともに $r^{1/2}$ に比例して増加する。つまり、星から放出されたガスは角運動量をもらわない限り外向きに広がって円盤を形成することができないのである。

それでは、ガス円盤の角運動量はどこからくるのだろうか？ Be 星には単独星も多いので、伴星などの外部にその起源を求めることはできない。じつは、必要な角運動量は中心の星によって与えられるのである。星がガス円盤の内縁にトルクを与え、そのトルクが、粘性を通して円盤全体に広がっていくガス円盤が形成される。このシナリオは 1991 年に発表されたがあまりに奇抜な考え方であったため定着するまでに約 10 年かかった。

それでは、星はどのようにしてガスに角運動量を与えているのだろうか？ 実はその答えはまだわかっていない。これは Be 星の活動性を理解する上で最も重要かつ最も解決困難な問題であると考えられている。Be 星がほとんど臨界速度で自転していて、非動径振動によりガスが回転方向に

加速され、出て行くにではないかという考えや、剛体回転する大域磁場により放出物質に角運動量を与えるとする考え方などがあるが、結論を得るにはまだ多くの研究が必要である。

2.7 中性子星

中性子はチャドウィックによって1932年に発見された。中性子発見からたった2年後の1934年、バーデとツヴィッキーは、中性子が非常に密に集まってできている星、中性子星という言葉を使った画期的な概念を提出した。さらにエネルギーの見積もりから、この中性子星は超新星爆発で作られるであろうことを予言した。中性子星は、その後30数年、思考の産物としてとどまるが、1967年、ベルとヒューイッシュによってパルサーが発見され、現実存在する天体であることが証明された。

中性子星は質量が太陽の1～2倍程度、半径10km程度、大気の厚さは1m程度で中性子が主成分である天体である。平均密度は太陽の密度の 10^{15} 倍もあり、 1cm^3 あたりで10億t、これは富士山一つ分の重さに相当する。その桁外れに大きい密度のため中性子星の表面での重力は中性子星の質量を $1M_{\odot}$ 、半径を10kmとすると地球の重力の1300億倍もの大きさにもなり、脱出速度は 163Mm/s (光速の54%)に、重力赤方偏移は0.24に達する。

中心の物質が重力で縮み、電子が縮退した星を白色矮星という。この白色矮星の最大質量は太陽の1.44倍(チャンドラセカール限界)で、それ以上のものは存在しえない。これを超えた場合、あまりに強い重力のため電子が相互に接近し退けあい、電子が陽子と結合して中性子となる。質量が太陽の8倍より重い星の最後の爆発、重力崩壊型超新星では、星の大部分は吹き飛びこの芯が中性子星になる。爆発に先立つ重力崩壊(収縮)の過程で電子が原子核に捕獲され、原子核中の陽子は中性子に変わっていく。中性子の数が過剰になると、中性子が原子核から漏れだし、自由中性子となる。原子核は溶解してやせ細り、ほとんど自由中性子でできた星が誕生する。これが中性子星である。中性子星内部では角砂糖一個の体積の重さが10億トンに、また表面では重力の強さが地球表面の値の1000億倍にもなる。中性子星は物質が極限状態にある星といえる。図2.6[13]に中性子星の内部の模式図を示す。

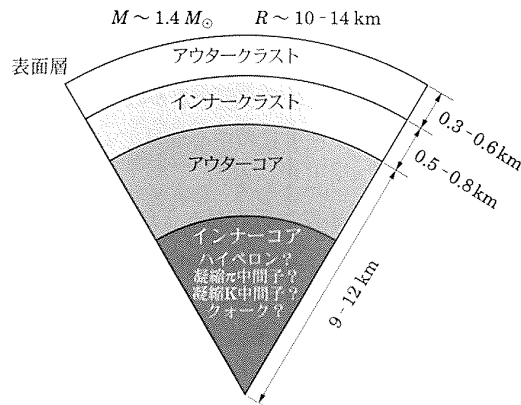


図 2.6: Be 中性子星の内部の模式図

2.8 回転駆動型パルサー

単独で存在する中性子星で、その回転エネルギーを放射エネルギーに変えてパルスを出すパルサーを回転駆動型パルサーと呼ぶ。

回転駆動型パルサーのもっとも簡単なモデルは回転する棒磁石である。磁石の回転に応じて N 極と S 極が交互に現れ周期的に磁場が変動する。この過程は電磁気学で言う磁気双極子放射として知られている。中性子星の半径を R 、磁極の磁場を B とすれば、単位時間の放射強度は磁気双極子 $|\vec{\mu}| = BR^3/2$ の時間による 2 階微分を使って以下のように書かれる。

$$W = \frac{2|\vec{\mu}|^2}{3c^3} = \frac{B^2 R^6 \sin^2 \theta}{6c^3} \omega^4 \quad (2.6)$$

ここで θ は回転軸と磁極のなす角、 ω は自転の角周波数で、その周波数 $\nu [Hz]$ や自転周期 $P [s]$ は、 $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/P$ という関係である。

一方、中性子星の回転エネルギーは、慣性モーメント I の剛体回転で近似すると以下のようになる。

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I \omega^2 = 2\pi I P^{-2} = 2.0 \times 10^{46} \left(\frac{I}{10^{45} \text{gcm}^2} \right) \left(\frac{P}{1\text{s}} \right)^{-2} [\text{erg}] \quad (2.7)$$

ここで半径が $R=10\text{km}$ 、質量が太陽の 1.4 倍 ($M = 1.4M_{\odot} = 2.8 \times 10^{33}\text{g}$, $M_{\odot}$: 太陽質量) の中性子星の慣性モーメントは、 $I = (2/5)MR^2 \simeq 1 \times 10^{45}\text{gcm}^2$ 程度である。

パルサーは電磁波を放射するとエネルギーを失い、その反作用で回転運動は減速する。言い換えると、回転駆動型パルサーは回転運動の損失により電磁波放射のエネルギーをまかなっている。放射でエネルギーを失うにつれて、パルサーの自転周期は徐々に遅くなる。回転運動エネルギーの時間変化は以下のようになる。

$$\frac{d}{dt} E_{rot} = \dot{E}_{rot} = I\omega\dot{\omega} = -4\pi^2 I \dot{P} P^{-3} \quad (2.8)$$

これが放射によって減少するならば、放射強度の式 2.1 と回転エネルギーの損失の式 2.3 は等しい。

$$W = -\dot{E}_{rot} \quad (2.9)$$

パルサーの基本的な観測量は自転周期 $P [s]$ とその変化率 $\dot{P} [s/s]$ (または ν とその変化率 $\dot{\nu}$) なので、星の半径や慣性モーメントを仮定すれば表面磁場 B を推定する事も出来る。

2.9 X線連星

X線を発する高密度天体と、その伴星³である恒星からなる連星系をX線連星と言う。

2.9.1 放射機構

1966年、最初に発見されたX線源 Sco X-1 において、光学観測により光学対応天体が同定され (Sandage et al. 1966)、Sco X-1 は連星系である事がわかった。その翌年 1967 年に Shklovskii は次のようなモデルで Sco X-1 のX線の放射機構を説明した。Sco X-1 は中性子星と恒星の連星系である。恒星からは高温のガスが流出し、中性子星の表面に降着している。ガスは降着する時に重力エネルギーを解放し、そのエネルギーがX線の放射という形で周囲に放出されるのである。

このX線の放射機構は次のような計算により、非常に効率が良い事が示される。質量 M_X 、半径 R_X の中性子星に、ガスが単位時間あたり降着率 $\dot{M}$ で降着している場合を考える。今は磁場の影響は無視する事にする。ガスは中性子星表面に均等に降着すると仮定する。また、降着物質は中性子星の表面に達するまで自由落下の速度 v_{ff} で落下すると仮定する。降着物質は中性子星表面で急速に減速され、その運動エネルギーは熱に変化するか、放射の形で周囲に放出される。安定な状態では、光度 L_X は次の式で表す事ができる。

$$L_x = \frac{1}{2} \dot{M} v_{ff}^2 = \frac{GM\dot{M}_x}{R_x} \quad (2.10)$$

質量降着の場合に限らず、一般に

$$L_x \approx \eta \dot{M} c^2 \quad (2.11)$$

と書いて、 η をエネルギー効率と呼ぶ (静止質量のうちどれだけのエネルギーが解放されるか)。中性子星はこの η の値が極めて高く、 $\eta \sim 0.2$ となる。

次に、放射の大部分が中性子星表面からの温度 T_{BB} の黒体放射になっていると考えたと

$$L_X = 4\pi R_X^2 \sigma T_{BB}^4 \quad (2.12)$$

が成り立つ。 σ は Stefan-Boltzmann 定数である。(2.12) 式に X線源の光度の平均的な値 $L_X \sim 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$ を代入すると、中性子星表面の温度を求める事ができ、 $T_{BB} \sim 10^7 \text{ K}$ となる。この温度の放射はX線の領域である事から ($10^7 \text{ K} \sim 1 \text{ keV}$)、X線は中性子星を観測するのに非常に適した波長帯だと言える。

また (2.10) 式から、この光度を生み出すのに必要な質量降着率 $\dot{M}$ を求める事ができる。それはおよそ $\dot{M} \sim 10^{-9} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ となり、この系は 10 億年程度の寿命を持つ事がわかる。この程度の質量降着は十分に可能である。

2.9.2 質量降着機構

X線連星は主に近接連星系であり、伴星から中性子星への質量降着の機構は大きく2種類に分けられる。

³一般に連星系では質量の大きい方を主星、小さい方を伴星と呼ぶが、ここではX線天体 (中性子星) を主星、相手の星 (恒星) を伴星と呼ぶ。

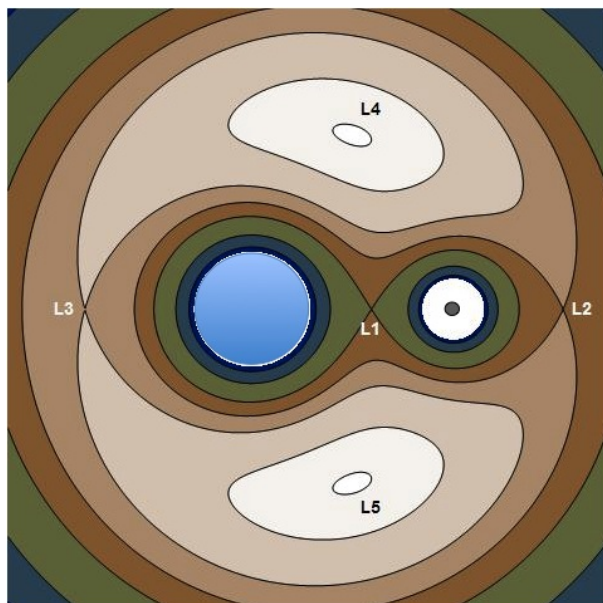


図 2.7: 連星系の重力ポテンシャル

連星系の重力ポテンシャル。等ポテンシャル面ごとに色分けしてある。左側が伴星、右側が中性子星である。L1 ~ L5 はラグランジュ点と呼ばれる局所的に安定した点である。

1. Roche-lobe Overflow

連星の等ポテンシャル面のうち、両方の星を囲む等ポテンシャル面が接する所を Roche-lobe と呼ぶ (緑の範囲を囲む L1 でつながる線が Roche-lobe 図 2.8)。図 2.8 中の L_n はラグランジュ点と呼ばれる力学的に安定な点である。伴星が進化と共に膨張し、Roche-lobe を満たすサイズになった場合、伴星の物質は L1 点から溢れ出し、中性子星に降着していく。

2. Stellar Wind (星風降着)

伴星が Roche-lobe を満たしていない場合、伴星の物質は伴星表面から Stellar wind (恒星風) により流れ出し、その一部が中性子星の重力にとらえられる。X 線で観測されるためには Stellar wind が十分強い必要がある。

これらの 2 つの機構の概念図を図 2.8、2.9 に示す。

どちらのシステムであれ、この物質は連星運動による角運動量を持ち、中性子星の周りに連星の公転面上の円盤を形成する。この円盤を降着円盤と呼ぶ。降着円盤の内部で、物質は中性子星の持つ磁場との相互作用や、粘性による相互作用で徐々に角運動量を失い、中性子星表面へと落下していく。

2.9.3 大質量 X 線連星

X 線連星は伴星の質量によって、大質量連星系と小質量連星系の 2 種類に分けられる。

大質量連星系の伴星は質量の大きい OB 型星 ($\geq 10M_{\odot}$) である。これを大質量 X 線連星 (High Mass X-ray Binary ; HMXB) と呼ぶ。OB 型星の年齢はその質量から見積もって $\leq 10^7 \text{yr}$ 程度であるから、また、銀河系内の空間分布では銀河面、すなわち星形成が盛んにおこなわれている銀

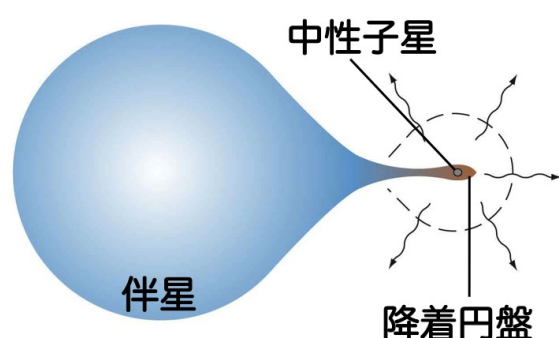


図 2.8: Roche-lobe overflow

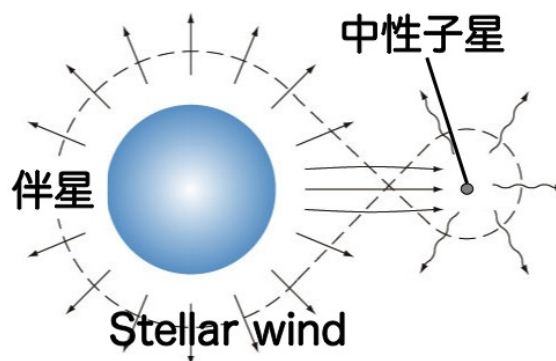


図 2.9: Stellar wind

河の腕部分に分布している事から、HMXB の伴星は比較的若い恒星であることがわかる。もちろん中性子星の方が先に寿命を迎えた天体であるので、中性子星の元の星は伴星よりも重い星であったか、あるいは末期の赤色巨星時に質量輸送により伴星に質量降着し、伴星の質量が増したかである。

多くの場合、中性子星への質量降着は OB 型星の強い Stellar wind によっておこなわれる。

HMXB の大部分が後述の X 線連星パルサーである。

2.9.4 低質量 X 線連星

伴星質量が $2M_{\odot}$ 以下の系を低質量 X 線連星 (Low Mass X-ray Binary ; LMXB) と呼ぶ。

LMXB は一般的に中性子星と質量が小さい晩期型星 ($\leq 2M_{\odot}$) の連星である。銀河系内の空間分布は銀河中心方向に多く分布し、また、球状星団内にも多く存在する。この事は連星系の年齢が古い ($\sim 10^9$ yr) 恒星である事を示している。

低質量の恒星では強い Stellar wind は無く、質量降着は主に Roche-lobe overflow でおこなわれる。従って、低質量の晩期型星は Roche-lobe を満たしている事がわかる。

一般的に、LMXB からは X 線のパルスは検出されない。この事は LMXB の中性子星の磁場が弱い ($\leq 10^9$ G) 事を意味している。この場合 (図 2.10) は、降着円盤は中性子星の表面付近まで侵入する。そして物質は中性子星表面の広い範囲に落ち込む。摩擦で高温になった降着円盤と中性子星表面の近傍から X 線を放射する。

LMXB の多くは X 線パルスの代わりに、X 線バーストと呼ばれる爆発的な現象を起こす。X 線バーストとは、10 秒ぐらいの間に多量の X 線が爆発的に放出される現象である。これは中性子星表面の広い範囲に落ち込んだ物質が熱核融合反応の暴走を起こし、不安定に燃えるためである。X 線バーストは HMXB には見られない現象である。中性子星の強い磁場がバーストの発生を抑えると言われていて、LMXB は X 線バーストが起きる事からもその磁場が弱い事が推測される。

しかし中には例外として、LMXB に属しながらも X 線パルスを発する (=磁場の強い) 天体もある。Her X-1、4U 1626-67、GX 1+4 などがその例である。

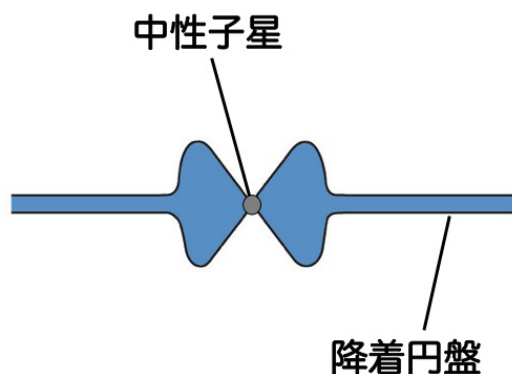


図 2.10: 磁場が弱い場合の降着

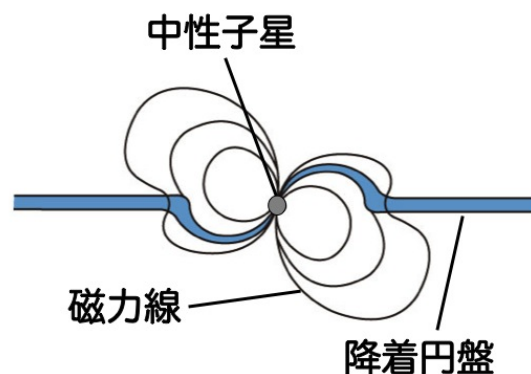


図 2.11: 磁場が強い場合の降着

2.9.5 Be 型 X 線連星

Be 星は、また X 線パルサーの伴星として最も多いタイプの星である。大質量 X 線連星の中でも Be 星と X 線パルサー (中性子星) の組み合わせは Be 型 X 線連星と呼ばれ、大質量 X 線連星の 2/3 以上を占める。軌道周期は数十～数百日で一般に軌道の離心率が大きい。

図 2.12 ⁴に Be 型 X 線連星のイメージを示す。



図 2.12: Be 型 X 線連星のイメージ。Be 星の星周円盤をパルサー (右下) が突っ切っている。

2.9.6 X 線連星パルサー

X 線パルスを示す X 線連星を X 線連星パルサーと言う。1970 年に最初の X 線天文衛星 Uhuru が打ち上げられると、連続した観測データを得られるようになり、ケンタウルス座の X 線源「ケ

⁴<http://ipl.uv.es/bexrb2011/index.php/home.html>

ンタウルス座 X-3」(Cen X-3) から 4.8 秒の周期的なパルスが発見された。

Cen X-3 は前出の HMXB である。HMXB の中性子星は多くが $\sim 10^{12}$ G という強い表面磁場を持っている。その場合 (図 2.11) は、降着円盤は磁気圧によってせき止められ、その後は降着ガスは磁力線に沿って流れ、磁極付近に集中して落ち込んでいく。中性子星の両磁極近くに落ち込んだ物質は磁極に高温プラズマガスの柱を作り、これが X 線を放射する。観測者からは中性子星の自転に伴い両極のプラズマの柱が交互に見えることになり、観測者はそれを X 線パルサーとして観測する。

第3章 MAXI

本研究の Be 型 X 線連星パルサーのアウトバーストの観測は、主に全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) により得られたデータである。この章では MAXI について記載する。

3.1 国際宇宙ステーション

国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) 計画は米国、ロシア、カナダ及び日本を含む世界 16ヶ国が参加する国際協力プロジェクトである。表 3.1 に仕様を示す。国際宇宙ステーションは全長約 110m、太陽電池パドルの長さが約 75m、全体の質量が約 450 トンの大型建築物であり、高度約 400km の軌道上を 1 周 92 分で周回する。

3.2 日本実験棟「きぼう」

「きぼう」(JEM: Japanese Experiment Module) は、日本が微弱重力を始めとした宇宙環境を利用した様々な研究を行うことを目的として、国際宇宙ステーションに取り付けられた実験棟のことである。最大 4 名の宇宙飛行士が長期間活動できる日本初の有人宇宙施設である。「きぼう」は船内実験室、船内保管室、船外実験プラットフォーム、船外パレット、ロボットアームの 5 つの要素から構成される。図 3.1 に「きぼう」の外観を示す。

船内実験室は与圧部とも呼ばれる内径 4.2m の円筒構造であり、宇宙飛行士が特殊な宇宙服等を着用せずに、微弱重力環境を利用した実験を行うことができる施設である。船内保管室は船内実験棟上部に設置されており、実験試料や実験装置を保管することができる設備である。大きさは約 6m × 5m × 4m で、重量が約 4000kg である。船外実験プラットフォームには、地球観測、地球外観測、通信実験や材料実験等を行うための曝露機器を最大 10 個設置することが可能である。船外パレットは船外プラットフォームの先端に設置されている。最大 3 個の装置が搭載でき、曝露環境

表 3.1: ISS の仕様 (MAXI チーム, 2005)

項目	仕様
寸法	約 110m × 約 73m
質量	約 450 トン
ロシアを除く総発電電力	75kW
全与圧部体積	1303m ³
軌道	円軌道で地球を 1 周 92 分
通信能力	追跡・データ中継衛星 (TDRS) システム (米国/NASA) その他ロシア、日本のデータ中継衛星システム

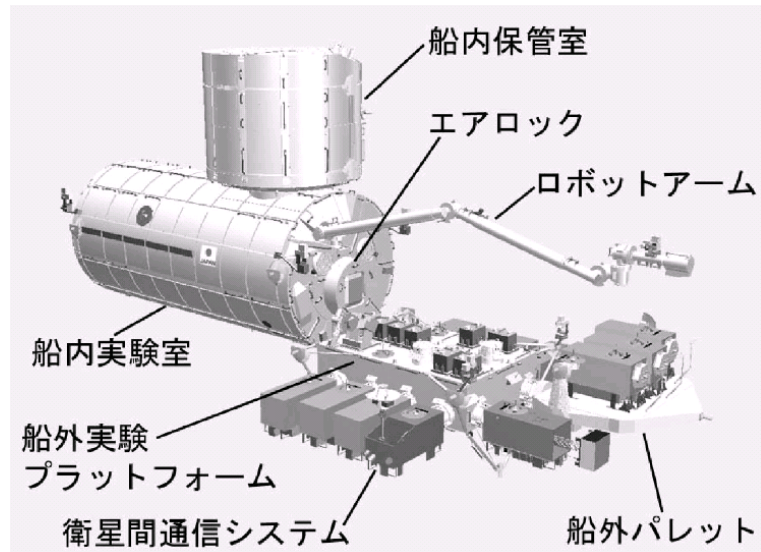


図 3.1: 「きぼう」の外観 (MAXI チーム, 2005)

で運用される装置等の輸送や軌道上での保管に利用される。ロボットアームは船内実験棟に取り付けられており、長さは約 10m である。宇宙飛行士は船内実験棟内からロボットアームを使うことにより、船外パレットから船外プラットフォームに装置等を移動させることなどが可能である。このロボットアームを使うことにより、MAXI の等の機器を船外実験プラットフォームに取り付けたり、取り外しすることができる。

3.3 全天 X 線監視装置

全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は 2009 年 7 月 16 日にスペースシャトル「エンデバー」によって打ち上げられ、ロボットアームによって船外実験プラットフォームに取り付けられた。MAXI は、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに取り付けられた ISS 初の天体観測ミッションである。宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、理化学研究所、大阪大学、東京工業大学、青山学院大学、日本大学が中心となり、開発がすすめられてきた。MAXI はこれまでの ASM (All-sky Monitor: 全天監視装置) では最高の 1mCrab (かに星雲の X 線強度の 1/1000。2-10 keV において $\sim 2 \times 10^{-11} \text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-2}$) というかつてない高感度で全天にわたる X 線源の強度マップを描くことができる。また、92 分で地球を一周する ISS と共に移動し常に観測をし続けるため、予測のつかない突発的な現象や、長期的性質を探る研究に最適である。

3.4 GSC (Gas Slit Cameras)

MAXI には 2 種類の X 線検出器、Gas Slit Camera (GSC) と、X 線 CCD カメラ (SSC) が搭載されている。

ここでは本研究において、主な観測装置となる Gas Slit Camera (GSC) について説明する。GSC はスリットとコリメータに大面積比例計数管を組み合わせた X 線検出器である [2][10]。GSC に用

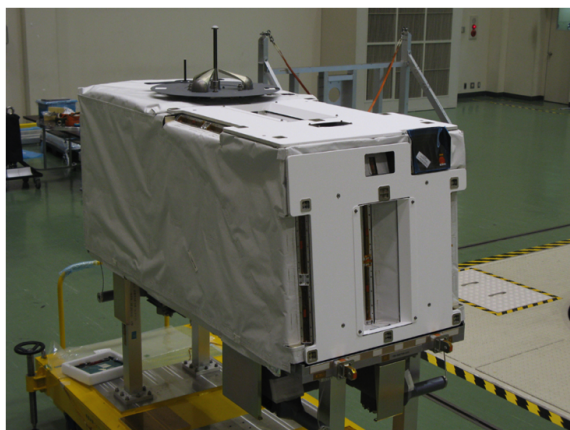


図 3.2: 全天 X 線監視装置 MAXI 本体



図 3.3: 国際宇宙ステーションと MAXI

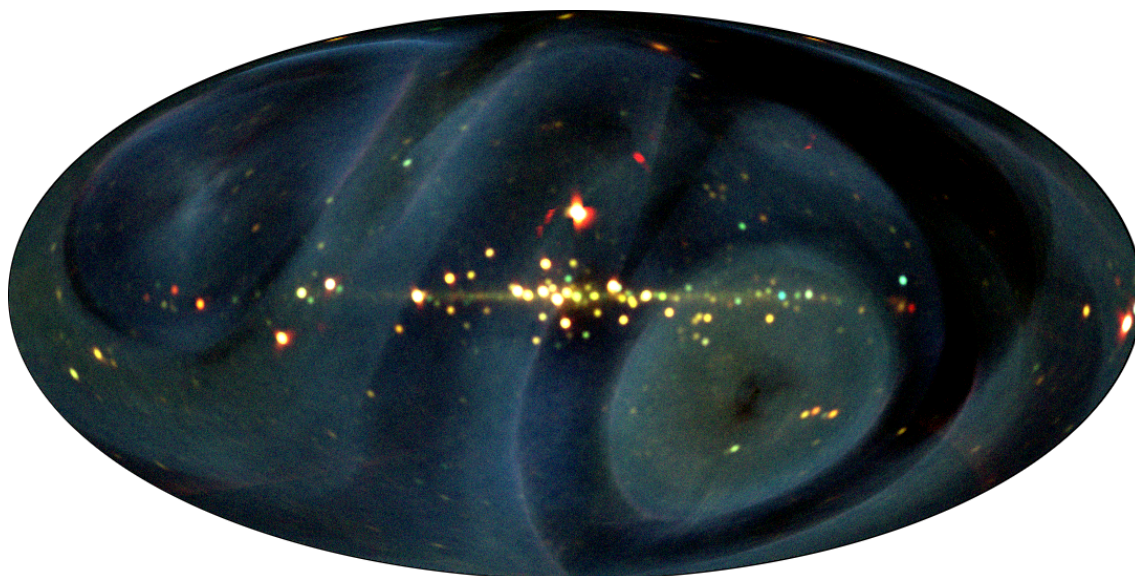


図 3.4: MAXIが得た積分 X 線全天イメージ。図の中心が銀河中心方向である。中心の少し上にさそり座 X-1 がある。

いられる比例計数管 (図 3.4) はカーボン芯線を用いた 1 次元位置検出型比例計数管である。

GSC のボディはチタン製で、1 台の重さは約 5390 g である。MAXI にはこの GSC 比例計数管が 12 台搭載される。X 線が入射するカウンタ上部の窓には、大きさ 272×190.5 mm、厚さ $100 \mu\text{m}$ の Be 膜が使用されており、その上の枠で Be 膜を支持している。入射窓の Be 膜を支える枠を除いた有効面積は 445 cm^2 である。これを 12 台用いて合計 5350 cm^2 の大面積を構成する。X 線入射窓に Be を用いたのは、原子番号 4 と軽い元素なので、光電吸収断面積が小さく、X 線に対して透過率が高いからである。管内のガスには Xe 99%、 CO_2 1% (0°C で 1.4 atm) の混合気体を用いている。図 3.5 の横から見た断面図の黄色の領域では、位置検出用の 6 本のカーボン繊維芯線が用いられており、そのまわり緑色の領域を 10 本の Veto ワイヤで取り囲んでいる。カーボン芯線の下にある 6 本が Bottom Veto (BV)、両側にある 4 本が Side Veto (SV) と呼ばれている。カーボン芯線は直径 $10 \mu\text{m}$ 、長さ 333 mm、Veto ワイヤは金メッキタングステン線で直径 $18 \mu\text{m}$ である。各芯線の周りは直径 $50 \mu\text{m}$ のグランドワイヤ約 100 本で区切られていて、図 3.5 のよう

検出エネルギーレンジ	2 - 30 keV
検出有効面積	5350cm ² (12 台)
エネルギー分解能	18% @ 5.9keV
視野の大きさ	1.5° × 160° (3 台)
検出器位置分解能	1mm@8keV
時間分解能	50μsec
一日の全天カバー率	96%

表 3.2: GSC の基本性能



図 3.5: GSC 比例計数管

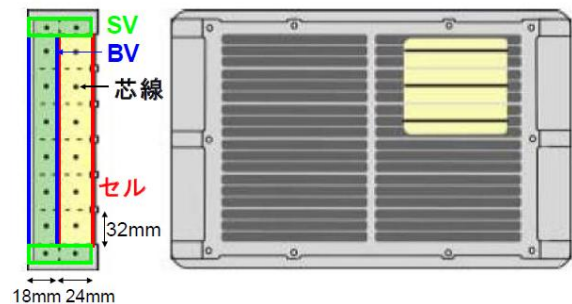


図 3.6: GSC 比例計数管の概念図。正面から見た GSC 比例計数管 (右) と 横から見た断面図 (左)。

に 8×2 の計 16 のセルを構成している。

宇宙空間でのバックグラウンドである荷電粒子が管内を走った際、荷電粒子は走った軌跡上でガスを電離させる。X 線は 1 つのセルでしか検出されないが、荷電粒子はカーボン芯線 - カーボン芯線 間、また、カーボン-Veto 間の 2 つ以上のセルで同時に信号を検出する。2 つの信号は反同時計数を取ることで X 線の信号と区別され、荷電粒子によるバックグラウンドイベントを除去する事が可能である。観測可能なエネルギー領域は 2 ～ 30 keV で軟 X 線領域から硬 X 線領域まで幅広い。

3.5 SSC(Solid-state Slit Cameras)

SSC(Solid-state Slit Camera) は X 線 CCD 素子 32 枚の前面に、コリメータとスリットを配置した検出器。0.5-12 keV の X 線帯域での撮像、分光を行うことができる。大阪大学と JAXA、浜松ホトニクス社、明星電気、NTspace、Swales 社等で開発した X 線 CCD 検出器である。X 線 CCD 検出器は、比例計数管に比べ、位置分解能とエネルギー分解能に優れているが、検出効率が低く、有効面積が小さいと言う問題点がある。CCD の検出効率を高くするには CCD の空乏層を厚くする必要があり、有効面積を大きくするには X 線集光系を使うか、もしくは多数の素子を並べる必要がある。SSC は空乏層を厚くすることで CCD の検出効率を改善し、多数の素子を並べることで有効面積を増加させている。図 3.10 に SSC の写真を示す。SSC は一つのカメラに CCD 素子を 16 枚、敷き詰めるように並べられている。

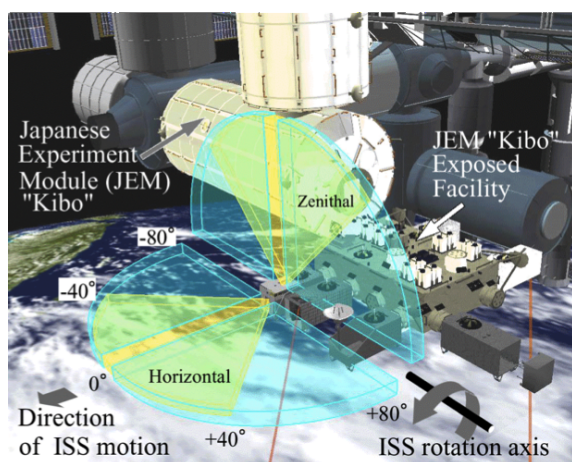


図 3.7: MAXI/GSC の視野

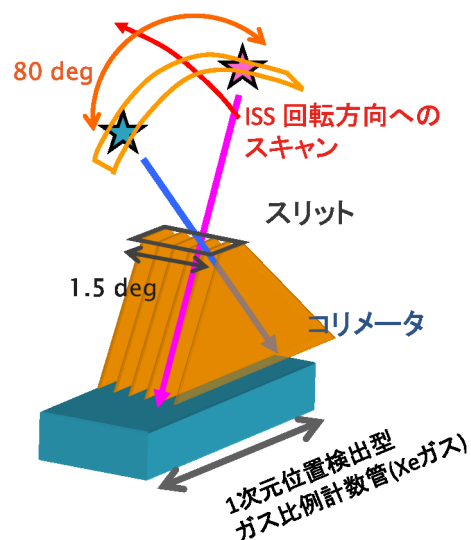


図 3.8: スリットとコリメータによる視野の制限

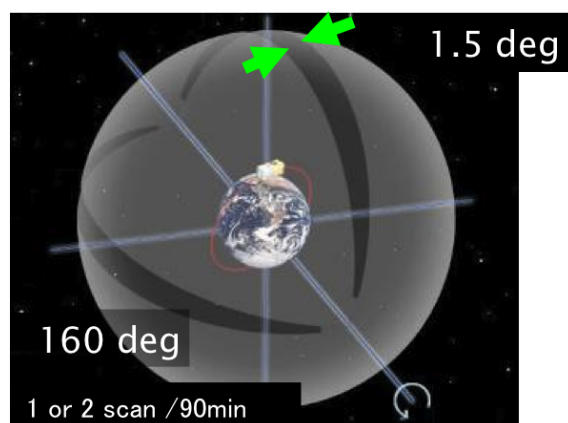


図 3.9: MAXI の全天スキャン原理
2 方向の細長い視野が”なわとび”のなわのごとく移動していく。

検出エネルギーレンジ	0.5 - 12 keV
検出有効面積	200cm ² (32 枚)
エネルギー分解能	≤1.5eV @ 5.9keV
視野の大きさ	1.5° × 90° (3 台)
検出器位置分解能	0.025mm
時間分解能	5.8sec

表 3.3: SSC の基本性能

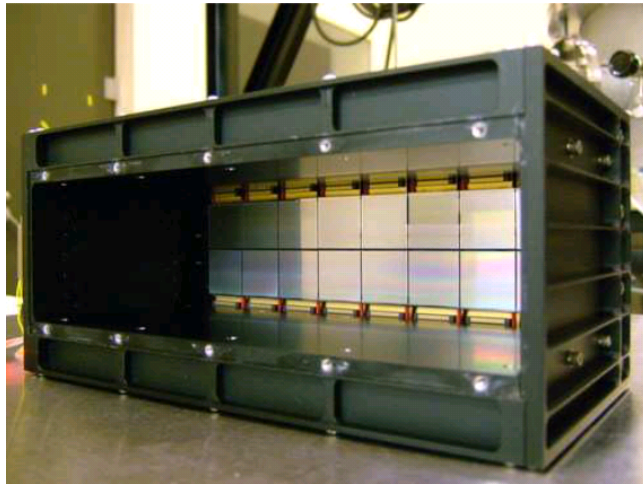


図 3.10: SSC の CCD 素子。16 枚敷き詰められている。

3.6 観測原理

GSC 1 台の視野は板状コリメータにより $1.5^\circ \times 80^\circ$ の細長い長方形に区切ってあり、これを 3 台横に並べて $1.5^\circ \times 160^\circ$ の視野を作る。最低限 2 台のカメラで 160° 視野は構成できるが、中心部は X 線源が視野内に入っている時間が短いのでそれを補う意味で 3 台目のカメラを中心部に置き、全天で一様な感度を確保する。宇宙ステーションが地球を一周すると細長い視野が縄跳びの要領で全天をスキャンするので、視野に出入りした時刻から X 線源の位置を求める。もう一方の位置は、図 3.7 に示すように、入り口にはスリットを設け、視野内の位置は X 線検出器の一次元位置検出機能により検出する。

MAXI は進行方向 (H 方向) と、進行方向に垂直上向き方向 (Z 方向) の 2 方向の視野を持っており、宇宙ステーションの軌道周期 92 分に伴い、どの X 線源も最低 1 回はスキャンされる。1 日の全天カバー率はスキャン軸両端半径 10 度と太陽周辺を除いた 96% である。宇宙ステーションの軌道面が動き、また、太陽も移動していくので観測不可能場所はだんだんと移動していき、約 2 ヶ月で全天を 100% カバーする。

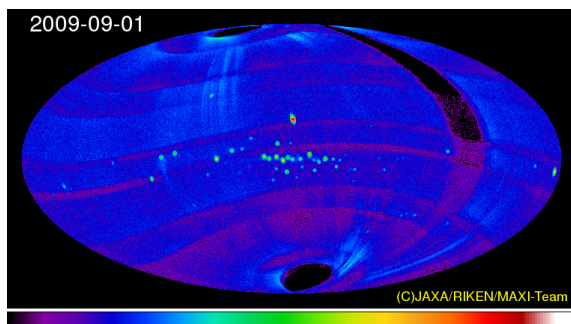


図 3.11: 2009 年 9 月 1 日の全天マップ

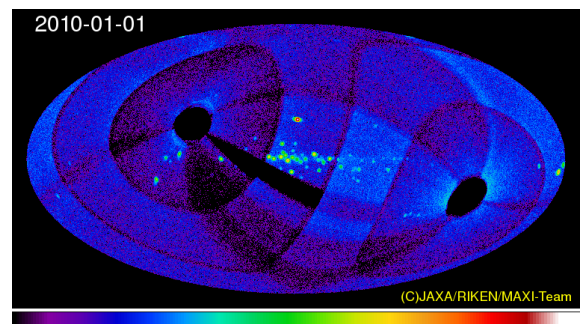


図 3.12: 2010 年 1 月 11 日の全天マップ

3.7 運用体系

3.7.1 データ通信

MAXI は国際宇宙ステーションの軌道に伴い、92 分で地球を一周する。赤道面に対する軌道面の傾きは 51.6° であり、一日に地球を 16 周する事になる。観測した X 線のデータは、ほぼリアルタイムで機上から地上まで降りて来る。GSC で観測した X 線の生データは MAXI 内部の Data Processor (DP) でエネルギー、到来時間などの情報をつけた加工データに変換される。加工データは MAXI から国際宇宙ステーション本体を通り、データリレー衛星を介してダウンリンクされる。ダウンリンクには NASA 側の TDRSS 衛星を通り NASA に降りるルートと、日本の通信技術衛星 DRTS「こだま」を通り筑波の JAXA に降りる 2 ルートがある。NASA ルートが主に使われている。

リアルタイムでデータが地上に降りてくるのは、国際宇宙ステーションが地球を 1 周する 92 分のうちの 70% ほどである。国際宇宙ステーションと地上との通信が途切れ、地上に降ろせなくなる領域が 1 周のうちに 30% ほど存在している。通信可能状態を Acquisition Of Signal (AOS)、通信不可状態を Loss Of Signal (LOS) と呼ぶ。LOS 中のデータは国際宇宙ステーション上のデータレコーダーに保存され、AOS になった時にリアルタイムのデータと一緒に地上に降りて来る。

地上に降りたデータは理化学研究所 MAXI チームにあるデータサーバーに登録され、最終的には理研の公開用サーバーから全世界に公開される。URL: <http://maxi.riken.jp/>

3.7.2 放射線異常領域での運用

MAXI/GSC の比例計数管には 1650 V の高圧を印加しているため、南大西洋放射線異常領域 South Atlantic Anomaly (SAA) や、北アメリカ大陸やオーストラリア大陸南の海上にあるオーロラ帯のような荷電粒子が非常に多い領域では放電破壊などの不慮の事故を起こす可能性がある。

軌道上の荷電粒子 (主に電子と陽子) をモニターするために Radiation Belt Monitor (RBM) が取り付けられている。半導体検出器 (PIN フォトダイオード) で出来ている RBM は、軌道上の荷電粒子 (主に電子と陽子) をリアルタイムでモニターし、荷電粒子の量があるレベル以上になると”RBM フラグ”を立てるようになっている。GSC ではこのフラグを検知すると自動的に高圧電源を下げ、観測を一時中断して検出器を放射線から保護する。

RBM は MAXI/GSC の進行方向 (H 方向) と垂直上向き方向 (Z 方向) に各 1 台ずつ搭載されていて、それぞれの方向に対する荷電粒子の量が計測出来る。図 3.11, 3.12 は H、Z それぞれの方向の荷電粒子マップである。Z 方向のレベルは H 方向のレベルより 1 桁小さい事がまず驚きであり、かつ H 方向の分布も「あすか衛星」の SAA から予想されていた SAA と位置が異なる事が判明した。MAXI では新たに MAXI 用の SAA マップを作成した (図 3.13)。

3.8 MAXIの視野と特徴

MAXI は ISS 進行方向を含む水平面内に視野を持つ検出器と、天頂 (反地心) 方向を含む視野を持つ検出器の 2 セットのスリットカメラが搭載されている。この 2 つの視野は時間とともに移動し、ISS が地球を 1 周する 92 分でほぼ全天を走査する。GSC は 1 台の視野が $1.5^\circ \times 80^\circ$ で、天頂方向、ISS 進行方向のそれぞれに 3 台ずつ配置され、 $160^\circ \times 1.5^\circ$ の視野を実現している。SSC は 1 台の視野が $90^\circ \times 1.5^\circ$ あり、天頂方向、ISS 進行方向それぞれ一台ずつ配置されている。なお GSC の水平方向カメラは真の水平方向より $\sim 6^\circ$ 上に、SSC の水平方向のカメラは実際には真の水平

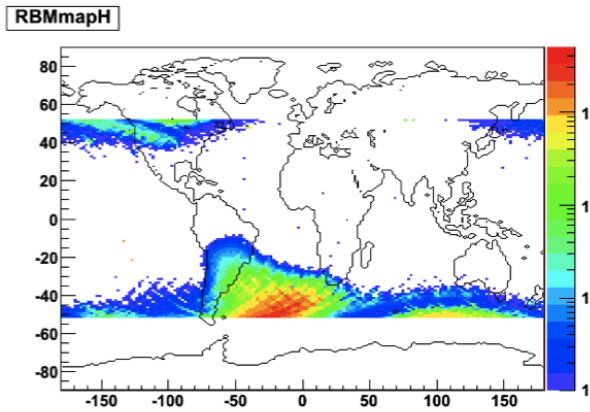


図 3.13: GSC-H 方向の RBM マップ

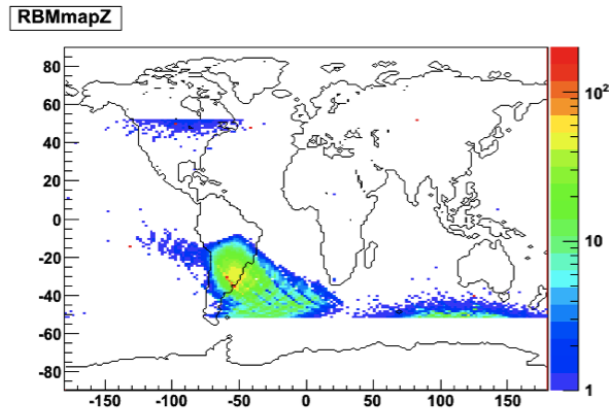


図 3.14: GSC-Z 方向の RBM マップ

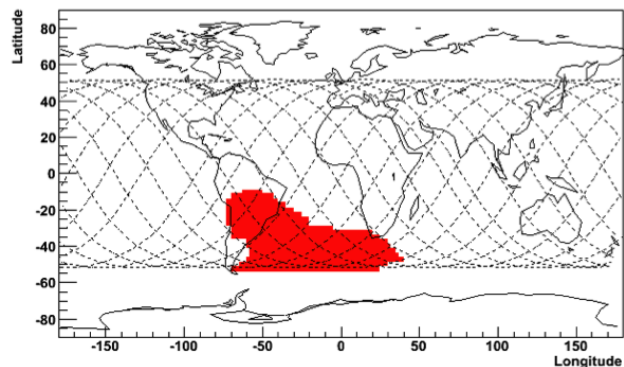


図 3.15: MAXI の決めた SAA

面より 20° 傾いている。検出器として、各 SSC カメラは 16 個ずつ X 線 CCD を搭載し、高いエネルギー分解能と 0.5 keV に及ぶ軟 X 線領域での感度を特徴とする。

南太平洋の放射線異常領域 (SAA: South Atlantic Anomaly) を通過するとき X 線検出器は機能しなくなるため、特定の天空域が観測されにくくなるが、天頂と水平の 2 方向のカメラを持つことにより SAA 通過時間帯に観測できなかった天空を互いに補完観測をすることができる。こうして、1 周で 160° のスリットでほぼ全天を走査することができる。一軌道周回では ISS 座標のスキャン北極と南極の 10° である全天の 1.5% をのぞく範囲をカバーすることができる。また、ISS 軌道面 (軌道傾斜角 51.6°) は周期 70 日で歳差運動を行うため、観測されなかった部分も 1 週間程度でカバーされる。実際の運用では太陽が視野に入る検出器は観測を停止させるように調整してあるため、太陽周辺を除く全天の 70 ~ 80% が 1 周で走査されることになる。

MAXI/GSC の一周回のデータは自動的にノバサーチ (Negoro et al. 2011) によって解析され、新 X 線源発見や既知の X 線源の増光をアラートシステム (Negoro et al. 2011) が感知した場合、その位置と強度情報と共に全世界に速報される。また、観測がされたデータは Web ¹ 上で公開されている。

¹<http://maxi.riken.jp>

第4章 データ解析

4.1 各天体の光度曲線

MAXIで監視している天体の中から Be 型 X 線連星パルサーであるものをリストアップした。これら MAXI で観測された天体の光度曲線はホームページ¹から公開されている。光度曲線とは横軸に時間、縦軸に Flux をとった図のことである。以下に MAXI で監視している 25 天体の Be 型 X 線連星パルサーの光度曲線を示す。これら Be 型 X 線連星パルサーには活動の仕方によって突発的な増光を示す transient 天体と定常的に明るい天体である persistent 天体の 2 種類に分類される。transient の Be 型 X 線連星パルサーの増光は軌道運動によって引き起こされている。本研究では主に transient 天体のアウトバーストについて取り扱う。MAXI で観測している Be 型 X 線連星パルサーのパラメータを表 4.1 [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44] に示す。

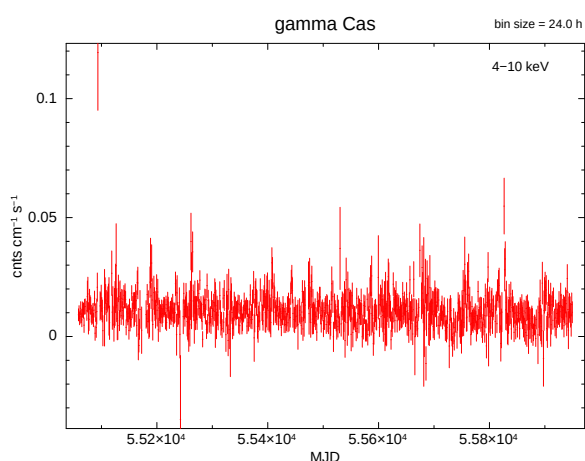


図 4.1: gamma Cas

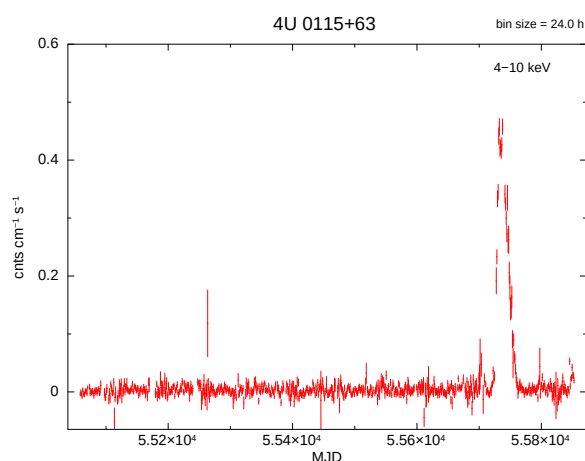


図 4.2: 4U 0115+63

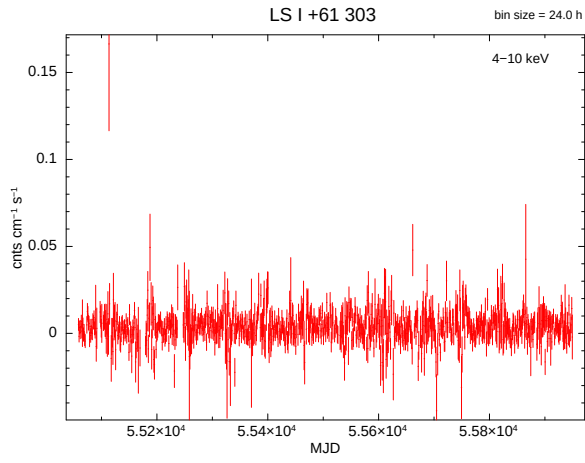


図 4.3: LS I +61 303

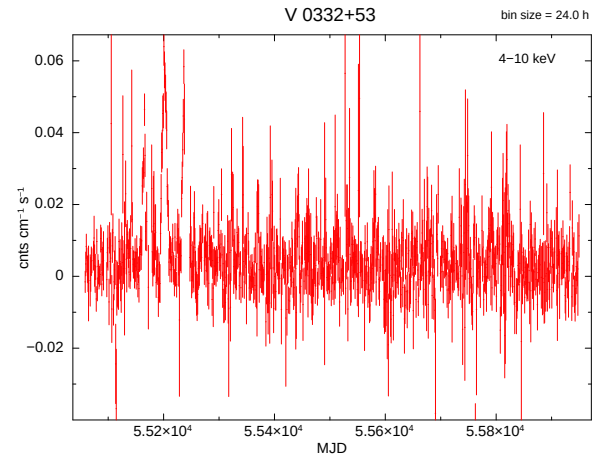


図 4.4: V 0332+53

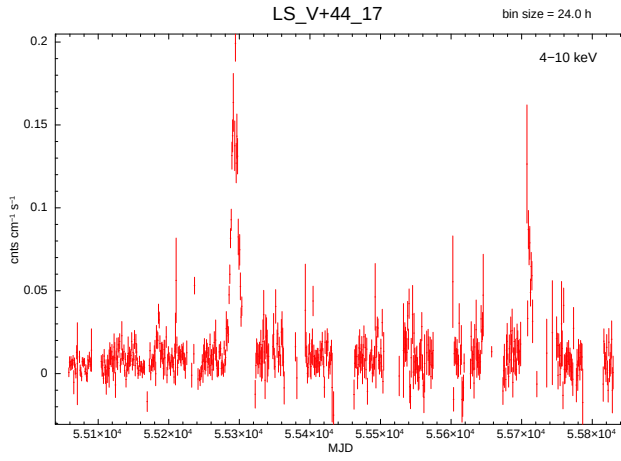


図 4.5: LS V +44 17

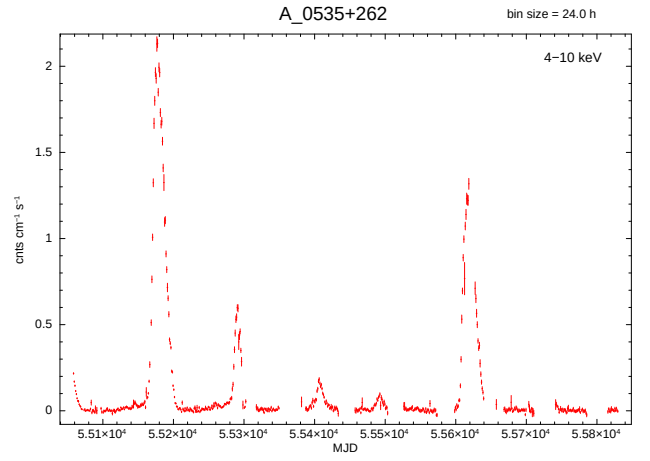


図 4.6: A 0535+262

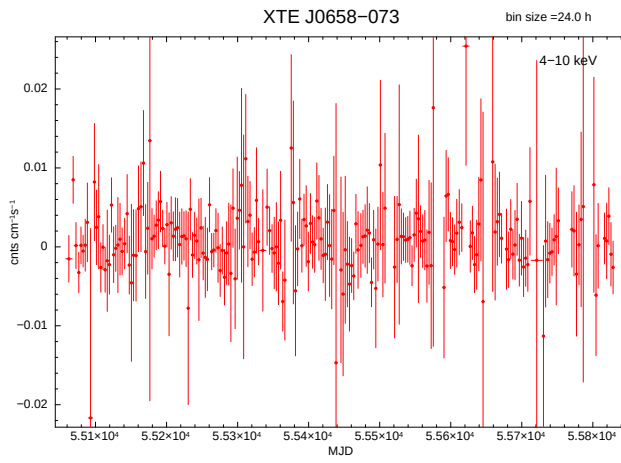


図 4.7: XTE J0658-073

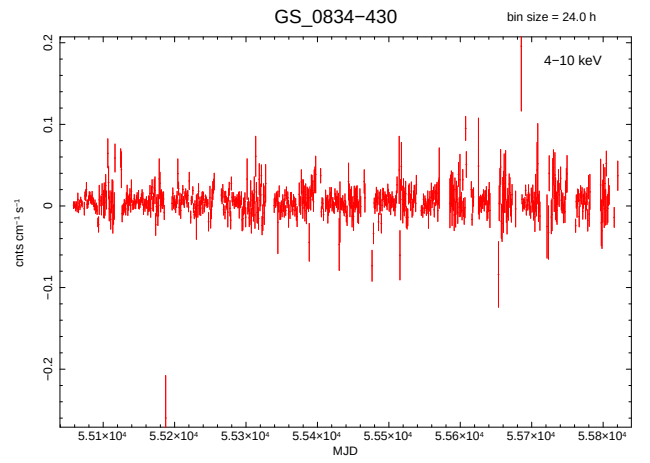


図 4.8: GS 0834-430

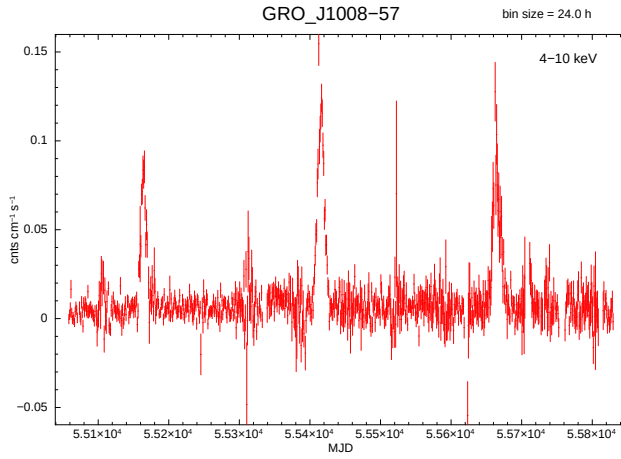


図 4.9: GRO J1008-57

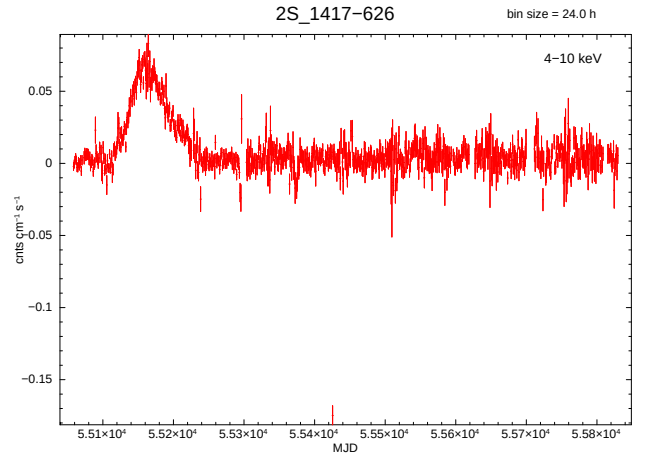


図 4.10: 2S 1417-624

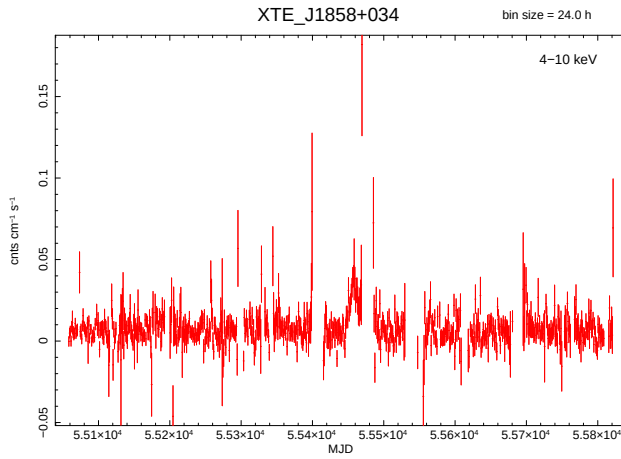


図 4.11: XTE J1858+034

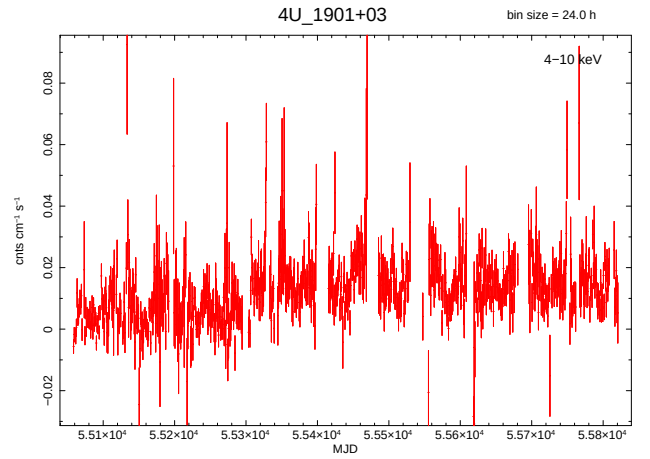


図 4.12: 4U 1901+03

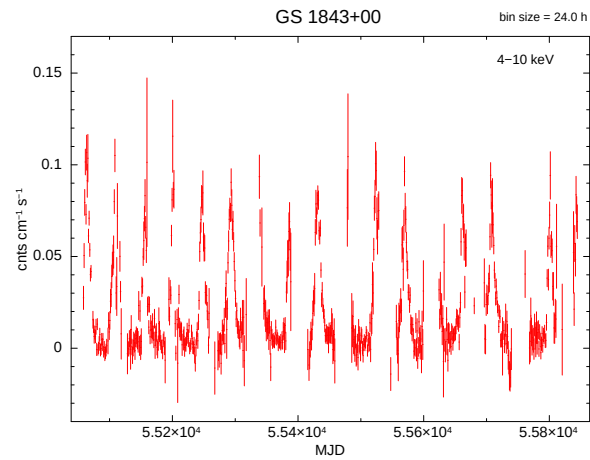


図 4.13: EXO 2030+375

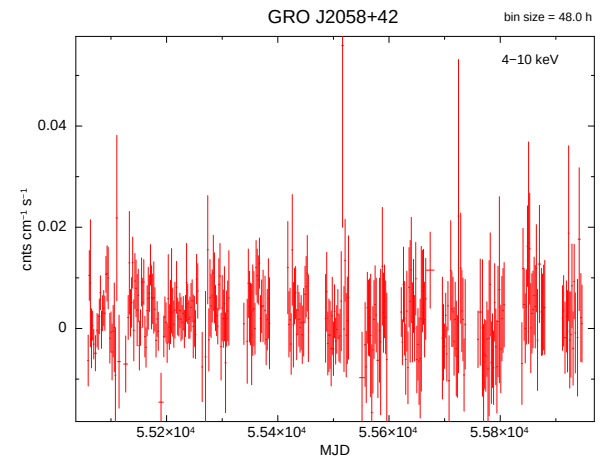


図 4.14: GRO J2058+42

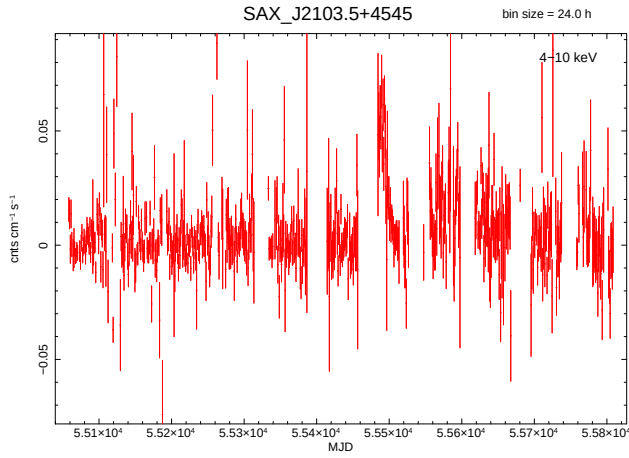


図 4.15: SAX J2103.5+4545

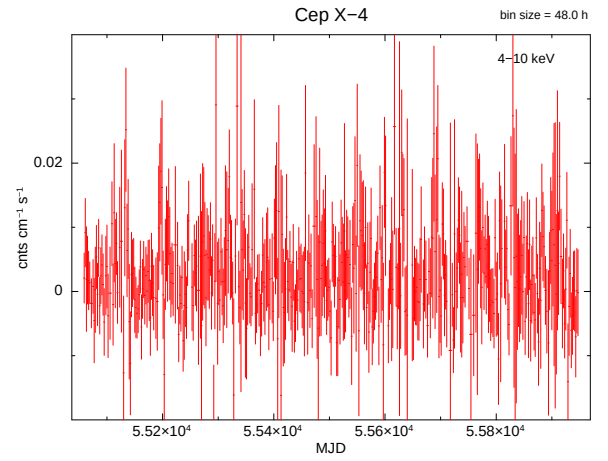


図 4.16: Cep X-4

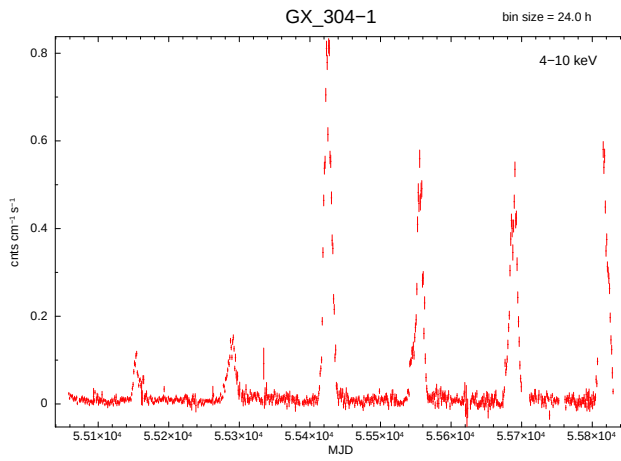


図 4.17: GX 304-1

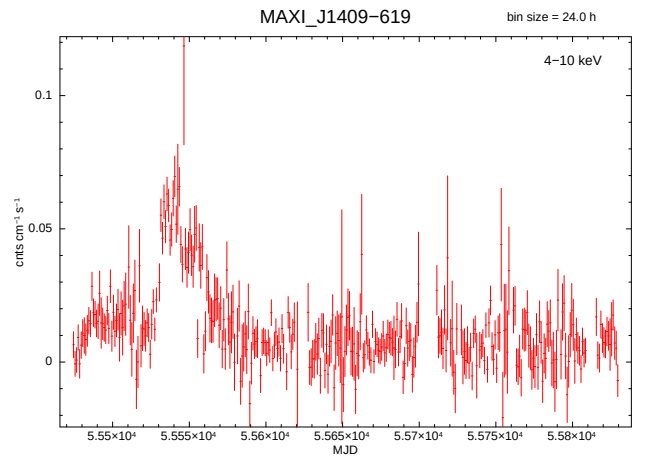


図 4.18: MAXI J1409-619

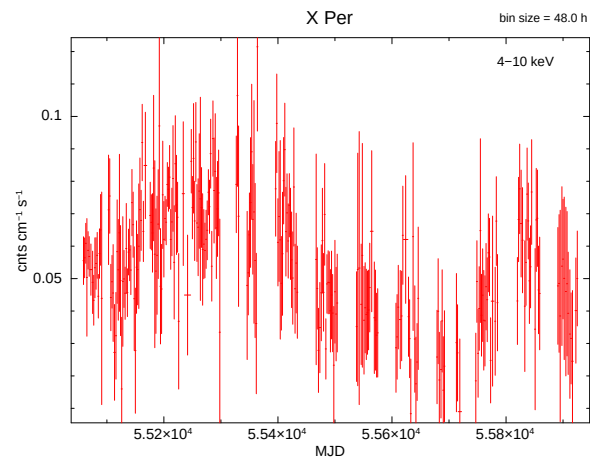


図 4.19: X Per

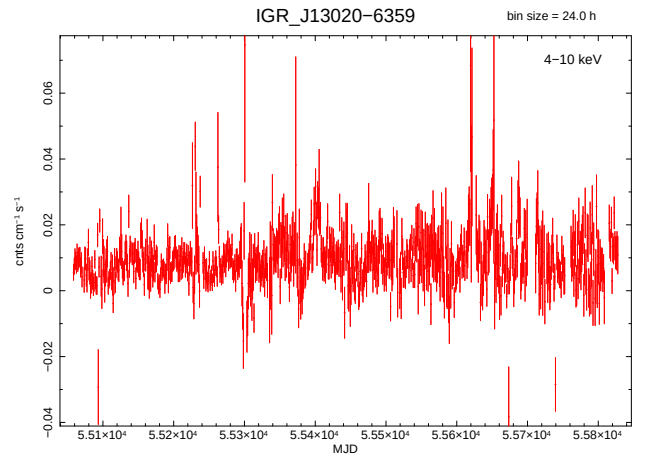


図 4.20: IGR J13020-6359

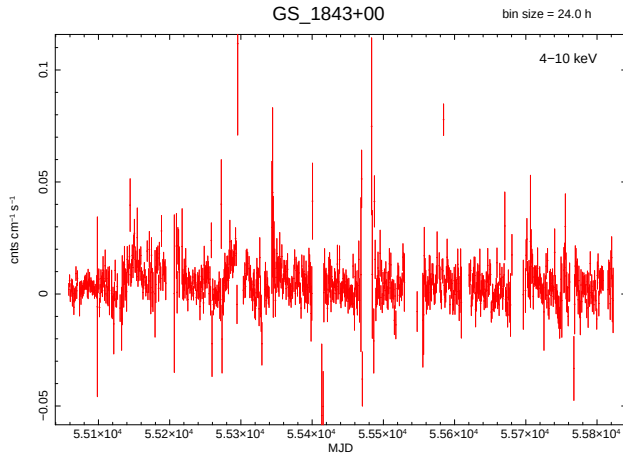


図 4.21: GS 1843+00

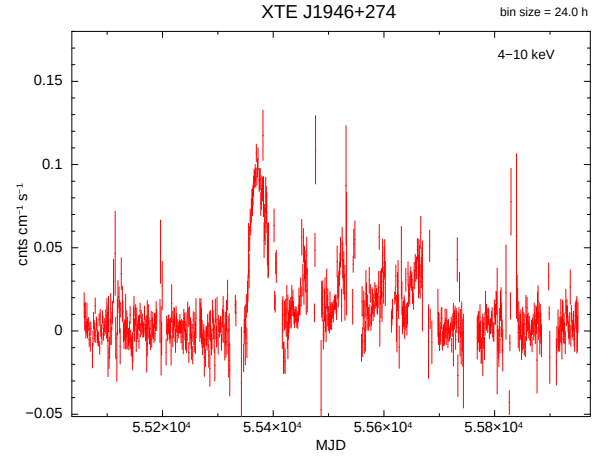


図 4.22: XTE J1946+274

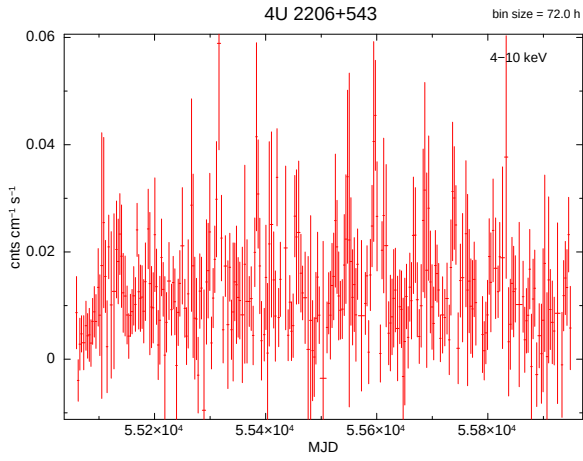


図 4.23: 4U 2206+543

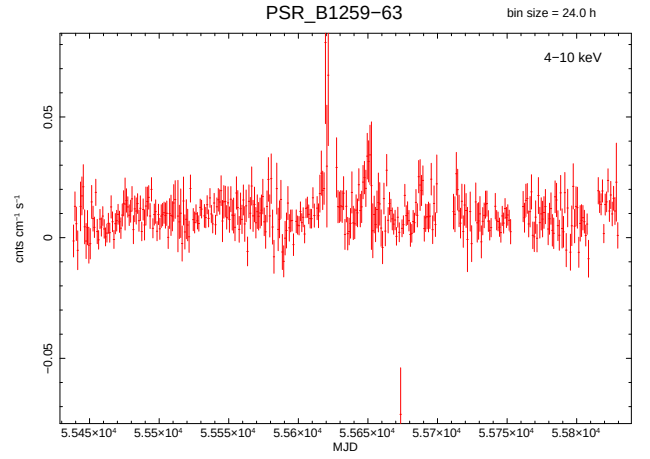


図 4.24: PSR B1259-63

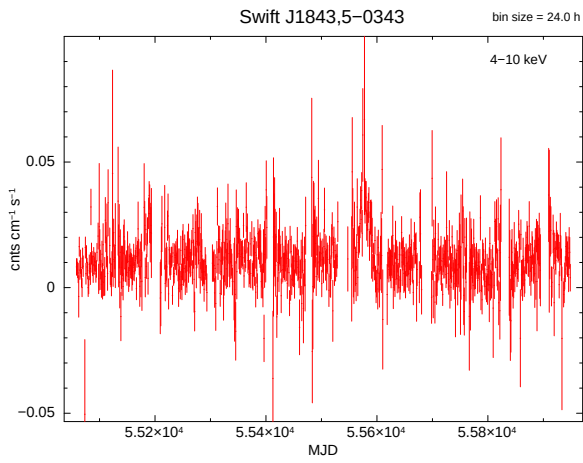


図 4.25: Swift J1843-0343

Source name	outburst type	Spectral Classification	pulse period	orbital period	eccentricity	luminosity	magnetic field
V 0332+53	transient	O8.5Ve	4.37	34.25	0.37	1.0×10^{38}	2.7×10^{12}
GRO J2058+42	transient	O9.5-B0IV-Ve	198.0	55	-	2.0×10^{36}	-
A 0535+262	transient	O9.7He	103.4	111,115	0.47	2.0×10^{37}	4.0×10^{12}
XTE J0658-073	transient	O9.7Ve	160.4	-	-	$6.6 \times 10^{3.6}$	$3.6 - 3.7 \times 10^{12}$
4U 1901+03	transient	Be	2.763	22.58	0.036	1.1×10^{38}	0.31×10^{12}
MAXI J1409-619	transient	Be	506.93	-	-	-	1.8×10^{12}
IGR J13020-6359	transient	Be	704	-	-	-	-
GRO J1008-57	transient	B0e	93.5	248.9	0.66	2.9×10^{35}	7.6×10^{12}
LS I +61 303	transient	B0Ve	-	>200	0.54	2.0×10^{35}	5.0×10^{35}
SAX J2103.5+4545	transient	B0Ve	358.6	12.7	0.4	6.3×10^{36}	$1.6 - 3 \times 10^{13}$
gamma Cas	transient	B0IVpe	-	-	-	-	3.0×10^{12}
GS 0834-430	transient	B0-2III-Ve	12.32	105.8	0.12	1.1×10^{37}	-
GS 1843+00	transient	B0-2IV-Ve	29.5	-	-	3.0×10^{37}	4.0×10^{12}
4U 0115+634	transient	B0.2Ve	3.6	24.31	0.34	3.0×10^{37}	-
LS V +44 17	transient	B0.2Ve	-	>150	-	3.0×10^{34}	-
2S 1417-624	transient	B1Ve	17.6	42.12	0.446	8.0×10^{36}	-
Cep X-4	transient	B1.5Ve	66.25	>23	-	4.0×10^{36}	3.4×10^{12}
GX 304-1	transient	B2Vne	275	132.5	>0.5	-	$2.1 - 4.2 \times 10^{12}$
XTE J1946+274	transient	B0-1IV-Ve	15.7679	169.2	0.33	5.4×10^{36}	3.1×10^{12}
PSR B1259-63	transient	B2e	0.048	1237	0.87	-	3.3×10^{11}
XTE J1858+034	transient	Be	221.0	-	-	-	0.8×10^{12}
Swift J1843.5-0343	transient	Be or SFXT	42.55	-	-	-	-
X Per	persistent	O9.5IIIe-B0Ve	837.7	580	0.11	4.0×10^{33}	2.5×10^{12}
4U 2206+543	persistent	O9.5IIIe	5560	-	-	-	3.3×10^{12}
EXO 2030+375	persistent	B0Ve	41.68	46.02	0.41	6.3×10^{35}	-

表 4.1: MAXI で観測している Be 型 X 線連星パルサー。Spectral 型でソートしてある。Spectral 型が詳しくわかっていないものは Be とした。

4.2 アウトバーストのリストアップ

そこからまず Be 型 X 線連星パルサーのアウトバーストのリストアップを行った。2011 年 11 月までに MAXI は 25 個の Be 型 X 線連星パルサーをモニターしている。MAXI が観測を始めた 2009 年 8 月からそのうち 13 天体から 35 回のアウトバーストを観測していたことがわかった。横軸に修正ユリウス日 (MJD; Modified Julian Day)、縦軸に星雲の明るさを基準とする X 線強度をとってある。この明るさが 5mCrab を超えた場合アウトバーストとみなして取り出した。リストアップしたアウトバーストの光度曲線を図 4.26 に示す。MAXI の観測したアウトバーストのピーク光度が明るい方から順に並べてある。

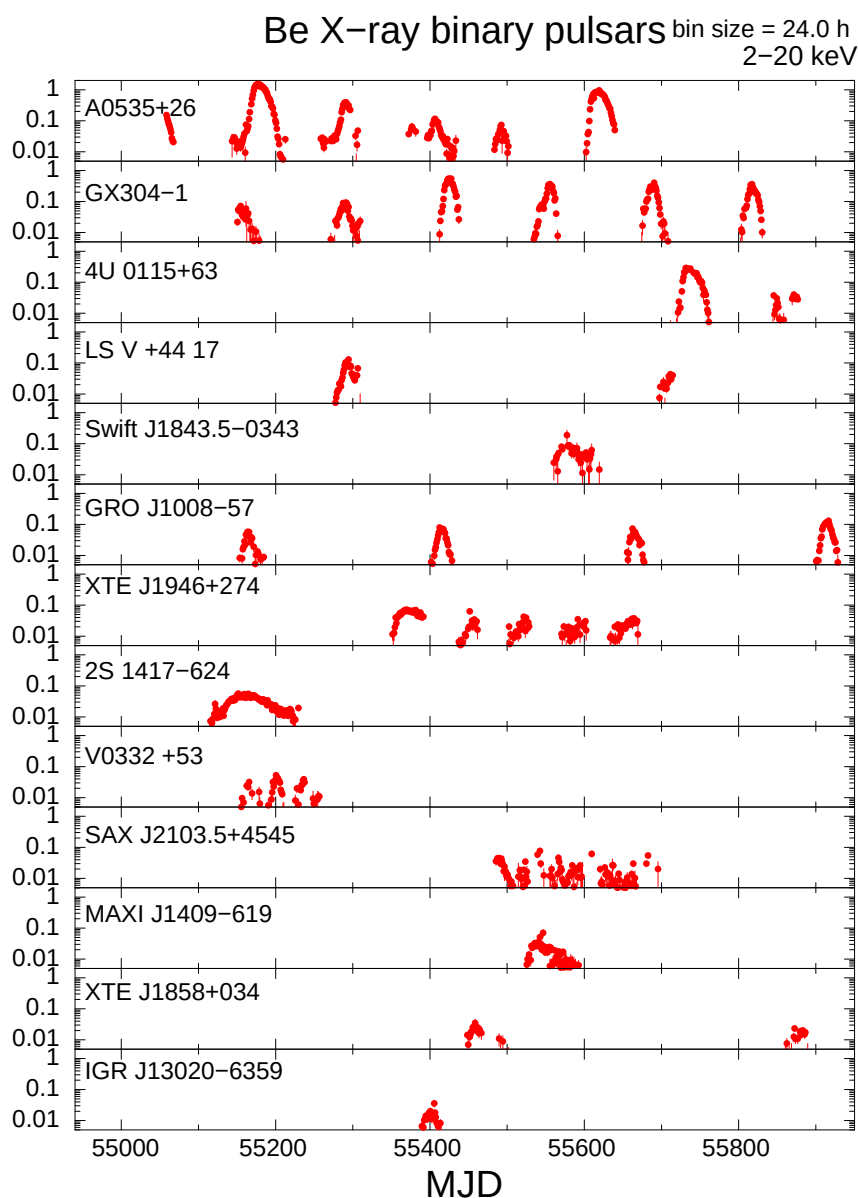


図 4.26: MAXI でアウトバーストを観測した 13 個の Be 型 X 線連星パルサーの光度曲線

¹<http://maxi.riken.jp>

4.3 各天体の畳み込み光度曲線

図 4.26 にリストアップした Be 型 X 線連星パルサーのうち、8 天体で複数回のアウトバーストが観測された。それらの天体について軌道周期で光度曲線を畳み込み、周期的な変動がどのように行われているのかを調べる。MAXI で観測している 26 天体の Be 型 X 線連星パルサーの光度曲線を軌道周期で畳み込んだ。軌道周期で畳み込むことによってアウトバーストの間隔が軌道周期と合っているかを調べた。A 0535+262 の光度曲線を畳み込むとピーク的位置にばらつきが見られる。MAXI で観測された A 0535+262 のアウトバーストにはノーマルアウトバーストとジャイアントアウトバーストがあり、Giant アウトバーストは近星点を通過した後でピークを迎えることがわかっている。GRO J1008-57 の光度曲線を畳み込むと 1 周期につき 1 日程度のずれがあることがわかる。次の項で MAXI 以前に得られた光度曲線を併せて使い、ずれがなくなるように軌道周期を求める。GX 304+1 のアウトバーストでは畳み込んだときピーク的位置が吸収されている。このことはこの後の章で議論する。

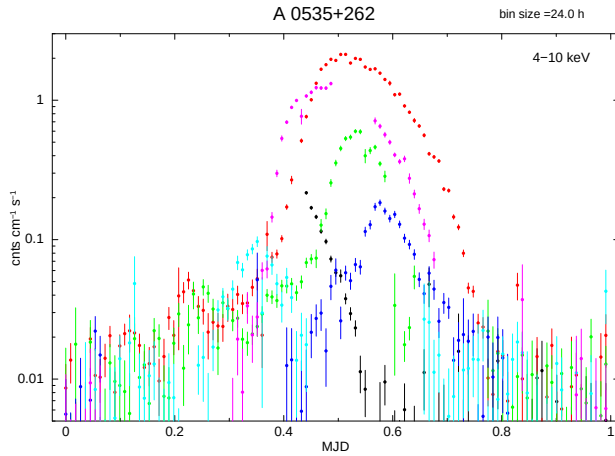


図 4.27: A 0535+262 の重ねた畳み込み光度曲線

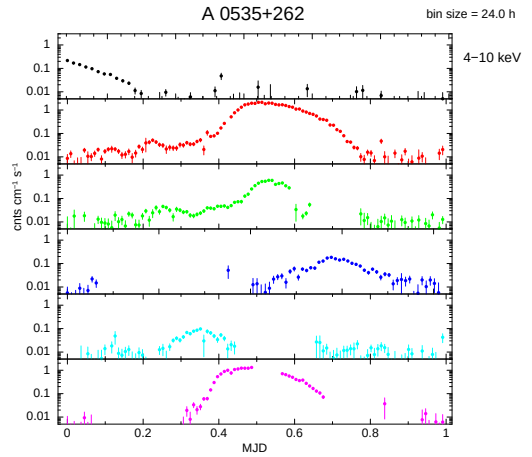


図 4.28: A 0535+262 の時間順に並べた畳み込み光度曲線

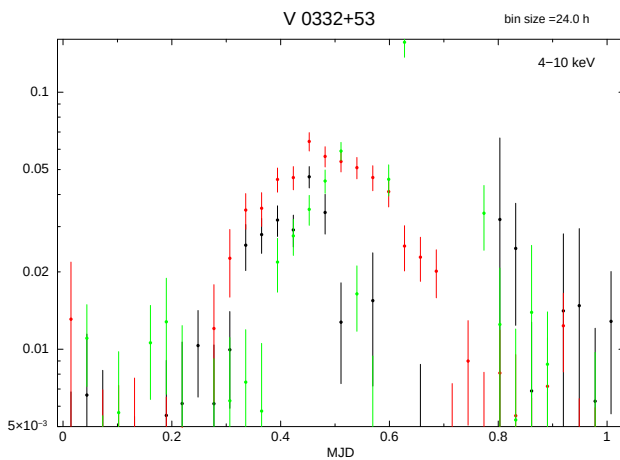


図 4.29: V 0332+53 の重ねた畳み込み光度曲線

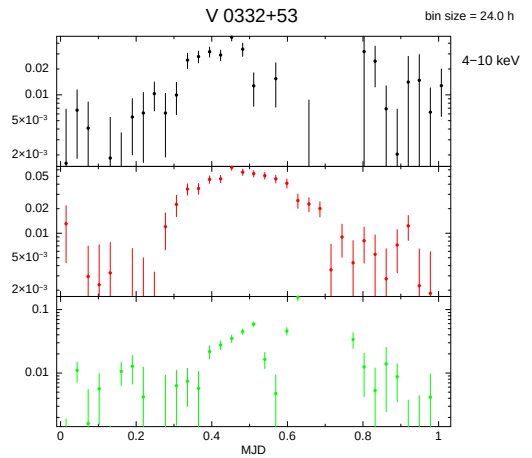


図 4.30: V 0332+53 の時間順に並べた畳み込み光度曲線

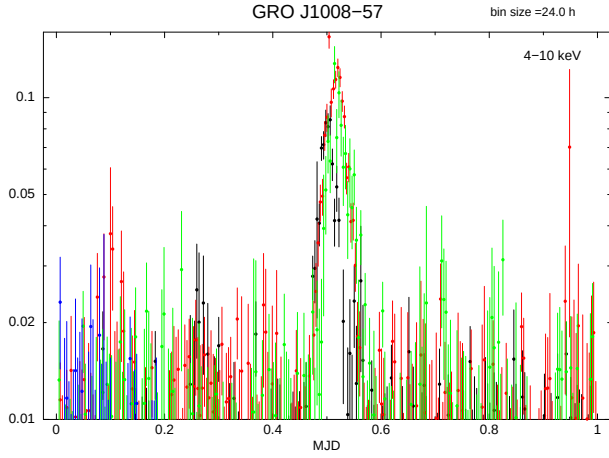


図 4.31: GRO J1008-57 の重ねて畳み込んだ光度曲線

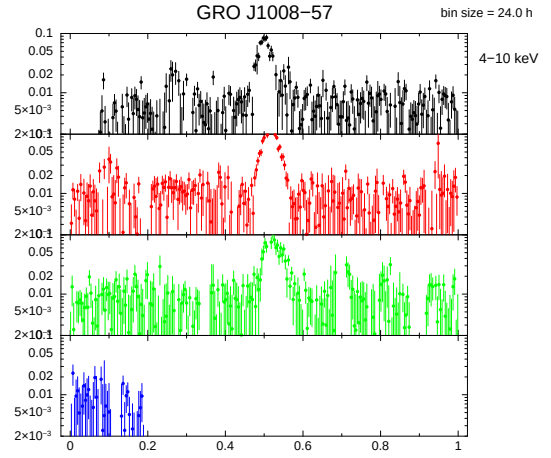


図 4.32: GRO J1008-57 の時間順に並べた畳み込み光度曲線

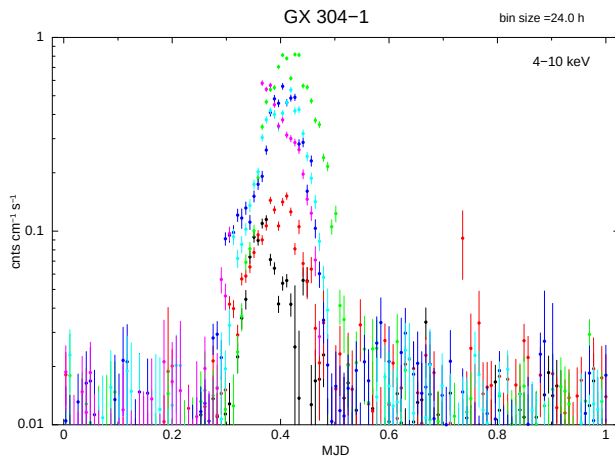


図 4.33: GX 304-1 重ねて畳み込んだ光度曲線

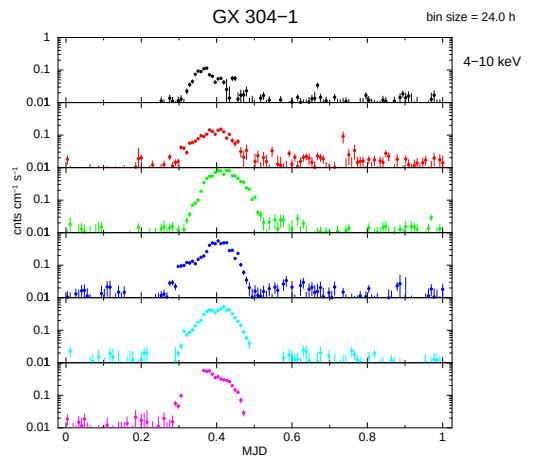


図 4.34: GX 304-1 の時間順に並べた畳み込み光度曲線

4.3.1 GRO J1008-57

先行研究でいわれていた軌道周期を使って光度曲線を畳み込みアウトバーストの起こる間隔を調べる。MAXIで得られた光度曲線のデータに加えて、MAXI以前に稼働していたRXTE衛星から得られた光度曲線も使い畳み込みを行う。MAXI以前のGRO J1008-57の観測で得られた軌道周期は248.9日といわれていた[9]。この軌道周期でRXTE衛星とMAXIの光度曲線をつかい畳み込んだものを図4.35に示す。

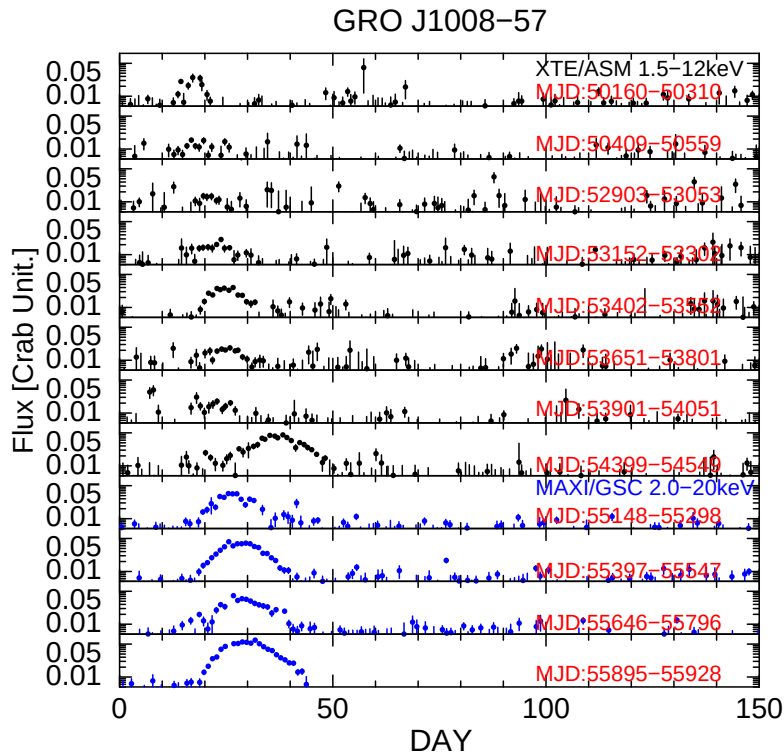


図 4.35: 先行研究の値 248.9 日で畳み込んだ光度曲線。

図 4.35 では周回数を重ねるごとにアウトバーストの起こる時期が後ろにずれ込んでいるように見える。そこでこのアウトバーストの 1 周回目の始めの時刻を 0 として、
 軌道周期のズレ = アウトバーストのピークの時刻 - 軌道周期 × 周回数
 と定義する。この軌道周期のズレのプロットを直線にフィッティングすることで軌道周期を求める。そのフィッティング結果の直線の傾きに $\frac{\text{観測期間}}{\text{期間分の周回数}}$ をかけるとずれの値を得ることができる。横軸に MJD、縦軸に軌道周期のズレをとり、この直線でフィッティングをした結果を図 4.36 に示す。フィッティングの結果、直線の傾きが 1.87×10^{-3} であるという結果が得られた。

フィッティングで得られた $1.87 \times 10^{-3} \times 248.9 = 0.47$ 日を軌道周期に足した 249.4 日が正しい周期であると考えられる。249 日で畳み込んだ光度曲線を図 4.37 に示す。

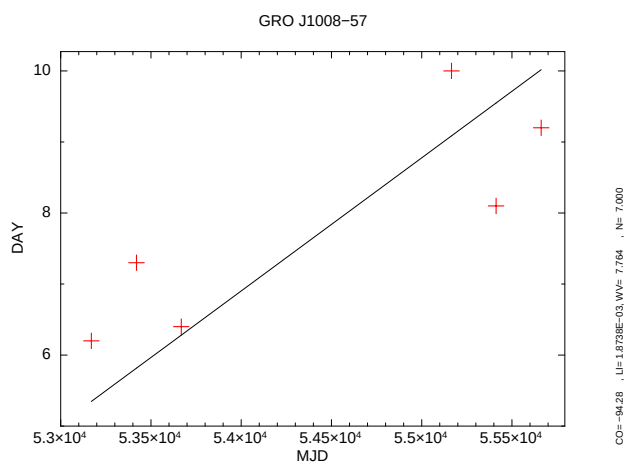


図 4.36: アウトバーストピークの軌道周期とのずれを直線でフィッティングした結果。傾きが 1.87×10^{-3} になった。

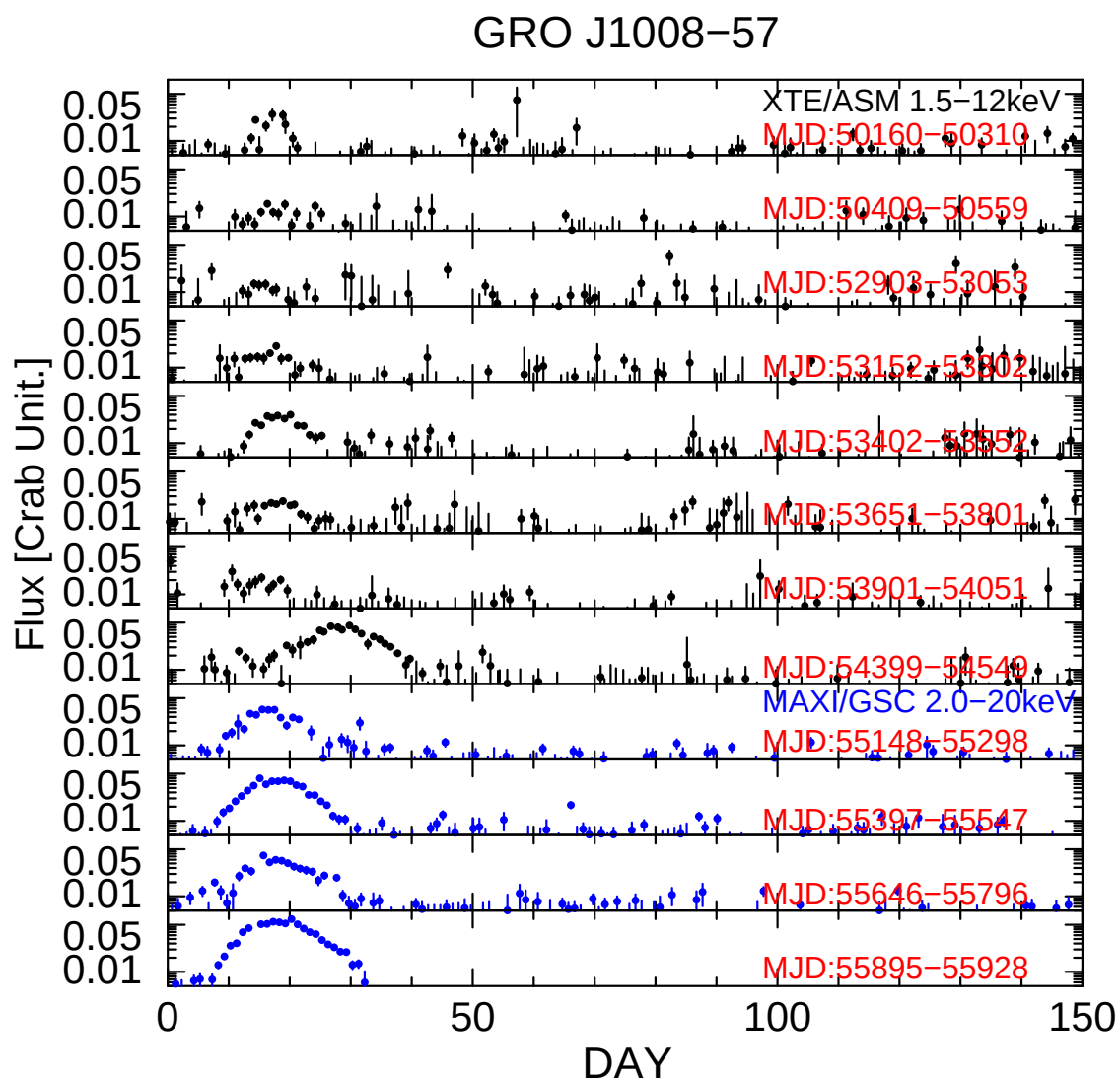


図 4.37: 249.4 日で畳み込んだ光度曲線。

4.3.2 XTE J1858+034

XTE J1858+034ではMAXIによって観測された2回のアウトバーストピークと過去に観測された2回の合計4回のアウトバーストピークから軌道周期を求める。軌道周期を求める方法として、アウトバーストピークの時間間隔が軌道周期の整数倍であるという条件を使う。これまでに観測されたXTE J1858+034のアウトバーストピークの時刻と観測検出器を表4.2に示す。

表 4.2: これまでに観測されたXTE J1858+034のアウトバーストピーク

ピーク時刻	観測検出器
1998年2月6日	RXTE/ASM
2004年5月1日	INTEGRAL/JEM-X
	RXTE/ASM
2010年9月9日	MAXI/GSC
2011年11月19日	MAXI/GSC

軌道周期 P_{orb} を変数にとって、

$$\text{ズレ} = \sum_{i=1}^3 \left(\left[\frac{T_i - T_0}{P_{orb}} \right] \text{の小数部} \right)^2 \quad (4.1)$$

を計算しこの値が小さいほど確からしいとして軌道周期 P_{orb} の探索をする。 T_i はアウトバーストのピーク時刻、4回観測されたアウトバーストのうち一番精度がよい2010年9月9日のピークの時刻を元期として T_0 用いた。その結果を図4.38に示す。

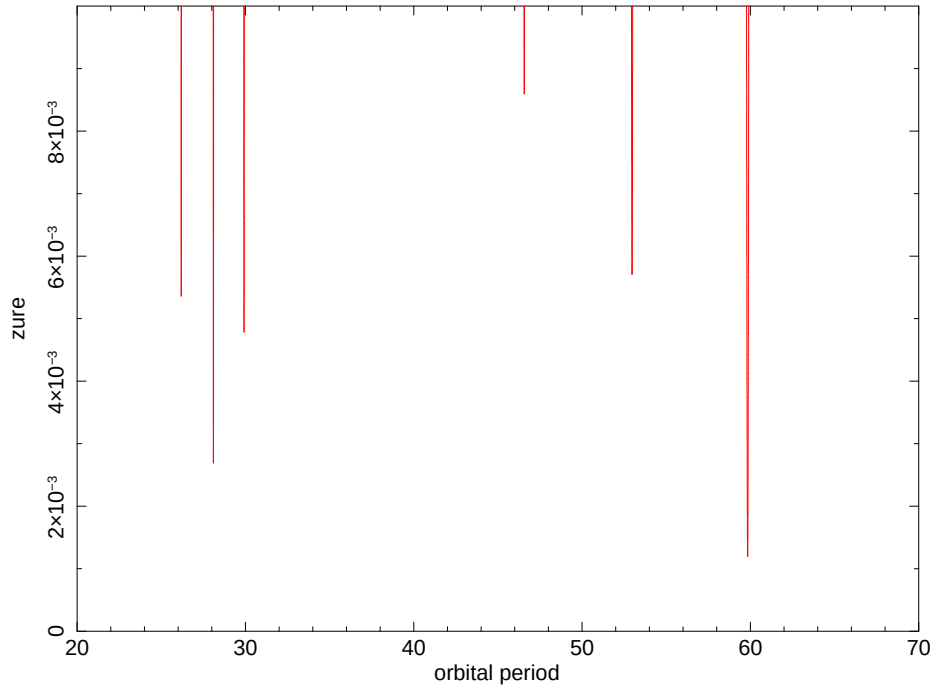


図 4.38: 軌道周期の探索

この軌道周期探索の結果 59.8 日が最もズレが小さいという結果が得られた。この 59.8 日周期で畳み込んだ XTE J1858+034 の光度曲線を図 4.39 に示す。

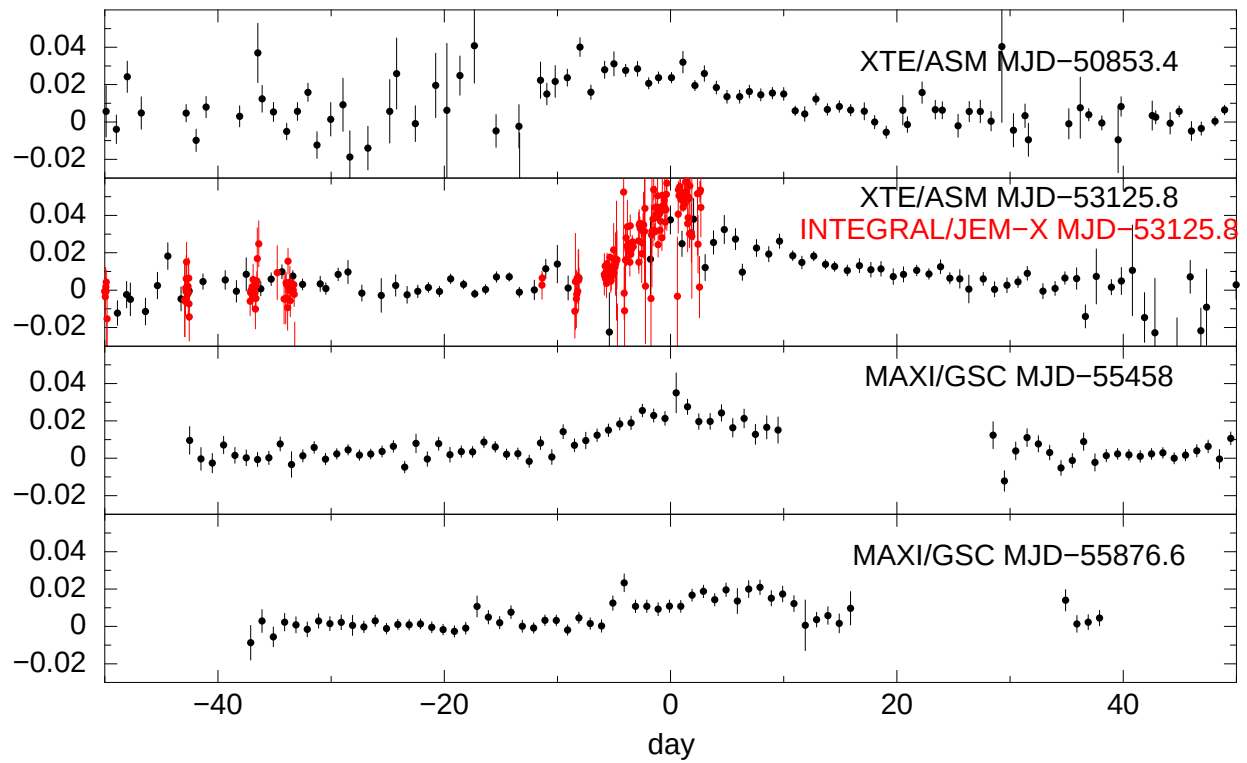


図 4.39: 24.8 日で畳み込んだ光度曲線

4.4 スペクトル解析

MAXIの観測データをスペクトル解析する。比較的統計のとれている明るい天体である A0535+262、GX 304-1 のアウトバーストについて取り扱う。

4.4.1 光度曲線と硬度比 による観測期間の分割

アウトバーストの期間をフェーズによって分割するために光度曲線と硬度比を使う。硬度比とはスペクトルの連続成分の形を表す量であり、スペクトルの硬度 (エネルギー帯間のカラー) を表す。アウトバースト時のスペクトルの変化を知るために硬度比を考える。X 線強度を 3つのエネルギー帯域 (2.0-4.0 keV、4.0-10.0 keV、10.0-20.0 keV) に分け、次のように硬度比を定義する。

$$\text{硬度比} = \frac{\text{高エネルギーバンドの強度}}{\text{低エネルギーバンドの強度}} \quad (4.2)$$

縦軸 Flux、横軸エネルギーでべき乗則スペクトル、熱制動放射、星間吸収の 3つの場合における硬度比の増減を表している。べき乗則スペクトルでは中心の軸を基準としたとき、右にべきがゆるくなると高エネルギーバンドが増加し、低エネルギーバンドは減少し、硬度比は増加する。逆にべきがきつくなると硬度比は減少する。

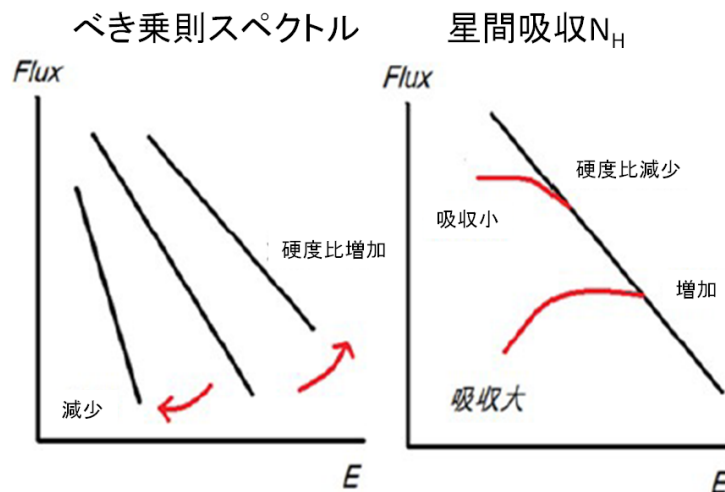
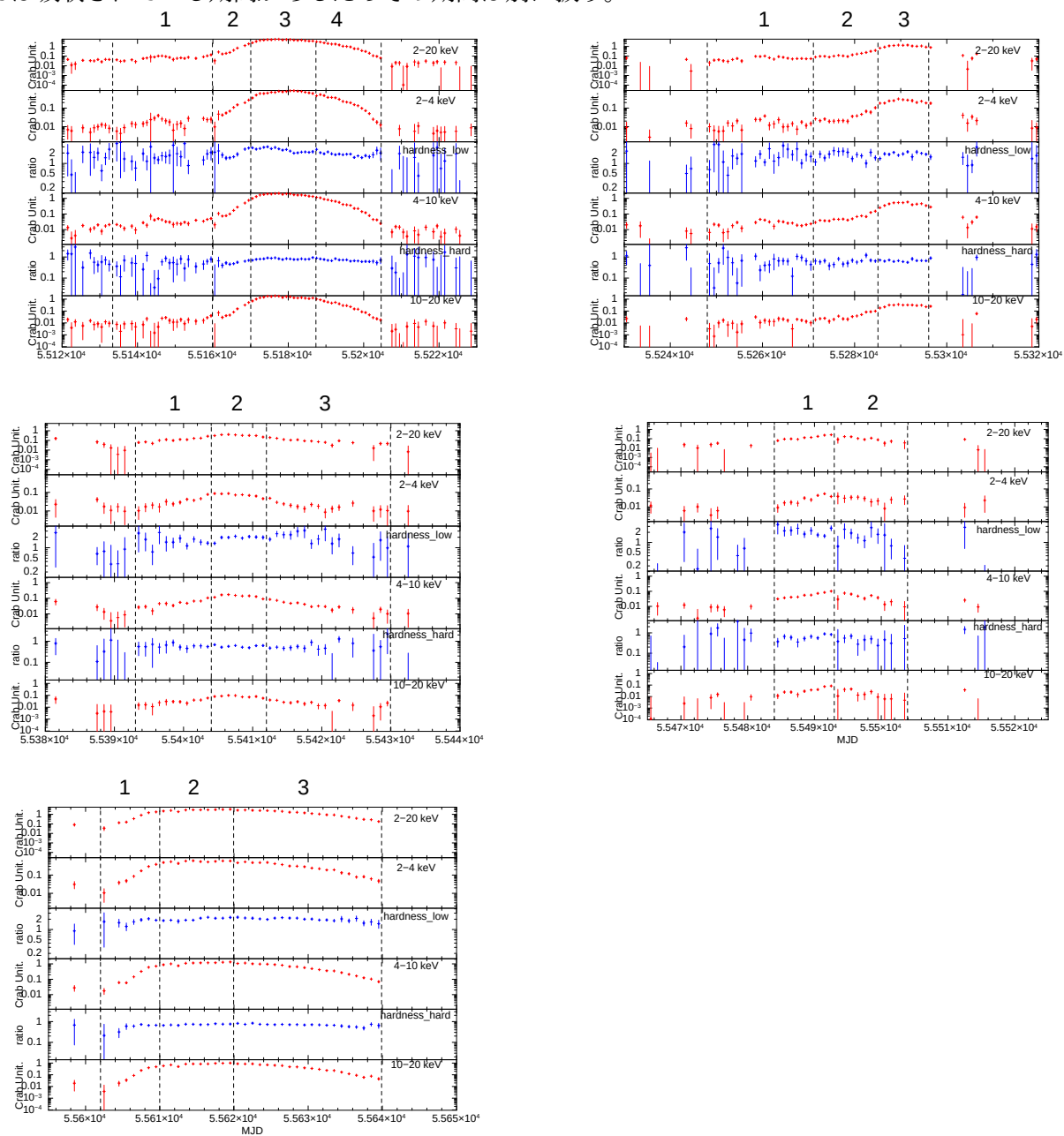
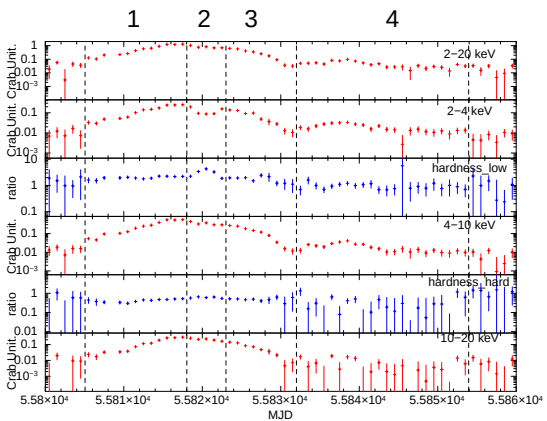
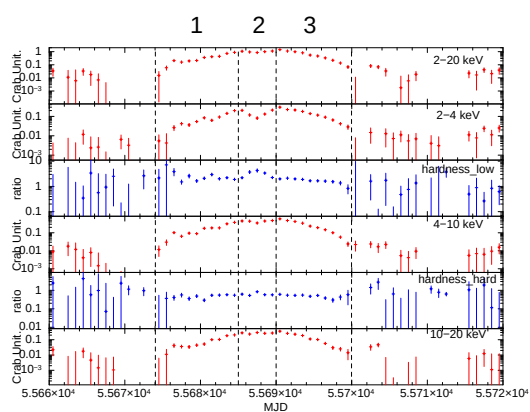
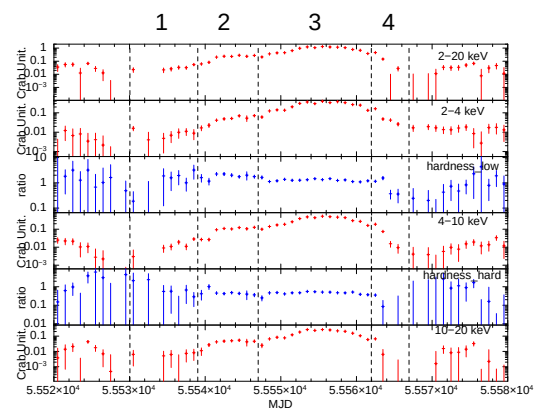
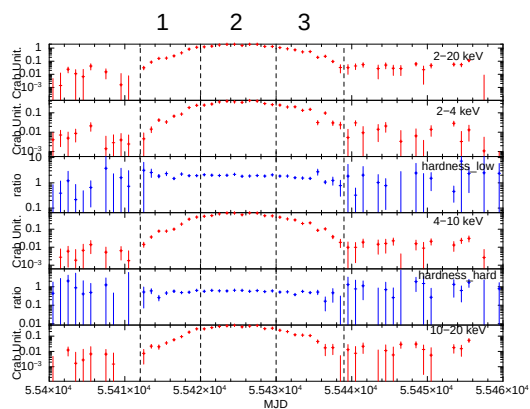
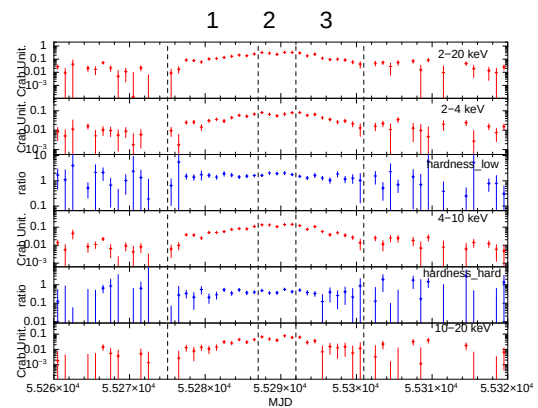
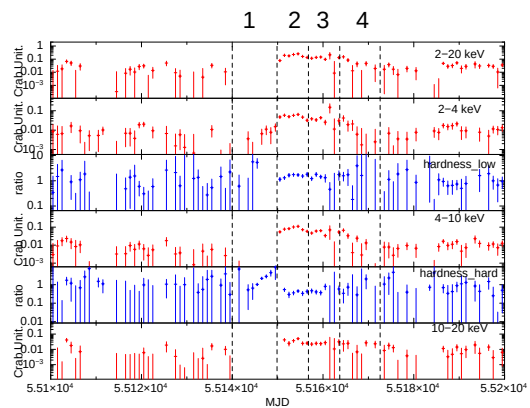


図 4.40: 硬度比の増減

光度曲線により増光、ピーク、減光の期間に分割する。GX 304-1 のアウトバーストの光度曲線では吸収されている期間があるためその期間は別に扱う。





4.4.2 Be 型 X 線連星パルサーのスペクトルモデル

1. べき型関数モデル

中性子星表面から放射された軟 X 線が降着円柱の高温プラズマにより逆コンプトン散乱されたものを表すモデルである。

$$M(E) = KE^{-\Gamma} \quad (4.3)$$

K は単位時間・面積・エネルギーあたりの放射光子量、 Γ はべき指数 (無次元量) である。

2. 黒体輻射モデル

密度 n 、吸収散乱断面積 σ 、厚さ d として光学的厚さ $\tau = n\sigma d$ が 1 より十分に大きい熱平衡の物質からの電磁波の放射を表すモデルである。そのスペクトルは、単位エネルギー、単位面積、単位時間で

$$B(E, T)dEdSdt = \frac{2\nu^2}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp(E/kT) - 1} dEdSdt \quad (4.4)$$

と表される。スペクトルは物質の自己吸収のため低エネルギー側で下がる。高エネルギー側も物質中の電子が kT 以上のエネルギーを持っていないため、 $E > kT$ 以上でスペクトルが下がる。黒体輻射のモデルには kT と normalization の 2 つのパラメータがある。上の式を全エネルギーで積分すると、

$$B(T) = \int B(E, T)EdE = \sigma T^4 \quad (4.5)$$

となる (ステファンボルツマン定数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4]$)。

天体の半径を R とすると、全光度は

$$L = 4\pi R^2 \times \sigma T^4 \quad (4.6)$$

で表される。観測されるフラックスは天体までの距離を D とすると、

$$f = \frac{L}{4\pi D^2} = \frac{R^2}{D} \sigma T^4 \quad (4.7)$$

$$= 1.14 \times 10^{-9} \cdot \left(\frac{D}{1\text{kpc}}\right)^{-2} \left(\frac{R}{10\text{km}}\right)^2 \left(\frac{T}{1\text{keV}}\right)^4 [\text{erg/s/cm}^{-2}] \quad (4.8)$$

となる [15]。

3. 星間吸収モデル

宇宙空間は真空ではなく、様々な星間物質によって満たされている。このため、天体から放射される X 線が我々に届くまでに吸収が起こる。この星間物質による光電吸収をモデル化したものが wabs モデルで、式 4.9 で表される。

$$M(E) = \exp(-N_H \sigma(E)) \quad (4.9)$$

N_H は水素の柱密度 (単位面積あたり 10^{22} 個単位) で、視線方向に水素がどれだけ存在するかを表す指標となる。

4. 部分吸収モデル

wabs モデルでは、視線方向に存在する吸収体が一様であると仮定している。しかし、広大な宇宙空間において星間物質が一様に分布しているとは到底考えられない。物質が濃い領域・薄い領域とむらがあるのは当然で、様々な量の吸収体が様々な割合で存在していると考えるのが普通である。このような部分吸収に関するモデルが pcfabs モデルである。f は covering fraction といい、吸収体のむらを表す指標で、0 から 1 までの値を取る無次元量である。いま $f=0.3$ とすると、視線方向の視野の 3 割に吸収体が存在し、放射の 3 割が吸収されて残りの 7 割が我々に届くとされている。f=1 のときは wabs モデルと同じ振る舞いを示す。

$$M(E) = f \cdot \exp(-N_H \sigma(E)) + (1 - f) \quad (4.10)$$

4.5 A 0535+262 のスペクトル

まずべき型関数モデルに星間吸収モデルを使ってモデルフィッティングを行った。wabs*powでのフィッティングパラメータを表 4.3 に示す。

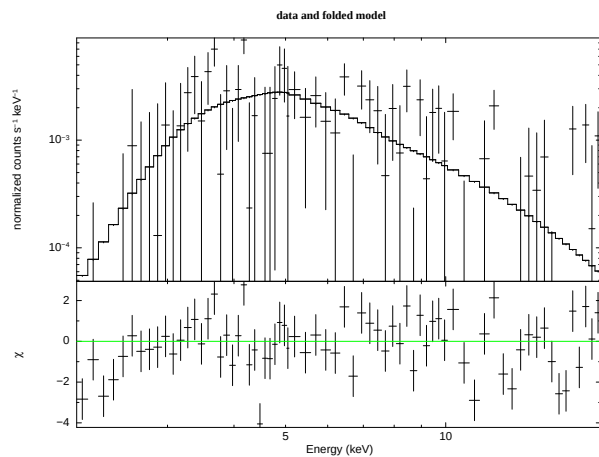


図 4.41: 55134-55160

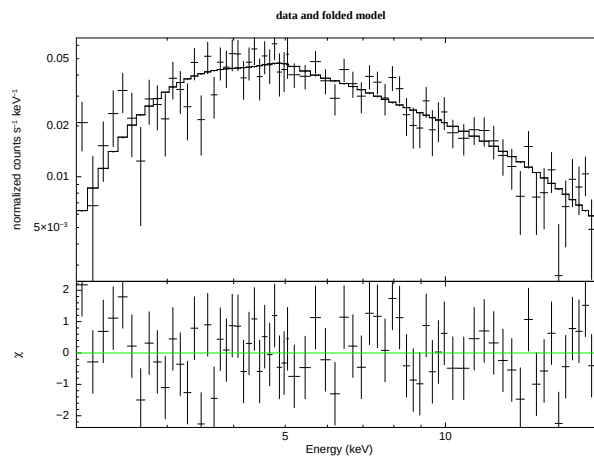


図 4.42: 55160-55170

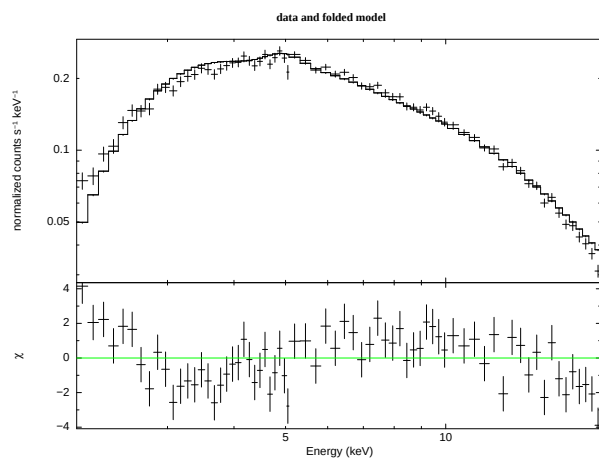


図 4.43: 55170-55187

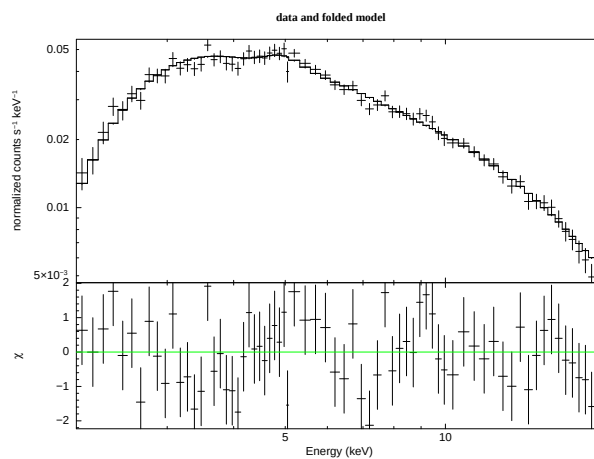


図 4.44: 55187-55204

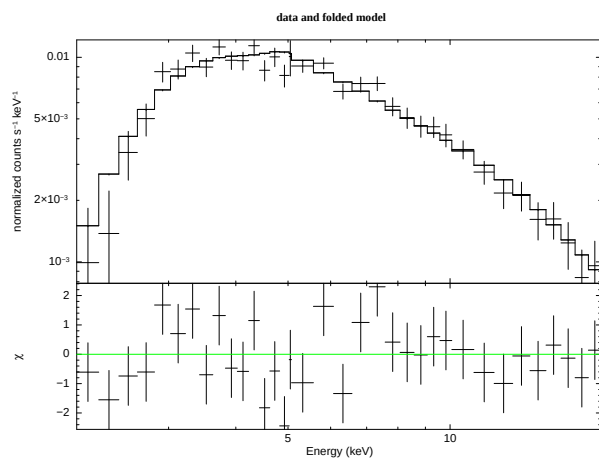


図 4.45: 55243-55292

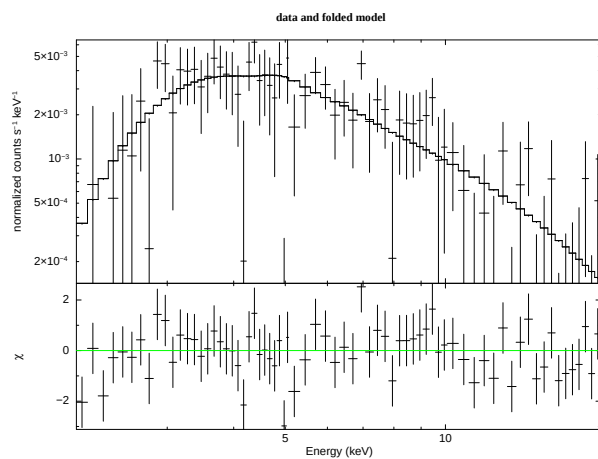


図 4.46: 55248-55271

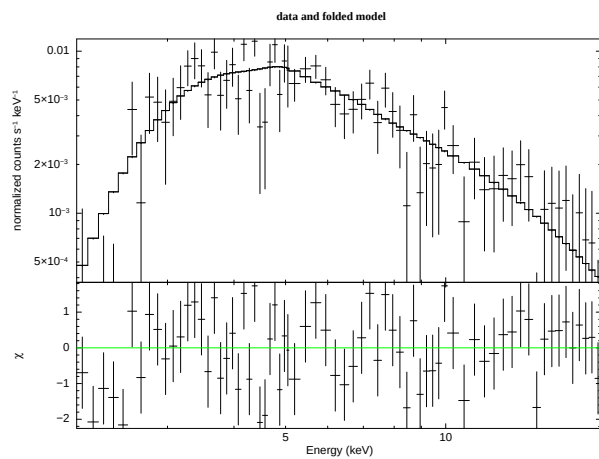


図 4.47: 55271-55285

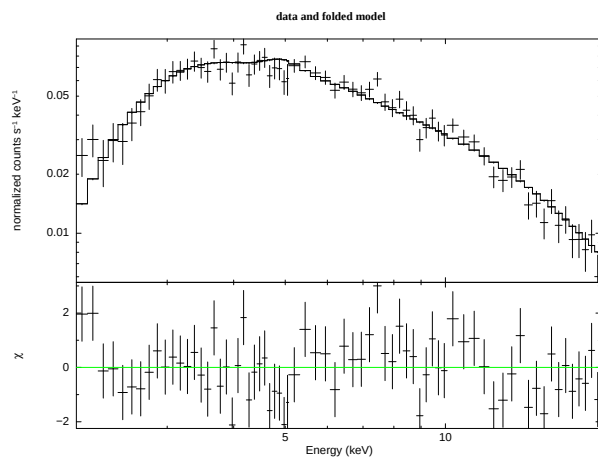


図 4.48: 55285-55296

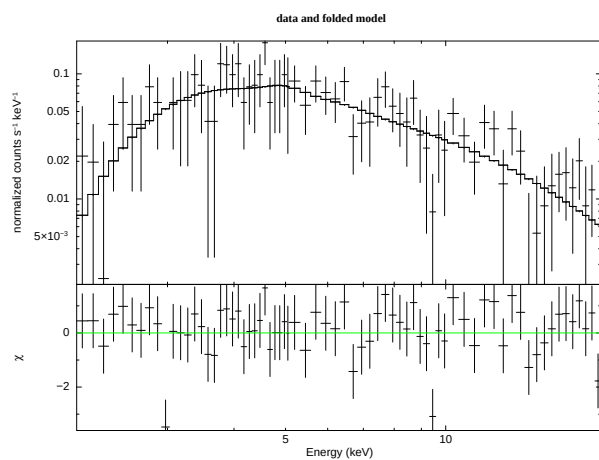


図 4.49: 55293-55305

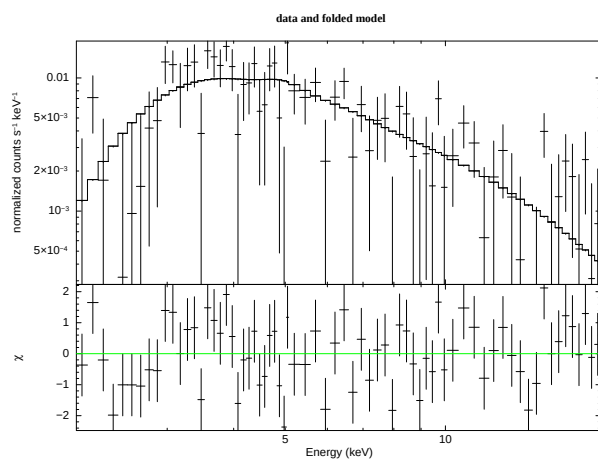


図 4.50: 55393-55404

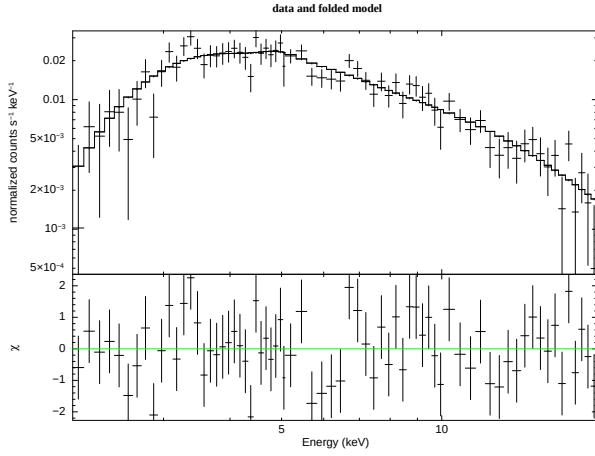


図 4.51: 55404-55412

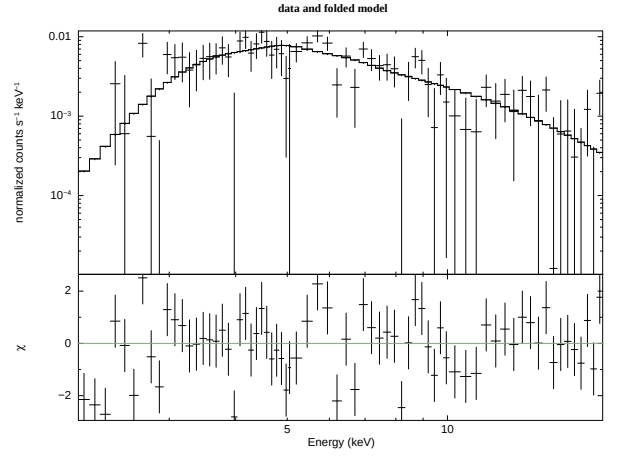


図 4.52: 55412-55430

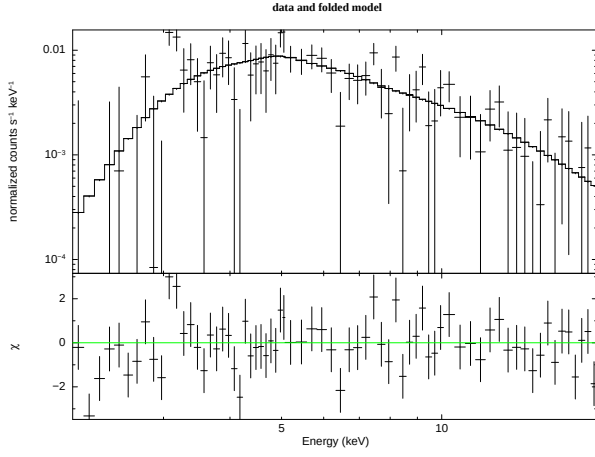


図 4.53: 55484-55493

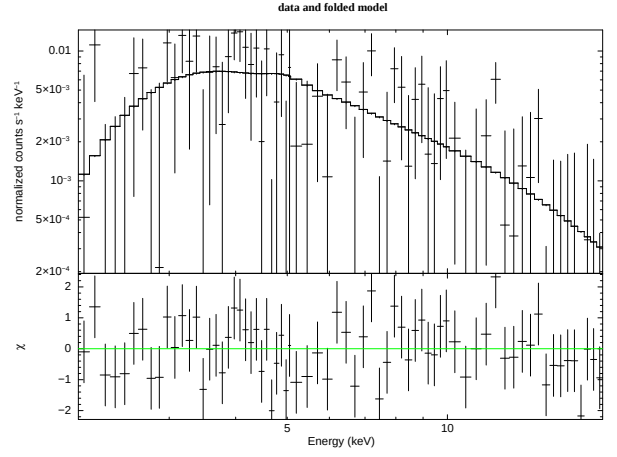


図 4.54: 55493-55503

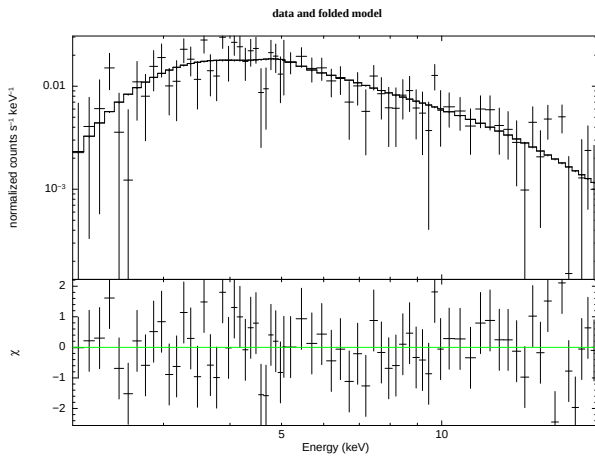


図 4.55: 55602-55610

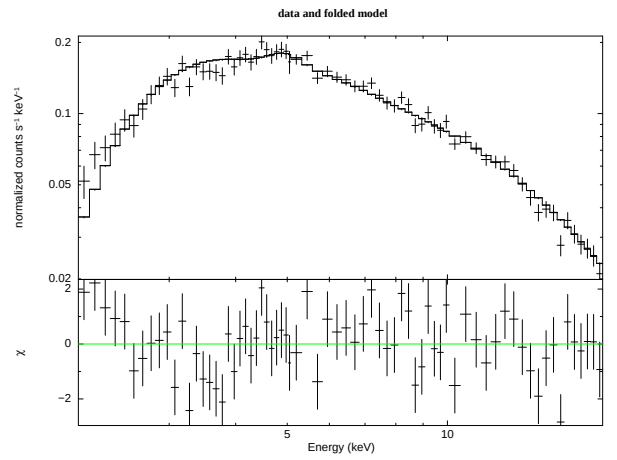


図 4.56: 55610-55620

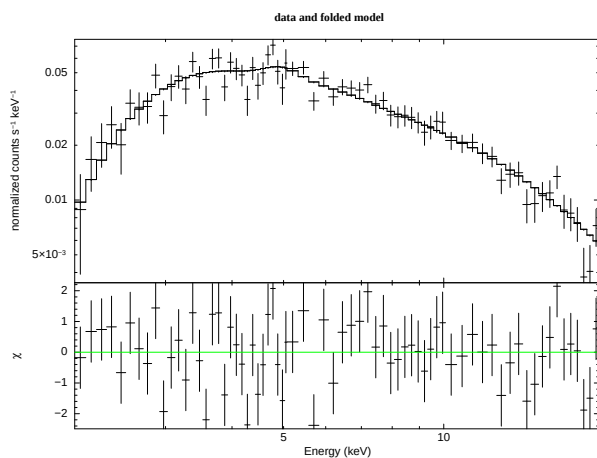


図 4.57: 55620-55640

期間 (MJD)	wabs	powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) (10^{-9} ergs/cm ² /s)
	N_H	Γ	norm		
55134-55160	17.0 ± 9.13	2.85 ± 0.95	0.78 ± 1.51	1.90	0.26
55160-55170	4.05 ± 0.96	1.28 ± 0.09	0.67 ± 0.15	0.92	9.14
55170-55187	2.17 ± 0.14	0.98 ± 0.01	2.03 ± 0.07	2.44	57.4
55187-55204	1.62 ± 0.20	1.13 ± 0.02	0.47 ± 0.03	0.95	9.46
55271-55285	8.78 ± 1.89	1.97 ± 0.21	0.41 ± 0.18	0.99	1.08
55285-55296	2.77 ± 0.39	1.26 ± 0.04	0.97 ± 0.10	1.13	14.4
55293-55305	5.74 ± 2.28	1.53 ± 0.24	1.76 ± 0.95	0.88	13.2
55393-55404	5.79 ± 2.18	1.97 ± 0.31	0.43 ± 0.26	1.13	1.23
55404-55412	5.15 ± 0.87	1.60 ± 0.10	0.57 ± 0.12	0.98	3.73
55412-55430	13.8 ± 3.43	2.20 ± 0.31	0.69 ± 0.45	1.46	0.99
55484-55493	12.2 ± 3.81	1.97 ± 0.33	0.51 ± 0.36	1.30	1.25
55493-55503	4.48 ± 4.05	1.88 ± 0.58	0.24 ± 0.28	0.85	0.87
55602-55610	4.94 ± 1.57	1.66 ± 0.19	0.48 ± 0.19	0.87	2.73
55610-55620	2.26 ± 0.23	1.08 ± 0.03	1.66 ± 0.10	1.27	37.5
55620-55640	2.85 ± 0.51	1.21 ± 0.06	0.63 ± 0.08	1.12	10.4

表 4.3: A 0535+262 の wabs*powerlaw フィットパラメータ

この wabs*powerlaw のモデルフィッティングの結果、アウトバーストのピークである 55170-55187、55610-55620 の期間の 3 ～ 4keV のあたりのエネルギーでデータとモデルの間にずれが生じた。このずれをなくすために黒体輻射を追加したモデルと部分吸収を追加したモデルの 2 種類のフィッティングを考えた。

部分吸収を追加した wabs*pcfabs*powerlaw のモデルフィッティングの結果を以下に示す。

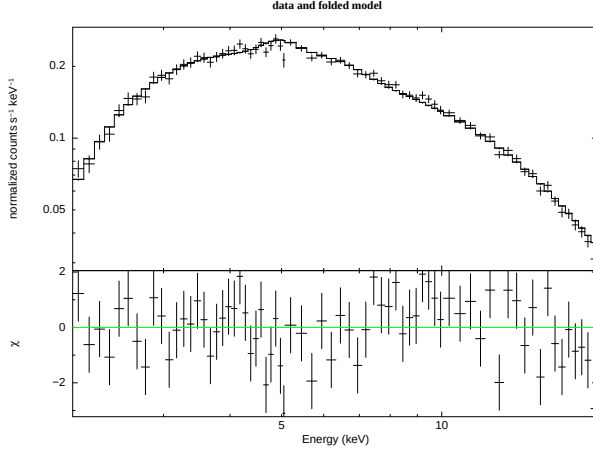


図 4.58: 55170-55187 の期間の wabs*gabs*pcfabs でのフィッティング

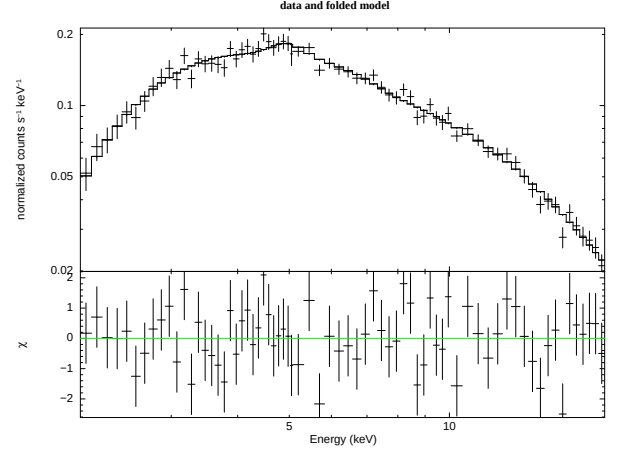


図 4.59: 55610-55620 の期間の wabs*pcfabs*pow でのフィッティング

期間 (MJD)	wabs	pcfabs		powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) (10^{-9} ergs/cm ² /s)
	N_H	N_H	CvrFract	Γ	norm		
55170-55187	$0.0^{0.79}_{0.0}$	12.0 ± 2.29	0.62 ± 0.08	1.19 ± 0.03	3.57 ± 0.32	1.15	57.5
55412-55430	10.5 ± 102.8	2.93 ± 93.8	0.95 ± 244.9	2.16 ± 0.48	0.63 ± 0.66	1.51	1.00
55610-55620	$0.0^{1.01}_{0.0}$	10.2 ± 4.11	0.59 ± 0.19	1.22 ± 5.58	2.43 ± 0.37	0.96	37.4

表 4.4: wabs*pcfabs*pow のフィットパラメータ

次に黒体輻射を追加した $\text{wabs}*(\text{bbody}+\text{powerlaw})$ のモデルフィッティングの結果を以下に示す。

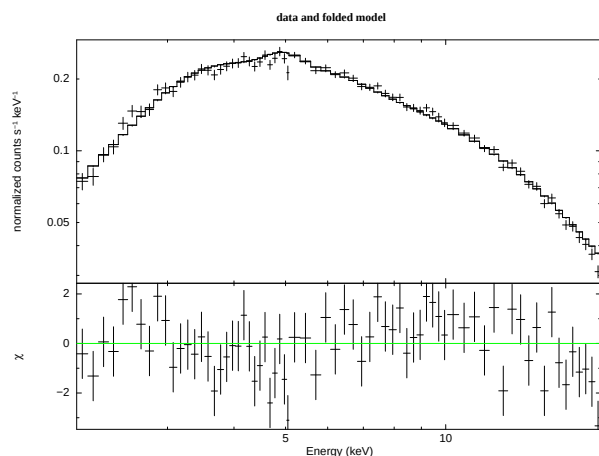


図 4.60: 55170-55187 の期間の $\text{wabs}*\text{bbody}*\text{powerlaw}$ でのフィッティング

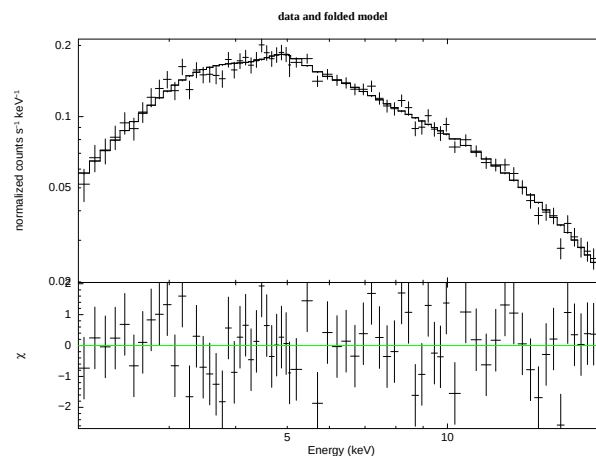


図 4.61: 55170-55187 の期間の $\text{wabs}*(\text{bbody}+\text{powerlaw})$ でのフィッティング

期間 (MJD)	wabs	bbody		powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) ($10^{-9}\text{ergs/cm}^2/\text{s}$)
	N_H	kT	norm	Γ	norm		
55170-55187	3.41 ± 0.23	0.15 ± 0.002	16.2 ± 3.29	1.05 ± 0.04	2.41 ± 0.25	1.59	57.3
55412-55430	13.8 ± 4.03	0.15 ± 1.0	0.0 ± 40.8	2.20 ± 0.33	0.69 ± 0.49	1.51	0.99
55610-55620	3.50 ± 0.40	0.15 ± 0.003	11.5 ± 4.00	1.15 ± 0.08	1.99 ± 0.41	0.99	37.4

表 4.5: $\text{wabs}*(\text{bbody}+\text{pow})$ のフィットパラメータ

4.6 GX 304-1 のスペクトル

A 0535+262 のスペクトルと同様に始めに wabs*powerlaw のモデルフィッティングをする。

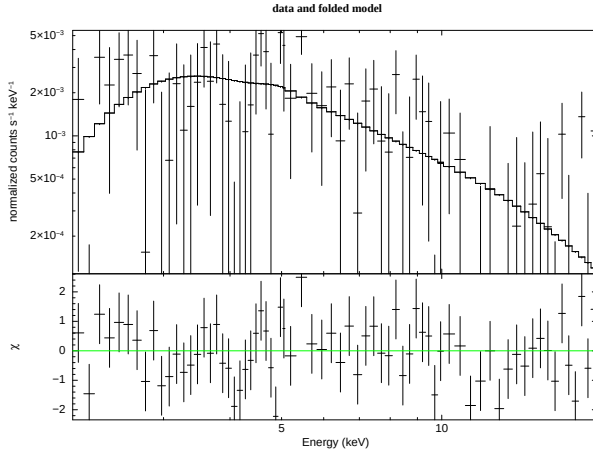


図 4.62: GX 304-1 55140-55150 powerlaw

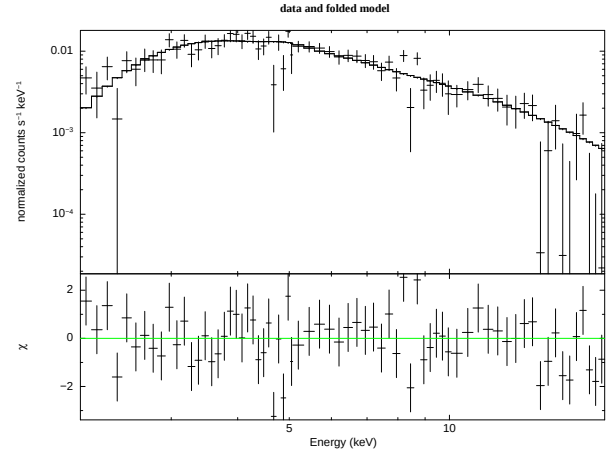


図 4.63: GX 304-1 55150-55161 powerlaw

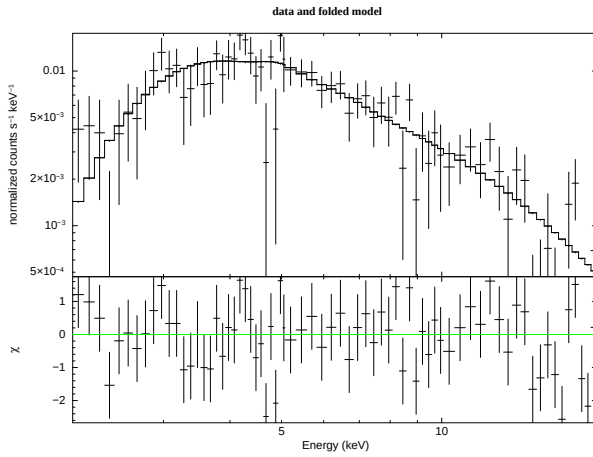


図 4.64: GX 304-1 55154-55161 powerlaw

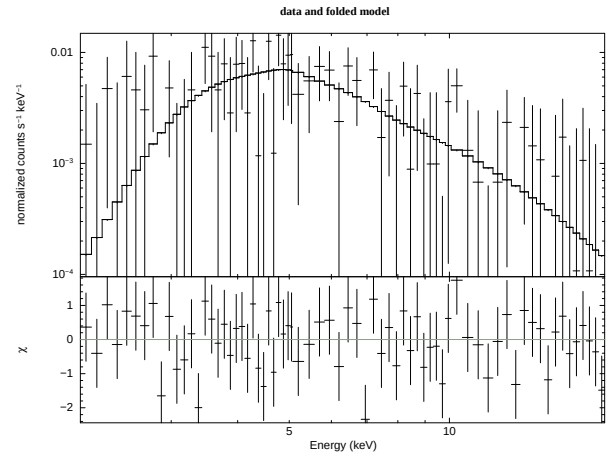


図 4.65: GX 304-1 55161-55170 powerlaw

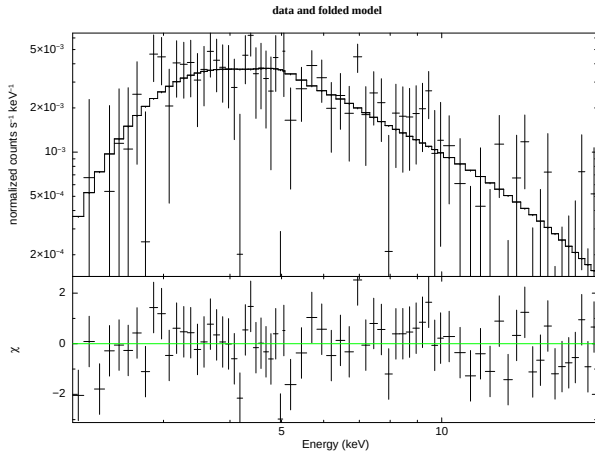


図 4.66: GX 304-1 55248-55271 powerlaw

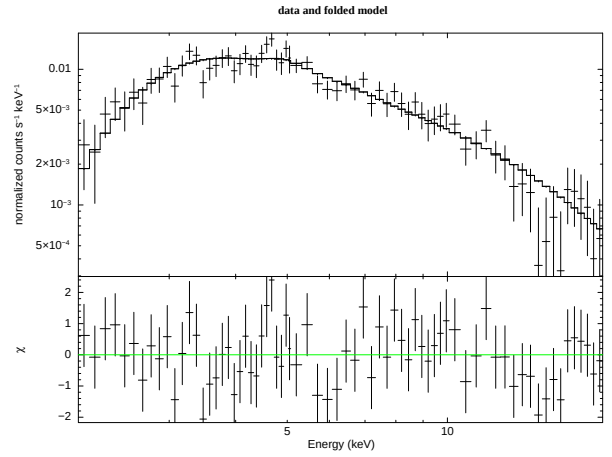


図 4.67: GX 304-1 55275-55290 powerlaw

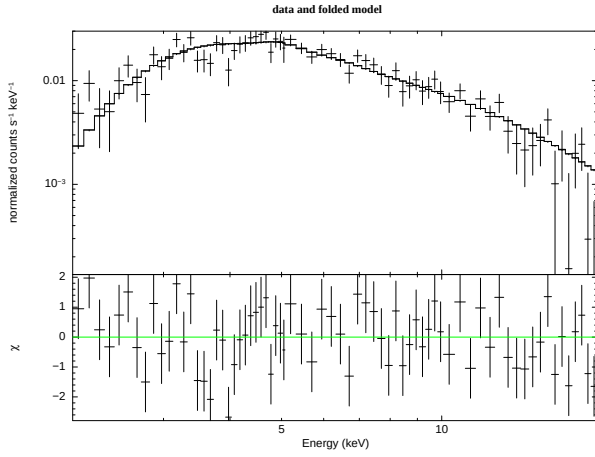


図 4.68: GX 304-1 55287-55292 powerlaw

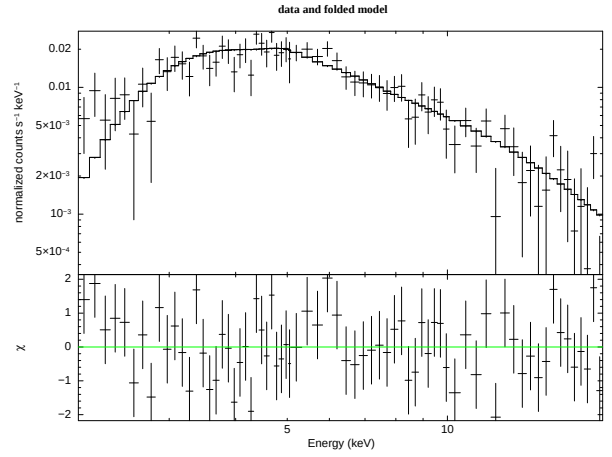


図 4.69: GX 304-1 55290-55301 powerlaw

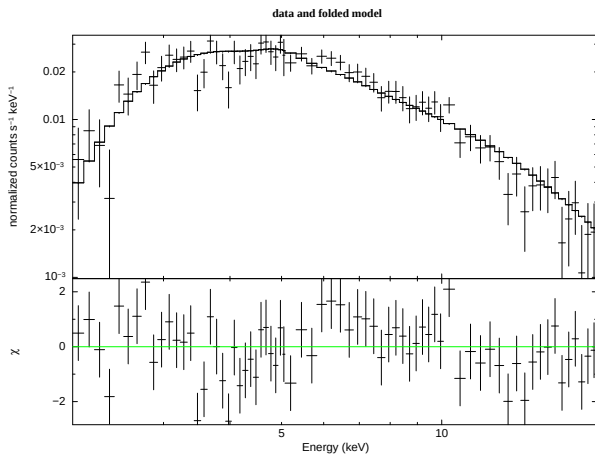


図 4.70: GX 304-1 55412-55420 powerlaw

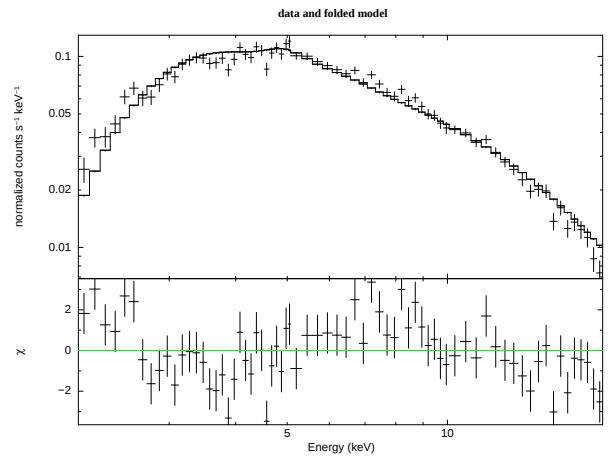


図 4.71: GX 304-1 55420-55430 powerlaw

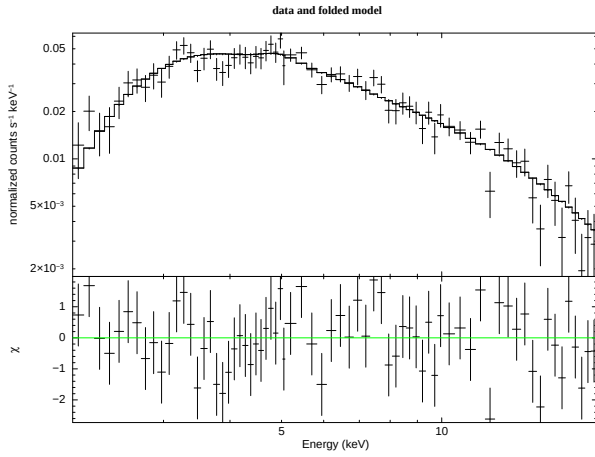


図 4.72: GX 304-1 55430-55439 powerlaw

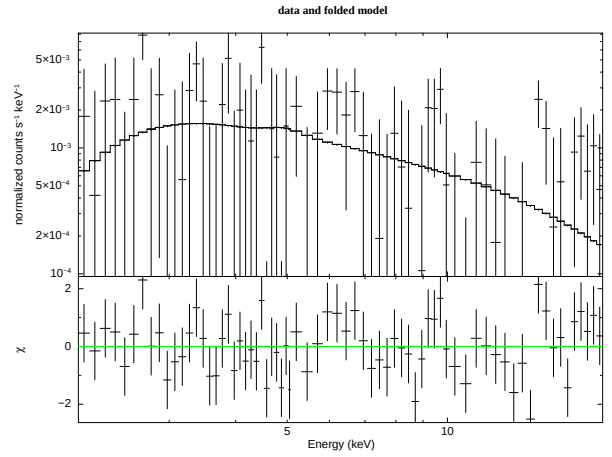


図 4.73: GX 304-1 55531-55540 powerlaw

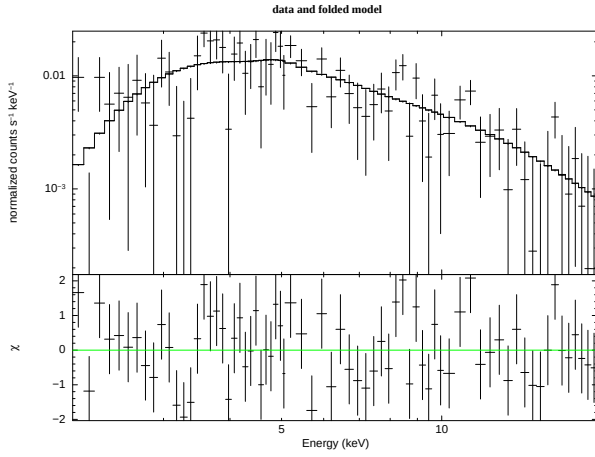


図 4.74: GX 304-1 55540-55548 powerlaw

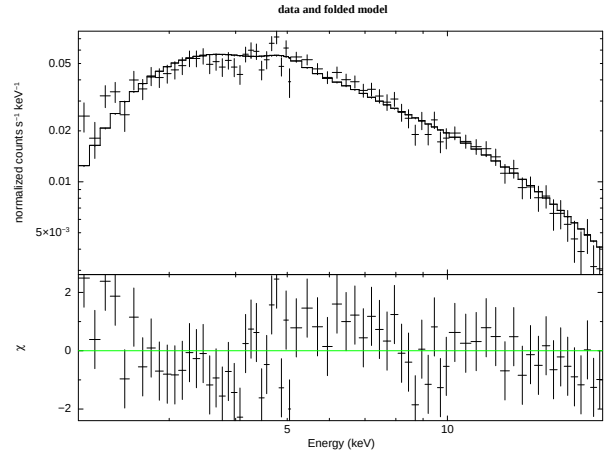


図 4.75: GX 304-1 55548-55563 powerlaw

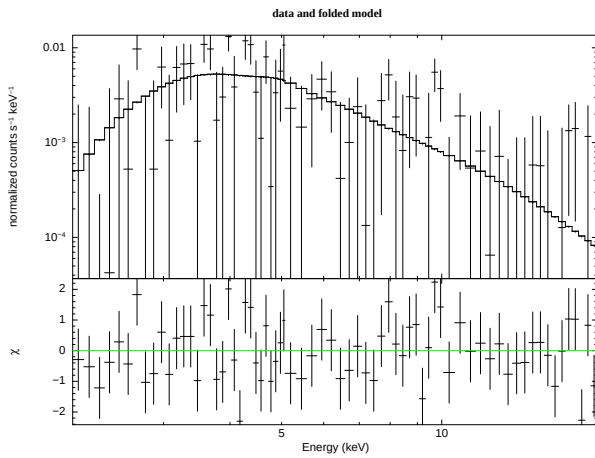


図 4.76: GX 304-1 55563-55578 powerlaw

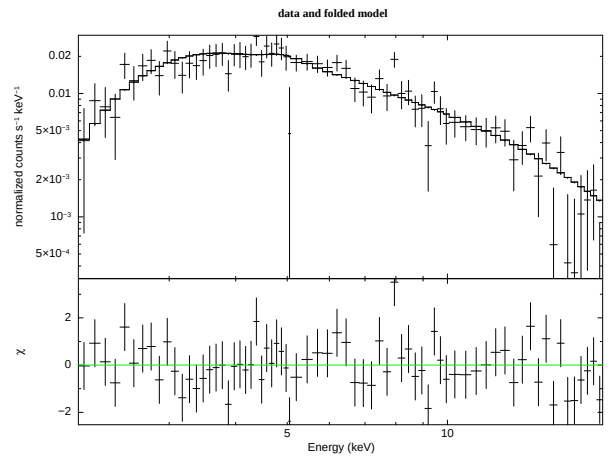


図 4.77: GX 304-1 55674-55685 powerlaw

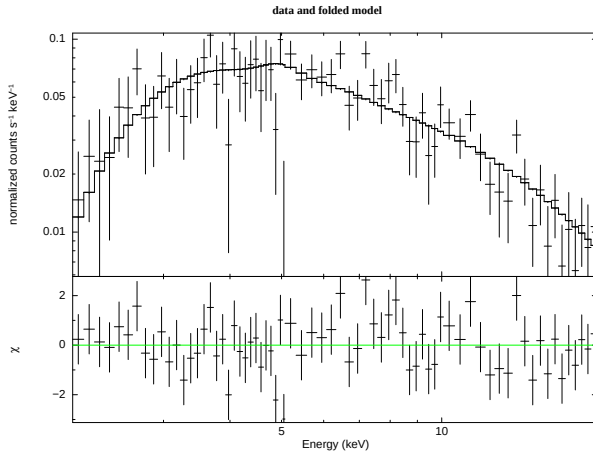


図 4.78: GX 304-1 55685-55690 powerlaw

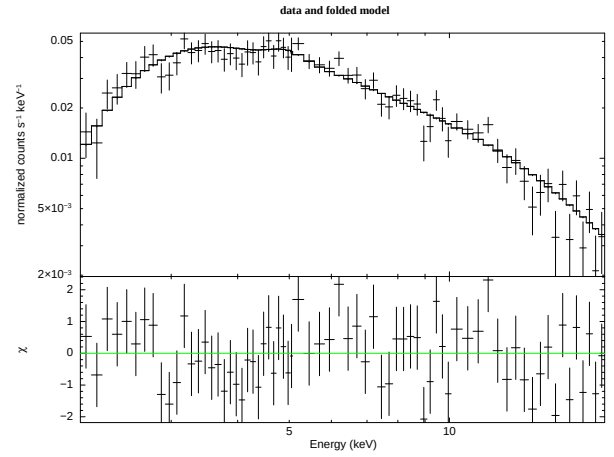


図 4.79: GX 304-1 55690-55700 powerlaw

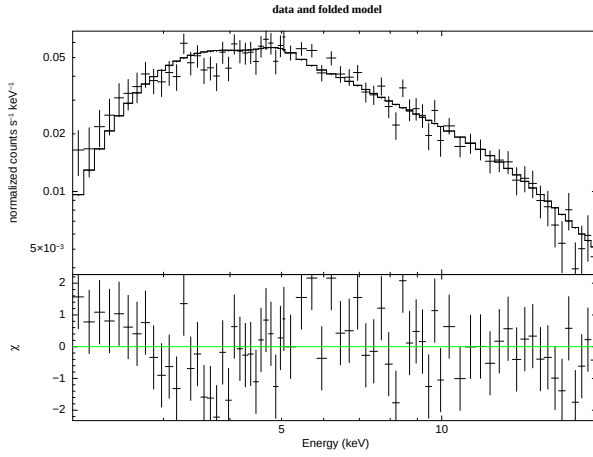


図 4.80: GX 304-1 55805-55818 powerlaw

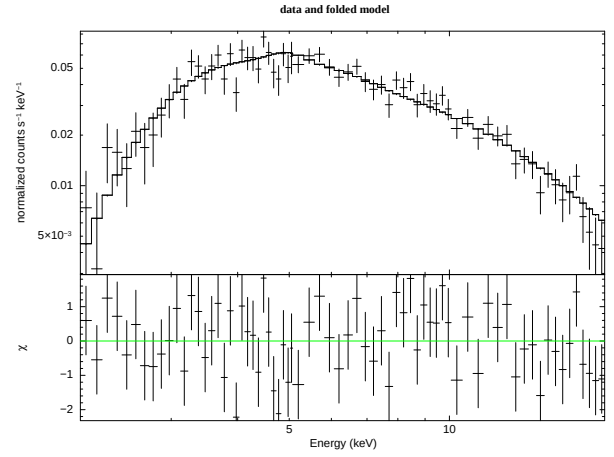


図 4.81: GX 304-1 55818-55823 powerlaw

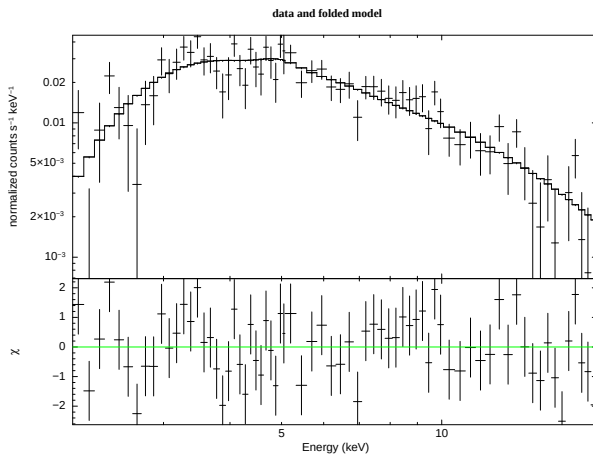


図 4.82: GX 304-1 55823-55832 powerlaw

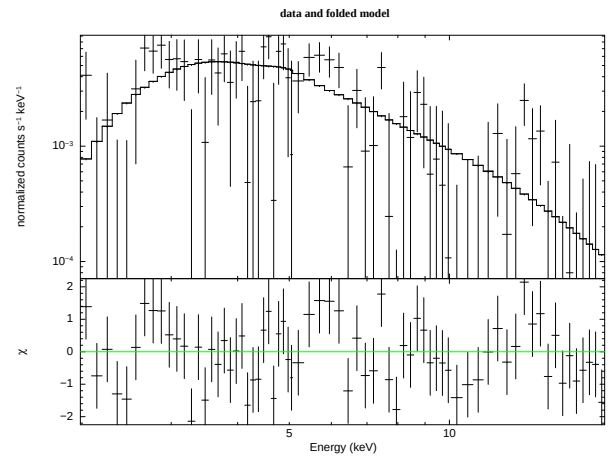


図 4.83: GX 304-1 55832-55854 powerlaw

期間 (MJD)	wabs	powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) (10^{-9} ergs/cm ² /s)
	N_H	Γ	norm		
55140-55150	2.35 ± 3.13	1.74 ± 0.53	5.99 ± 0.06	1.00	0.32
55150-55161	5.17 ± 0.91	1.88 ± 0.12	0.49 ± 0.12	1.23	1.76
55161-55170	16.68 ± 9.39	2.83 ± 0.99	1.88 ± 3.81	0.72	0.66
55248-55275	15.2 ± 9.72	4.95 ± 2.15	8.61 ± 31.4	1.28	0.08
55275-55290	4.88 ± 0.73	1.78 ± 0.10	0.38 ± 0.07	0.85	1.70
55290-55301	6.97 ± 1.14	1.96 ± 0.14	0.93 ± 0.26	0.93	2.67
55412-55420	4.83 ± 0.70	1.57 ± 0.08	0.64 ± 0.11	1.14	4.47
55420-55430	3.75 ± 0.23	1.37 ± 0.02	1.76 ± 0.10	2.31	19.7
55430-55439	3.78 ± 0.55	1.52 ± 0.07	0.94 ± 0.14	1.01	7.58
55531-55540	0.0 ± 10.3	1.10 ± 0.75	0.01 ± 0.02	0.96	0.29
55540-55548	5.63 ± 2.13	1.69 ± 0.24	0.38 ± 0.20	1.00	2.05
55548-55563	3.06 ± 0.37	1.51 ± 0.05	1.05 ± 0.05	1.20	8.91
55563-55578	8.31 ± 5.18	2.75 ± 0.85	0.79 ± 1.26	0.96	0.44
55674-55685	3.51 ± 0.81	1.61 ± 0.10	0.47 ± 0.10	1.00	3.14
55685-55690	3.42 ± 1.11	1.18 ± 0.11	0.85 ± 0.22	1.09	14.8
55690-55700	2.40 ± 0.46	1.44 ± 0.06	0.73 ± 0.10	0.98	7.40
55805-55818	3.45 ± 0.47	1.40 ± 0.05	0.93 ± 0.11	1.02	9.73
55818-55823	6.64 ± 0.76	1.39 ± 0.07	1.13 ± 0.18	0.96	11.4
55823-55832	5.13 ± 1.06	1.66 ± 0.13	0.78 ± 0.21	1.22	4.47
55832-55854	6.18 ± 3.02	2.44 ± 0.52	0.44 ± 0.43	0.99	0.49

表 4.6: GX 304-1 の wabs*pow のフィットパラメータ

次に部分吸収モデルを追加した `wabs*pcfabs*pow` でモデルフィッティングをした結果を以下に示す。

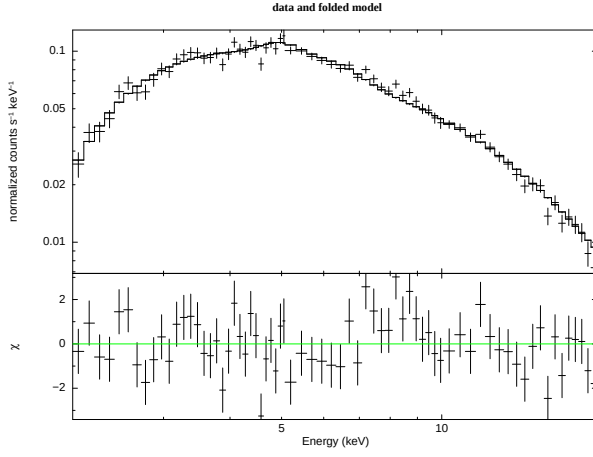


図 4.84: GX 304-1 55420-55430 pcfabs

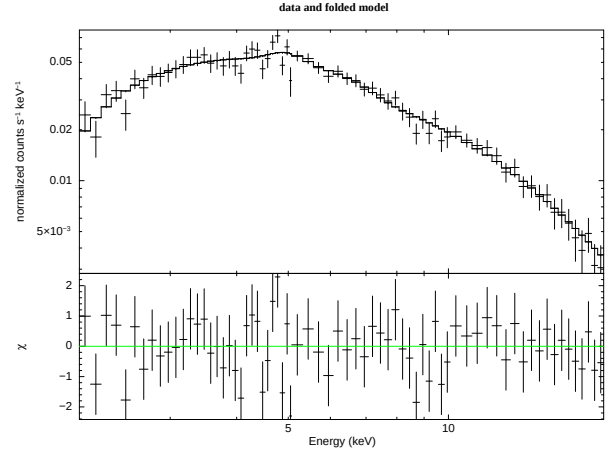


図 4.85: GX 304-1 55548-55563 pcfabs

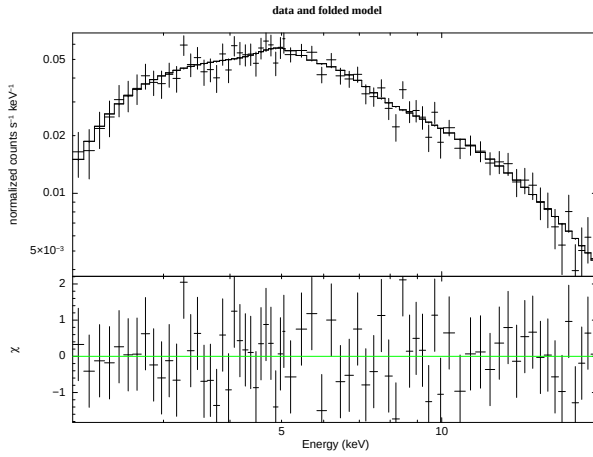


図 4.86: GX 304-1 55805-55818 pcfabs

部分吸収を追加したフィッティングで得られたパラメータを表 4.7 に示す。

期間 (MJD)	wabs	pcfabs		powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) (10^{-9} ergs/cm ² /s)
	N_H	N_H	CvrFract	Γ	norm		
55248-55275	3.13 ± 22.7	15.8 ± 17.8	0.95 ± 8.90	4.93 ± 3.65	9.97 ± 69.9	1.31	0.08
55420-55430	1.85 ± 0.67	18.3 ± 4.51	0.59 ± 0.05	1.66 ± 0.07	3.80 ± 0.68	1.50	19.6
55548-55563	0.73 ± 1.10	16.6 ± 5.25	0.68 ± 0.08	1.84 ± 0.11	2.54 ± 0.72	0.80	8.80

表 4.7: `wabs*pcfabs*pow` のフィットパラメータ

次に bbody を追加した $wabs*(bbody+powerlaw)$ でモデルフィッティングをした結果を以下に示す。

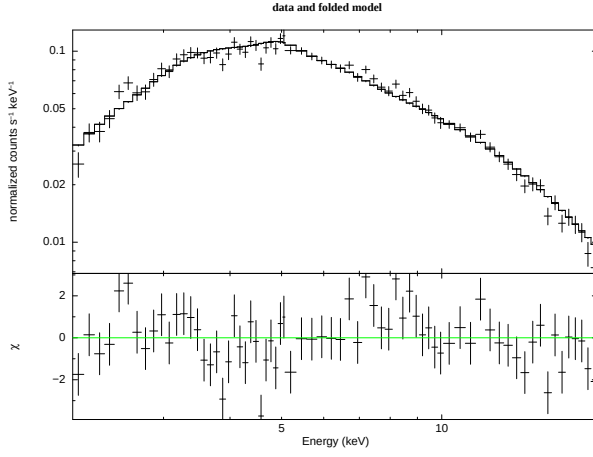


図 4.87: GX 304-1 55420-55430 bbody

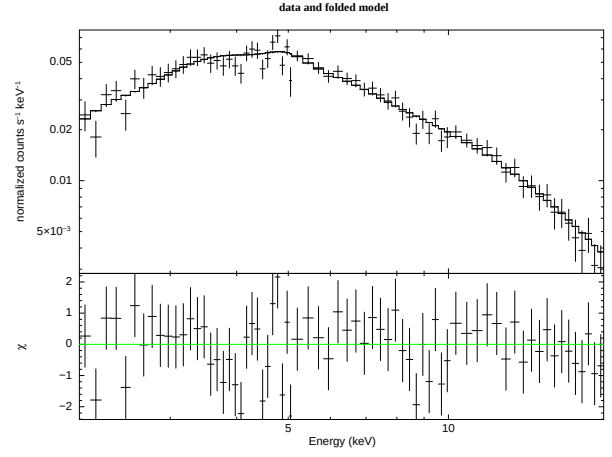


図 4.88: GX 304-1 55548-55563 bbody

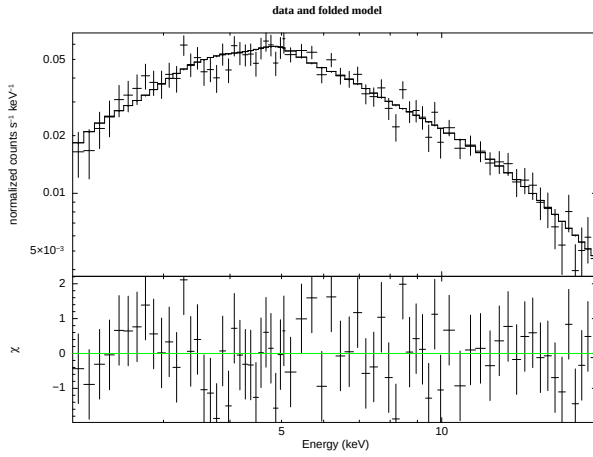


図 4.89: GX 304-1 55805-55818 bbody

期間 (MJD)	wabs	bbody		powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) ($10^{-9}\text{ergs/cm}^2/\text{s}$)
	N_H	kT	norm	Γ	norm		
55248-55275	18.5 ± 28.8	0.15 ± 0.0	32.5 ± 319.3	5.12 ± 6.71	13.2 ± 126.9	1.31	0.08
55420-55430	5.61 ± 0.49	0.15 ± 0.0	21.5 ± 6.26	1.48 ± 0.09	2.31 ± 0.56	1.74	19.6
55548-55563	5.51 ± 1.20	0.15 ± 0.0	15.4 ± 9.37	1.66 ± 0.21	1.54 ± 0.85	0.89	8.82

表 4.8: GX 304-1 の $wabs*(bbody+pow)$ のフィットパラメータ

4.7 フェーズ毎に足し合わせた解析

ここでは光度曲線や硬度比の変化が似ているものについてスペクトルを足し併せて解析をする。そのため1回のアウトバーストごとのスペクトルでは統計がよくなかった暗い天体についても解析を行う。ここでは wabs*powerlaw モデルと wabs*pcfabs*powerlaw モデルを用いて解析を行った。まず wabs*powerlaw モデルでフィッティングを行い、次に wabs*pcfabs*powerlaw モデルでのフィッティングの結果 χ^2_ν が改善された場合それをベストフィットとする。

4.7.1 A 0535+262

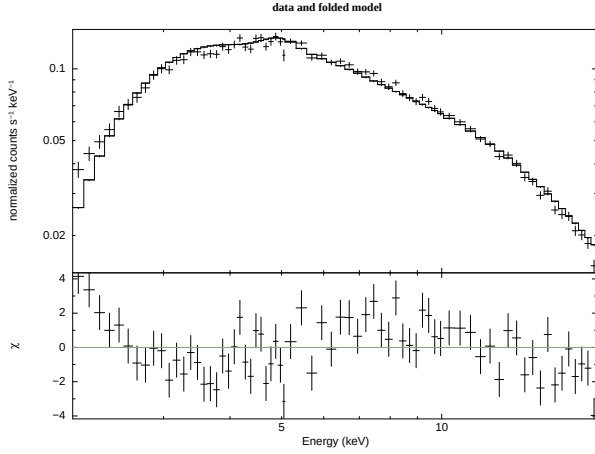


図 4.90: A0535+262 増光フェーズ

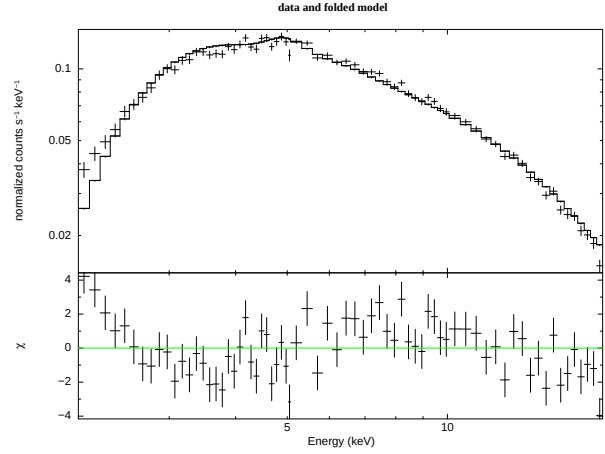


図 4.91: A0535+262 ピークフェーズ

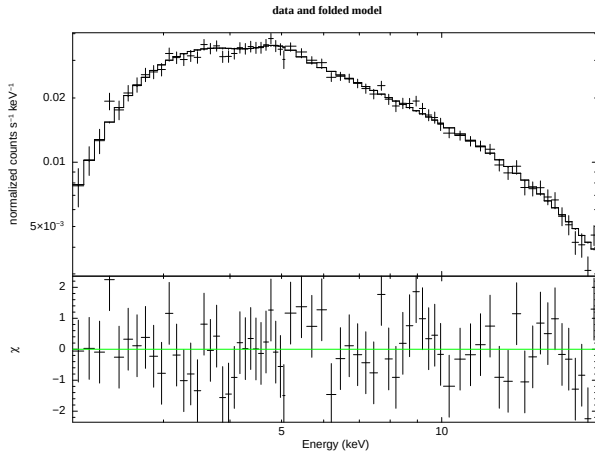


図 4.92: 減光フェーズ

期間 (MJD)	wabs	powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) (10^{-9} ergs/cm ² /s)
	N_H	Γ	norm		
増光フェーズ	2.43 ± 0.12	1.06 ± 0.01	1.23 ± 0.03	2.67	28.8
ピークフェーズ	2.43 ± 0.12	1.06 ± 0.01	1.23 ± 0.03	2.67	28.8
減光フェーズ	2.33 ± 0.21	1.20 ± 0.02	0.40 ± 0.02	0.85	6.83

表 4.9: A 0535+262 のフェーズ分け wabs*pow フィットのパラメータ

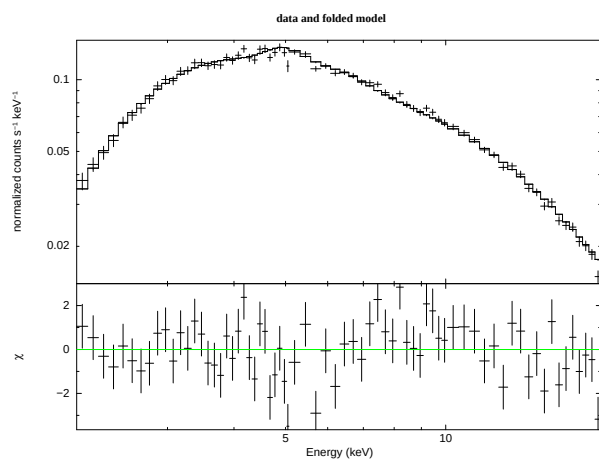


図 4.93: A 0535+262 増光フェーズ

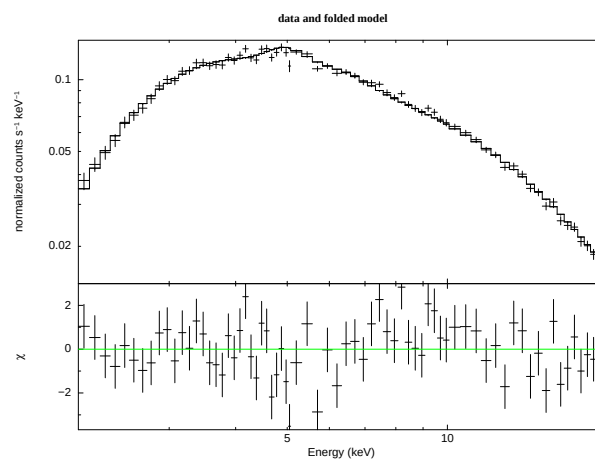


図 4.94: A 0535+262 ピークフェーズ

フェーズ	wabs N_H	pcfabs		powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) (10^{-9} ergs/cm ² /s)
	N_H	N_H	CvrFract	Γ	norm		
増光	0.39 ± 0.68	10.33 ± 2.48	0.55 ± 0.10	1.19 ± 0.03	1.74 ± 0.13	1.67	28.8
ピーク	0.27 ± 0.71	10.1 ± 2.32	0.56 ± 0.11	1.18 ± 0.03	1.73 ± 0.13	1.67	28.8

表 4.10: A 0535+262 のフェーズ分け wabs*pcfabs*pow フィットのパラメータ

4.7.2 GX 304-1

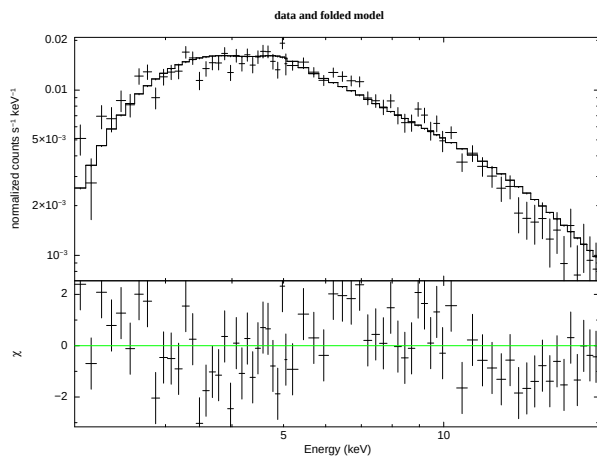


図 4.95: GX 304-1 増光フェーズ

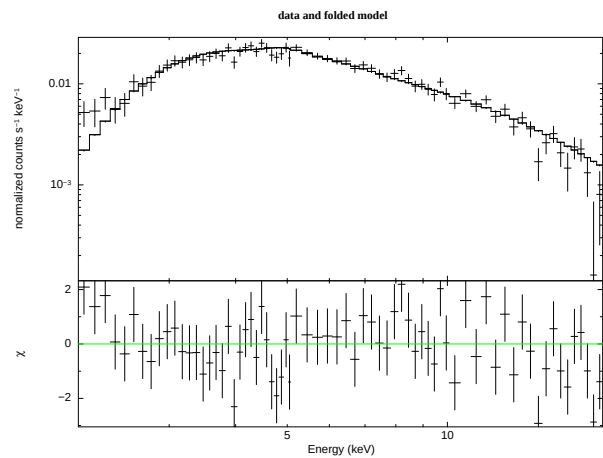


図 4.96: GX 304-1 吸収フェーズ

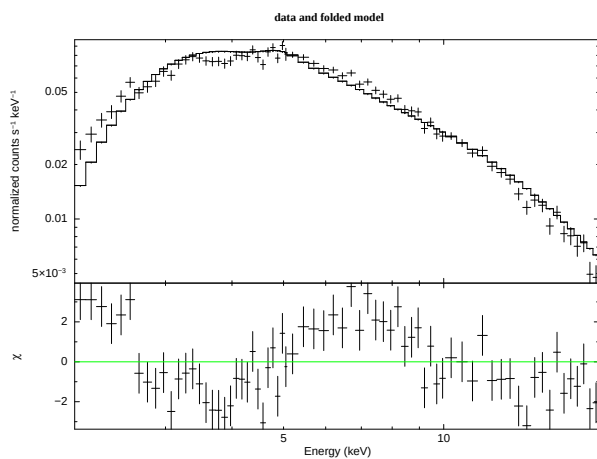


図 4.97: GX 304-1 ピークフェーズ

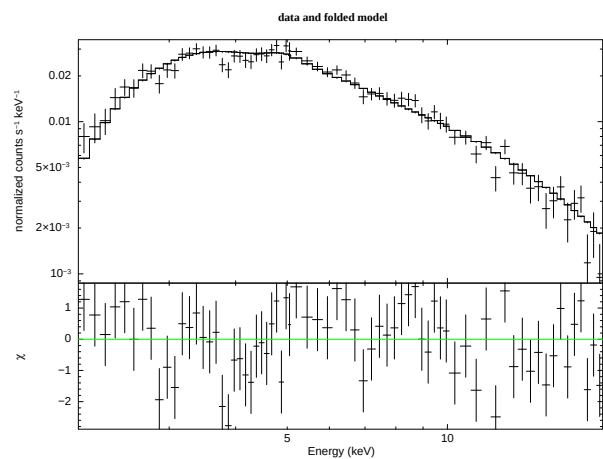


図 4.98: GX 304-1 減光フェーズ

フェーズ	wabs	powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) (10^{-9} ergs/cm ² /s)
	N_H	Γ	norm		
増光	4.59 ± 0.39	1.71 ± 0.05	0.47 ± 0.05	1.74	2.48
吸収	0.34 ± 0.17	0.74 ± 0.02	0.18 ± 0.01	3.32	3.71
ピーク	3.88 ± 0.19	1.53 ± 0.02	1.84 ± 0.09	3.29	14.4
減光	3.66 ± 0.35	1.62 ± 0.05	0.69 ± 0.07	1.21	4.54

表 4.11: GX 304-1 のフェーズ分け wabs*pow フィットのパラメータ

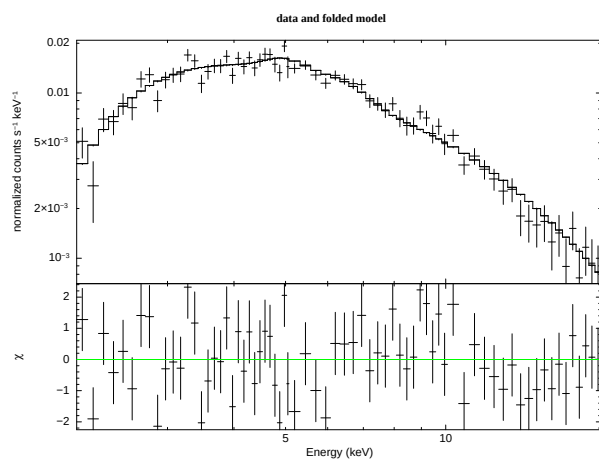


図 4.99: GX 304-1 増光フェーズ

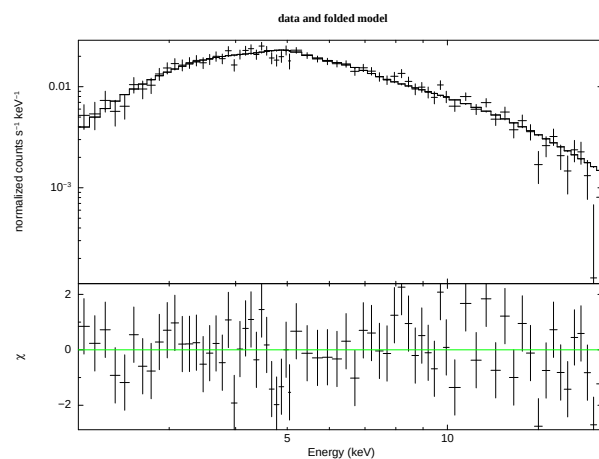


図 4.100: GX 304-1 吸収フェーズ

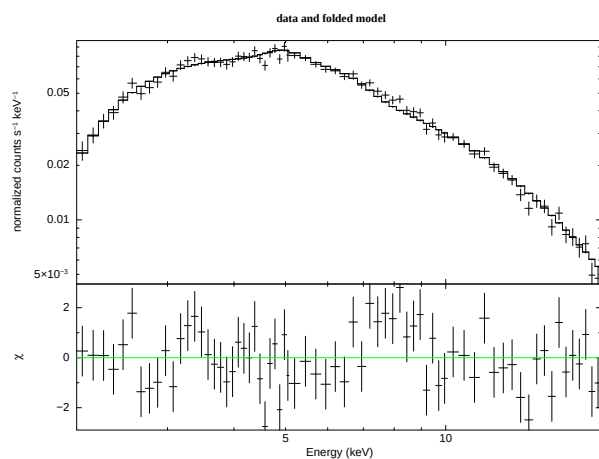


図 4.101: GX 304-1 ピークフェーズ

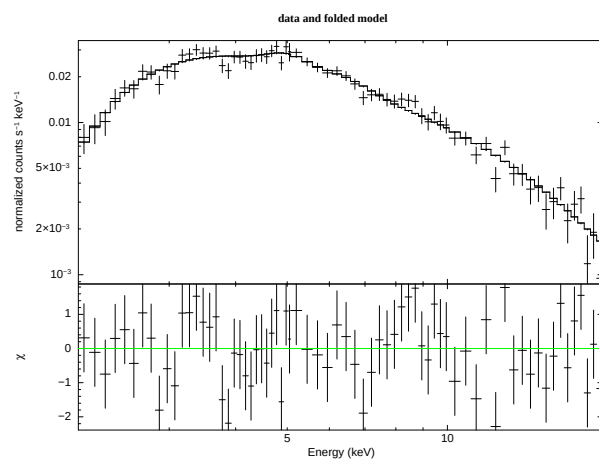


図 4.102: GX 304-1 減光フェーズ

フェーズ	wabs N_H	pcfabs		powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) (10^{-9} ergs/cm ² /s)
	N_H	N_H	CvrFract	Γ	norm		
増光	3.21 ± 0.86	25.07 ± 7.01	0.65 ± 0.05	2.19 ± 0.13	1.69 ± 0.60	1.28	2.43
吸収	1.52 ± 3.14	10.92 ± 2.97	0.78 ± 0.24	1.81 ± 0.10	1.00 ± 0.24	1.15	3.68
ピーク	1.96 ± 0.46	21.45 ± 3.20	0.67 ± 0.03	1.94 ± 0.06	5.54 ± 0.89	1.39	14.3
減光	2.48 ± 1.02	18.08 ± 8.90	0.52 ± 0.09	1.90 ± 0.12	1.45 ± 0.47	1.02	4.47

表 4.12: GX 304-1 のフェーズ分け wabs*pcfabs*pow フィットのパラメータ

4.7.3 GRO J1008-57

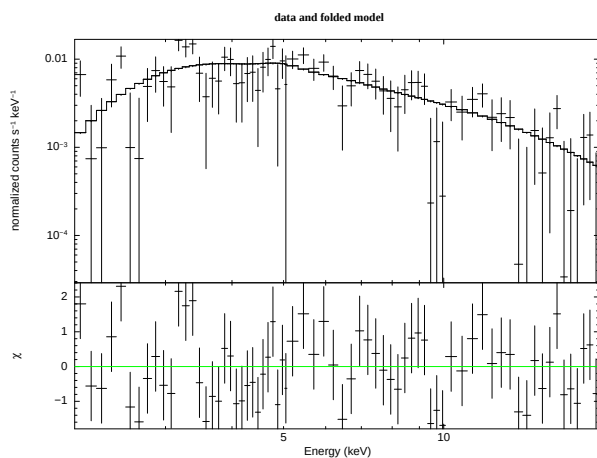


図 4.103: GRO J1008-57 増光フェーズ

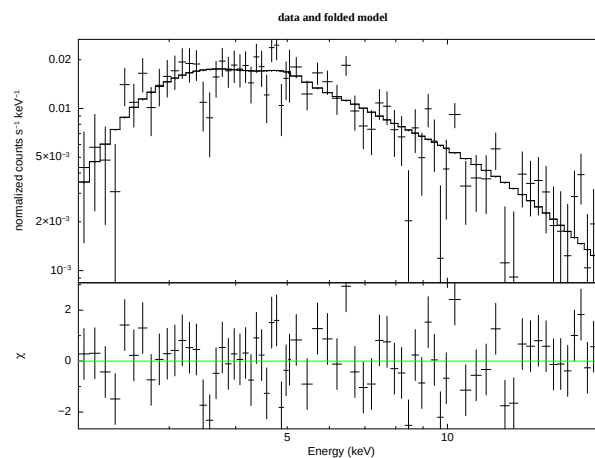


図 4.104: GRO J1008-57 ピークフェーズ

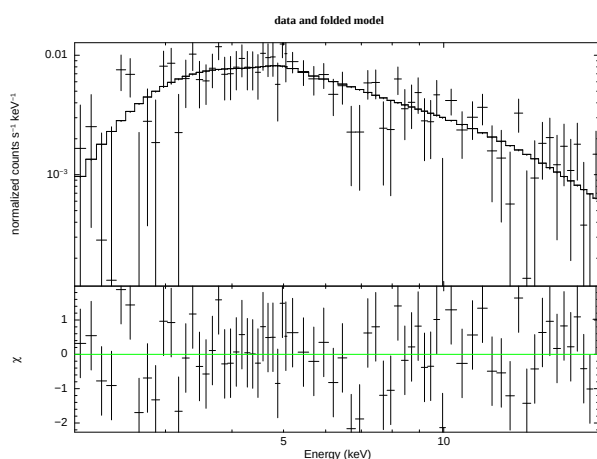


図 4.105: GRO J1008-57 減光フェーズ

GRO J1008-57 は部分吸収を考慮しても改善されなかった。

フェーズ	wabs	powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) ($10^{-9}\text{ergs/cm}^2/\text{s}$)
	N_H	Γ	norm		
増光	4.26 ± 1.66	1.58 ± 0.22	0.20 ± 0.10	1.06	1.40
ピーク	3.56 ± 0.92	1.60 ± 0.13	0.38 ± 0.10	1.22	2.62
減光	5.35 ± 1.73	1.55 ± 0.19	0.18 ± 0.08	0.96	1.33

表 4.13: GRO J1008-57 のフェーズ分け wabs*pow フィットのパラメータ

4.7.4 LS V +44 17

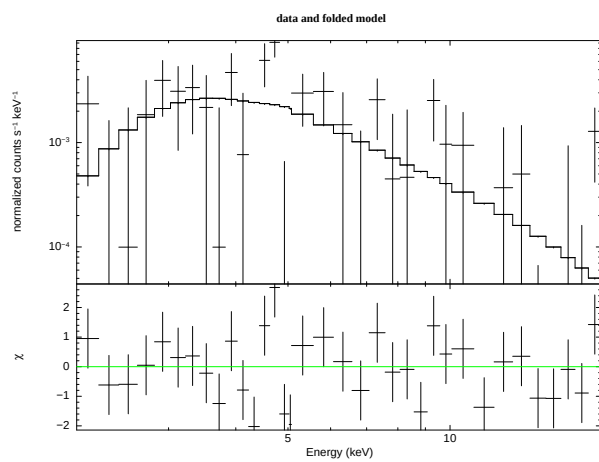
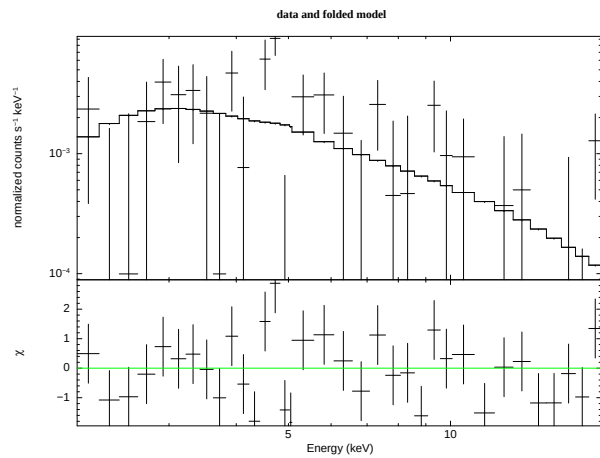


図 4.106: LS V +44 17 増光フェーズ

図 4.107: LS V +44 17 増光フェーズ (N_H 0 で固定)

フェーズ	wabs	powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) ($10^{-9}\text{ergs/cm}^2/\text{s}$)
	N_H	Γ	norm		
増光	6.53 ± 7.67	2.61 ± 1.47	0.45 ± 1.21	1.27	0.35
	0 で固定	1.58 ± 0.53	0.05 ± 0.04	1.27	0.44

表 4.14: LS V+44 17 のフェーズ分け wabs*pow フィットのパラメータ

4.7.5 V 0332+53

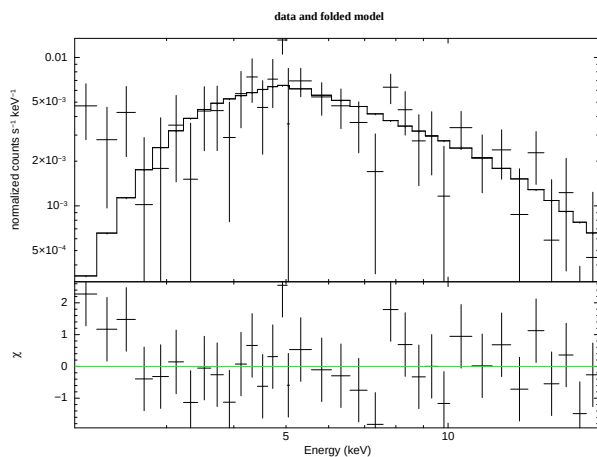


図 4.108: V 0332+53 増光フェーズ

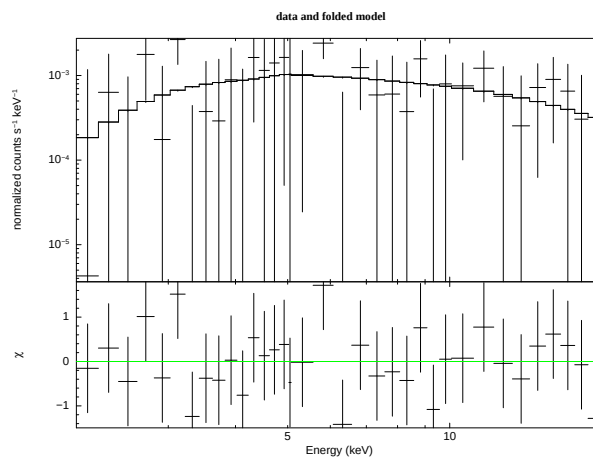


図 4.109: V 0332+53 ピークフェーズ

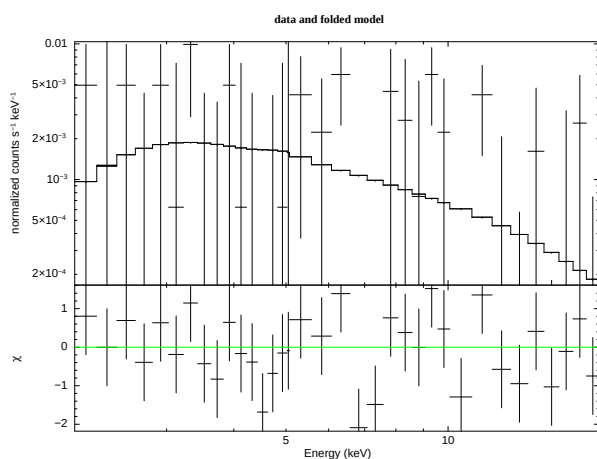


図 4.110: V 0332+53 減光フェーズ

期間 (MJD)	wabs	powerlaw		χ^2_ν	flux(2-20keV) (10^{-9} ergs/cm ² /s)
	N_H	Γ	norm		
増光フェーズ	9.78 ± 3.91	1.58 ± 0.33	0.18 ± 0.14	1.08	1.14
ピークフェーズ	2.14 ± 9.11	0.56 ± 0.80	0.0 ± 0.01	0.54	0.32
減光フェーズ	0.0 ± 29.7	1.23 ± 2.63	0.02 ± 0.10	0.85	0.31

表 4.15: V 0332+53 のフェーズ分け wabs*pow フィットのパラメータ

4.7.6 XTE J1946+274

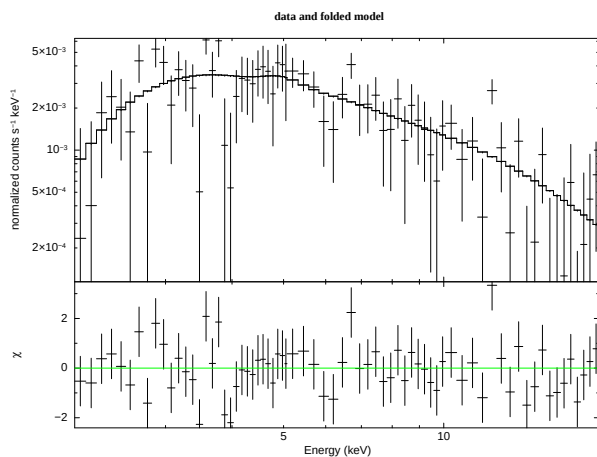


図 4.111: XTE J1946+274 増光フェーズ

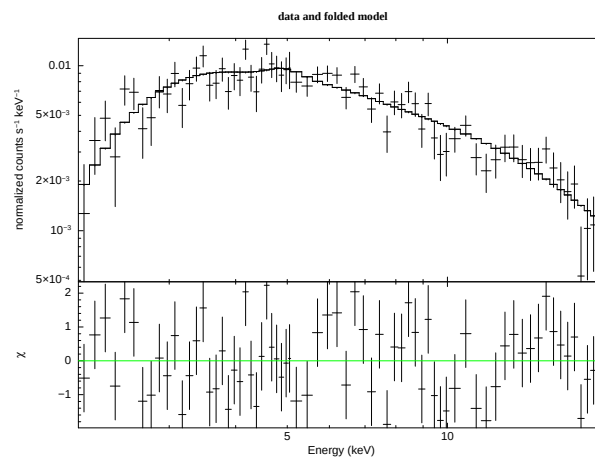


図 4.112: XTE J1946+274 ピークフェーズ

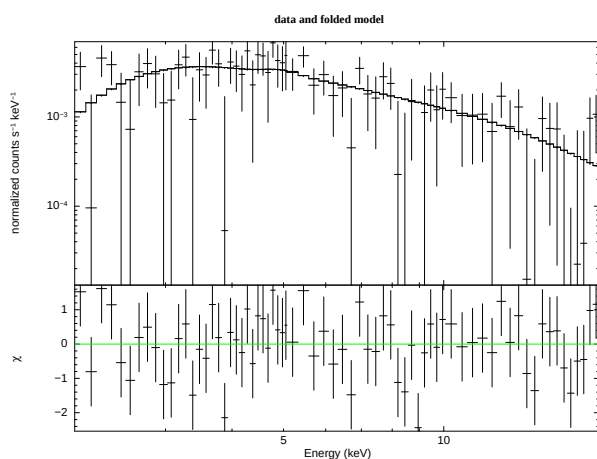


図 4.113: XTE J1946+274 減光フェーズ

フェーズ	wabs	powerlaw		χ^2_ν	flux ($10^{-9}\text{ergs/cm}^2/\text{s}$)
	N_H	Γ	norm		
増光	2.36 ± 1.52	1.37 ± 0.21	0.05 ± 0.02	1.04	0.59
ピーク	2.52 ± 0.67	1.16 ± 0.08	0.10 ± 0.02	1.19	1.92
減光	1.50 ± 1.86	1.38 ± 0.28	0.05 ± 0.03	0.82	0.58

表 4.16: XTE J1946+274 のフェーズ分け wabs*pow フィットのパラメータ

4.8 ピーク光度と増光の傾きの相関

Be 型 X 線連星パルサーのアウトバーストの増光、減光するときの変化率がアウトバーストのピーク Flux との関係があるのかどうかを調べた。

4.8.1 直線でのフィット

傾きを調べるためまず光度曲線上でのアウトバーストの傾きを直線でフィットする。

光度曲線の傾き ($\text{count}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{day}$) とそのアウトバーストのピークカウントレート ($\text{count}/\text{cm}^2/\text{s}$) を黒を増光、赤を減光として以下に示す。

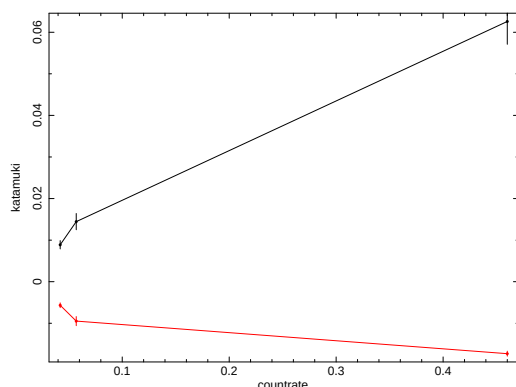


図 4.114: 4U 0115+634 の光度曲線の傾きとピーク Flux

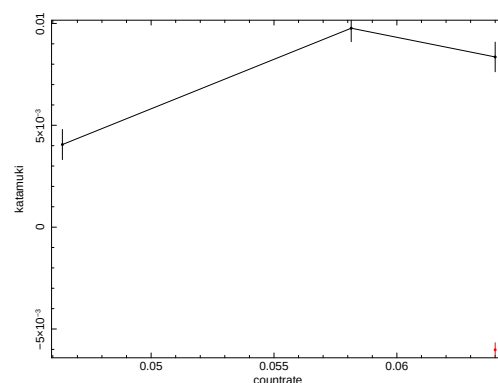


図 4.115: V 0332+53 の光度曲線の傾きとピーク Flux

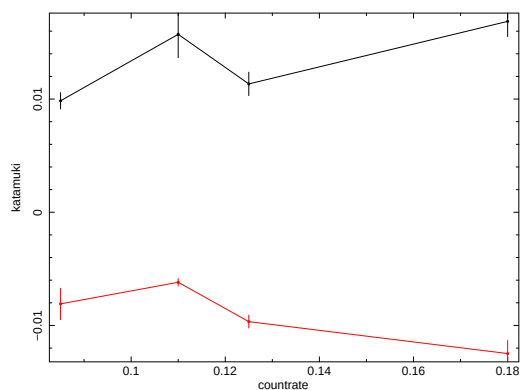


図 4.116: GRO J1008-57 の光度曲線の傾きとピーク Flux

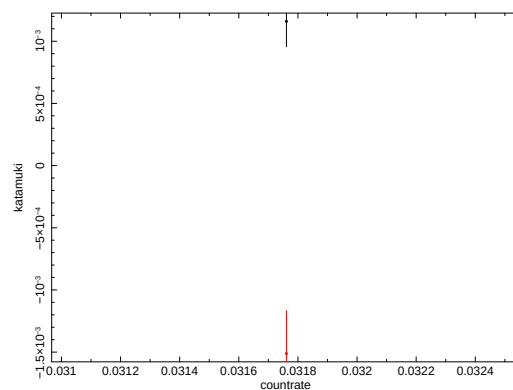


図 4.117: IGR J13020-6359 の光度曲線の傾きとピーク Flux

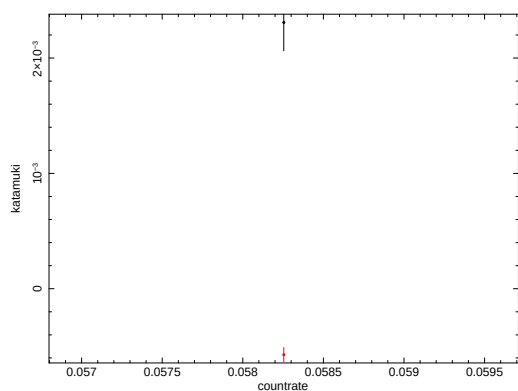


図 4.118: MAXI J1409-619 の光度曲線の傾きとピーク Flux

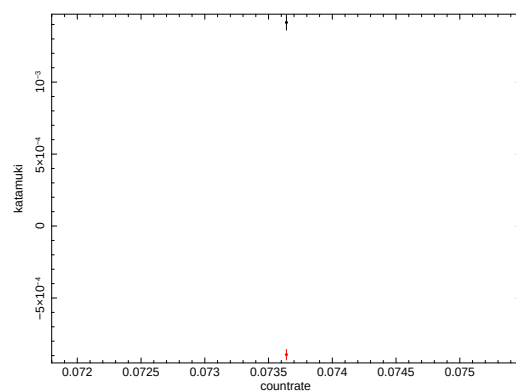


図 4.119: 2S 1417-624 の光度曲線の傾きとピーク Flux

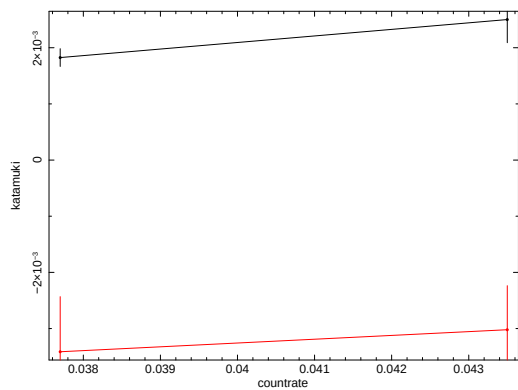


図 4.120: XTE J1858+034 の光度曲線の傾きとピーク Flux

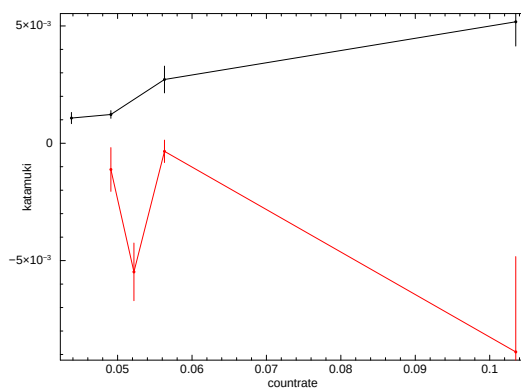


図 4.121: XTE J1946+274 の光度曲線の傾きとピーク Flux

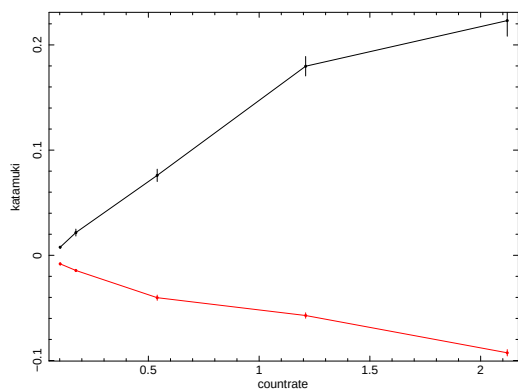


図 4.122: A 0535+262 の光度曲線の傾きとピーク Flux

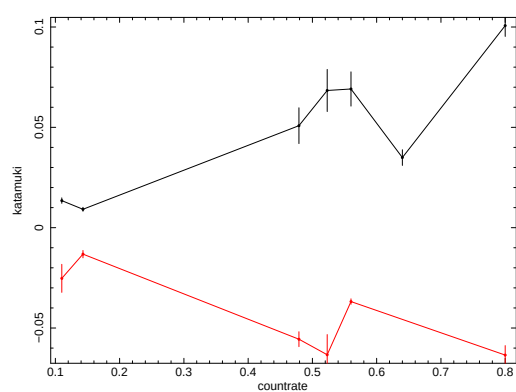


図 4.123: GX 304-1 の光度曲線の傾きとピーク Flux

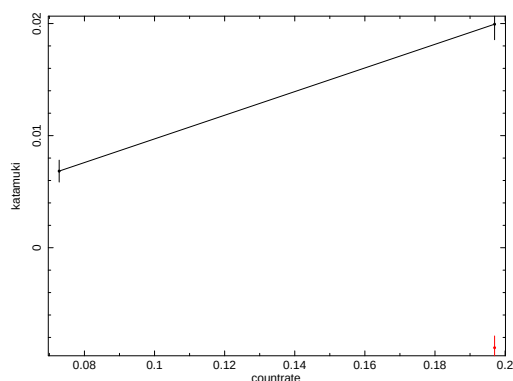


図 4.124: LS V+44 17 の光度曲線の傾きとピーク Flux

アウトバーストのピーク Flux と傾きは一部天体をのぞき増光、減光ともに比例の関係にあるように見える。GRO J1008-57、XTE J1858+034 については増光、減光が比例せず図上で並行に変動しているように見える。

全天体について各アウトバーストでの傾きを横軸に増光、縦軸に減光としてとりまとめたものを図 4.125 に示す。このデータにフィットをした直線を図 4.126 に示した。対角線より増光側によっていることがわかる。減光の傾きに比べ増光の傾きの方が大きいことがわかる。

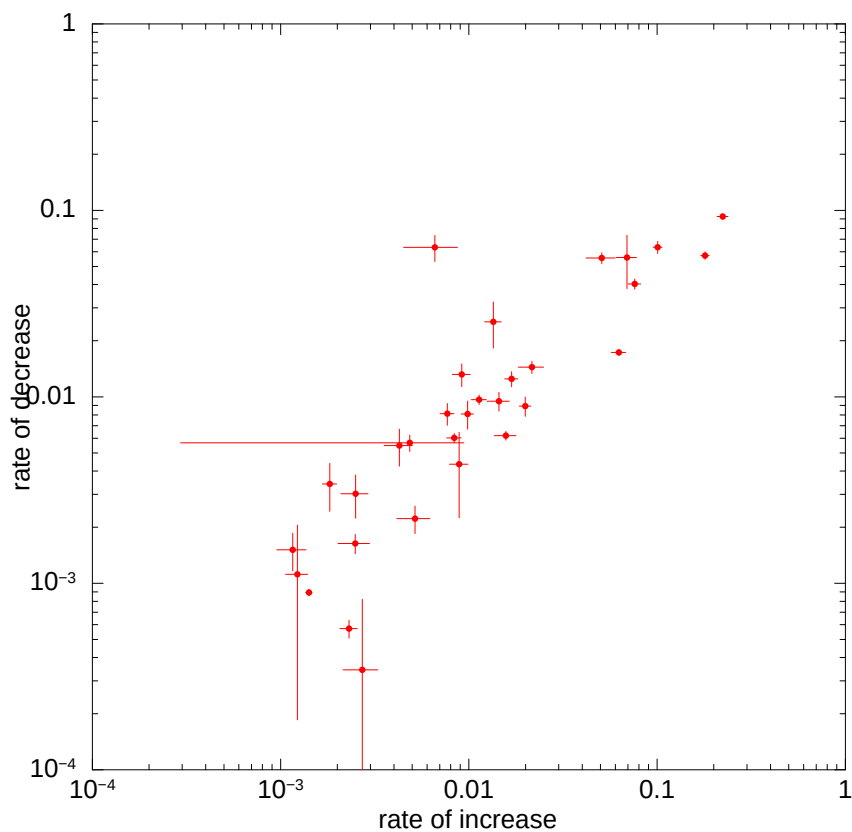


図 4.125: 増光と減光の傾き

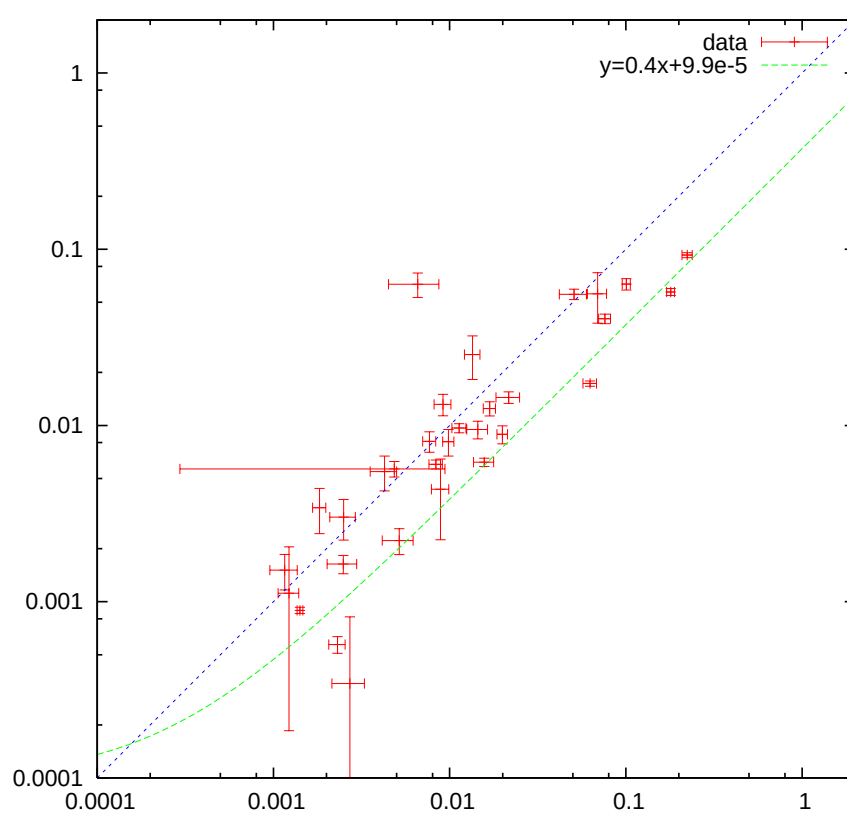


図 4.126: 増光と減光の傾きを直線でフィットした図。対角線より下側に分布していることがわかる。

4.9 ノーマライズした光度曲線でのアウトバーストの比較

次に各天体のアウトバーストの傾きの様子を比較するためにピークの明るさを同じ値にリスケールし、ライトカーブを畳み込み傾きを比べる。比較結果を図 4.127-4.140 に示す。

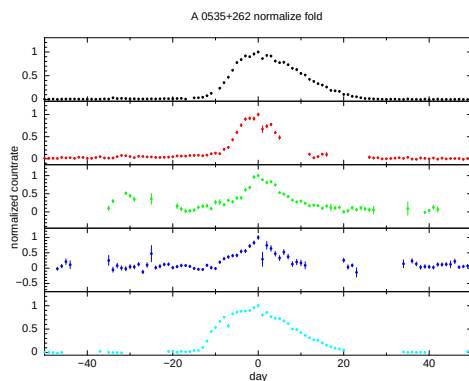


図 4.127: A 0535+262 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

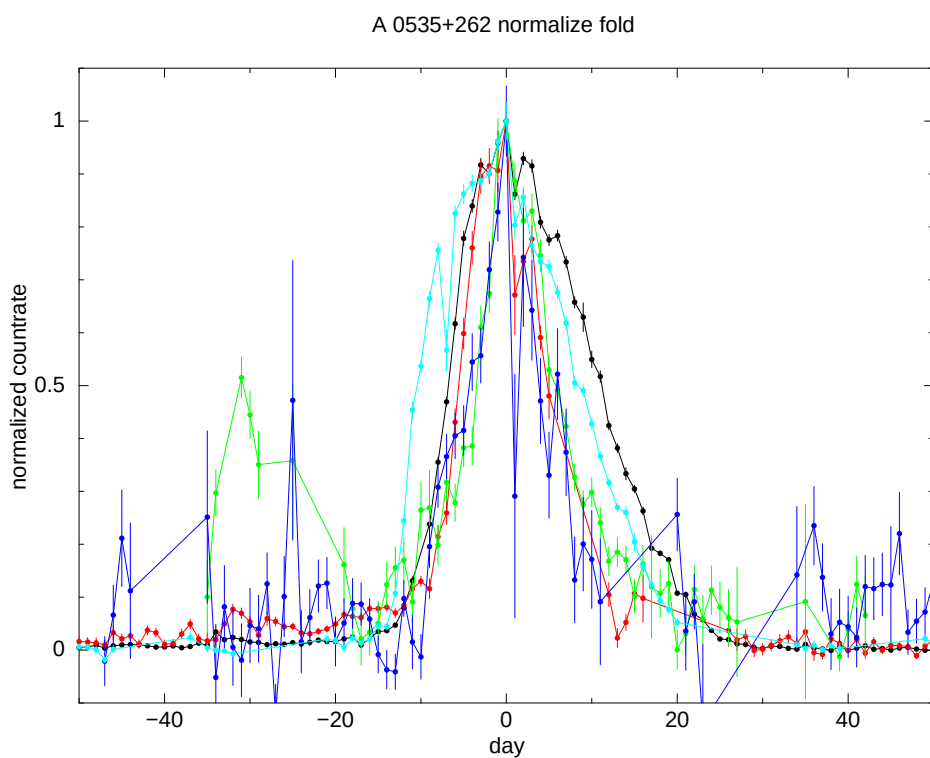


図 4.128: A 0535+262 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

A 0535+262 のアウトバーストのライトカーブはノーマルアウトバーストに比べジャイアントアウトバーストのピーク付近は丸くなっている。そのためアウトバーストのライトカーブの大きさを合わせて重ね合わせると形に違いがあることがわかる。

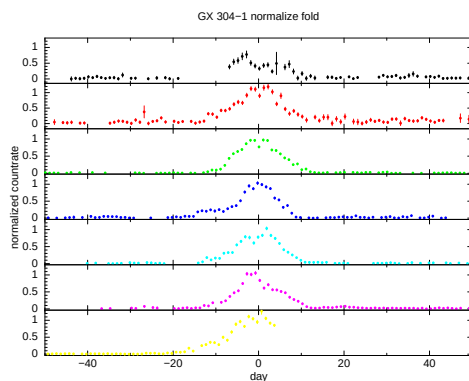


図 4.129: GX 304-1 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

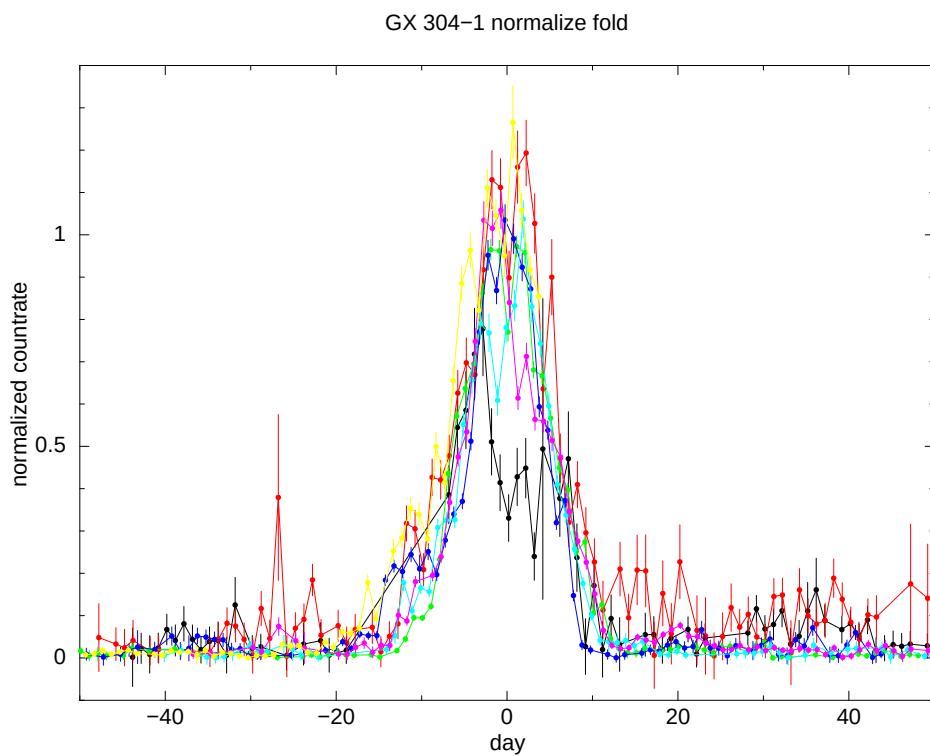


図 4.130: GX 304-1 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

GX 304-1 のアウトバーストのライトカーブはへこみがあるためガウス関数でのフィッティングでのピークの明るさを擬似的に求め、その値を使い大きさを合わせてライトカーブを重ね合わせた。GX 304-1 のアウトバーストは光度曲線を軌道周期で畳み込むとピーク位置の吸収のためピーク位置がずれて見える。しかしアウトバースト時の形をガウス関数でノーマライズをすることにより相似な形でアウトバーストが起こっていることがわかる。

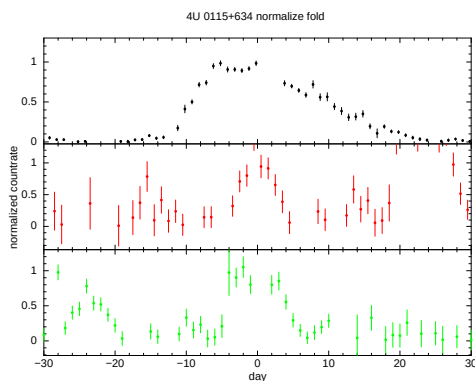


図 4.131: 4U 0115+634 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

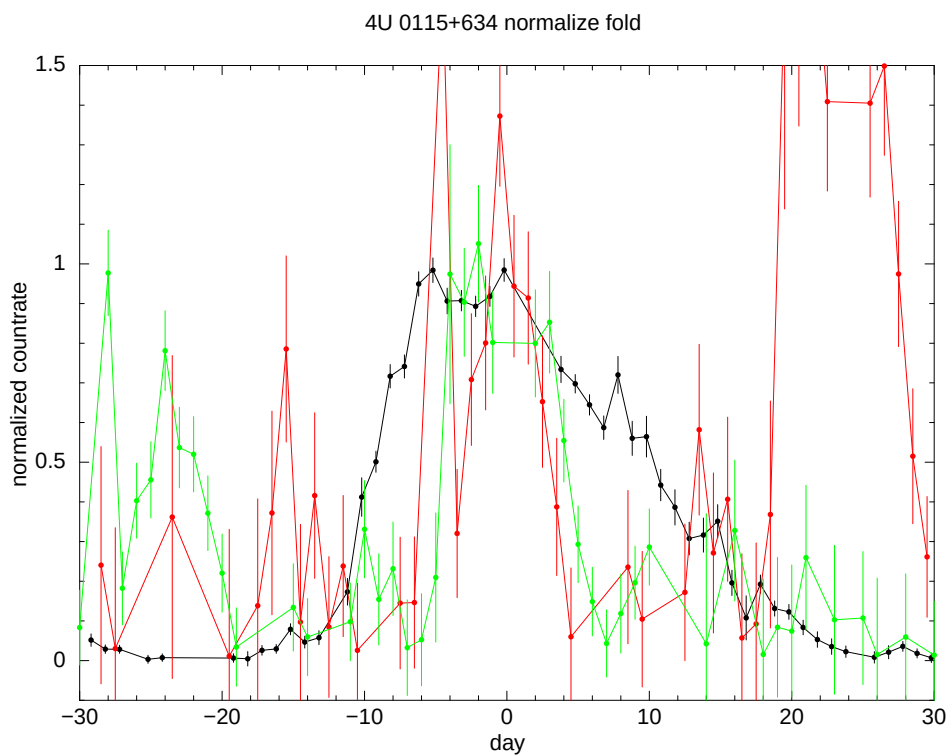


図 4.132: 4U 0115+634 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

4U 0115+634 のアウトバーストの光度曲線は MAXI で 1 回目に観測したものは軌道周期 3 周分の期間で増光している。そのあとにつづく 2 回のアウトバーストは 1 回目ほど明るくなく、1 周期分の期間での増光をしている。

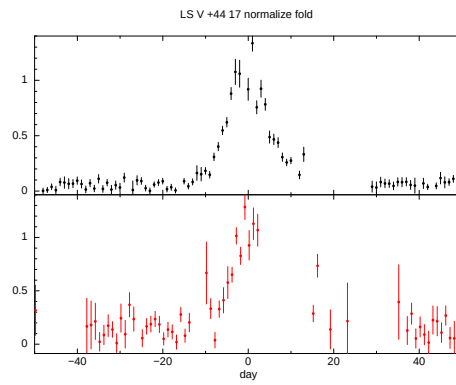


図 4.133: LS V +44 17 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

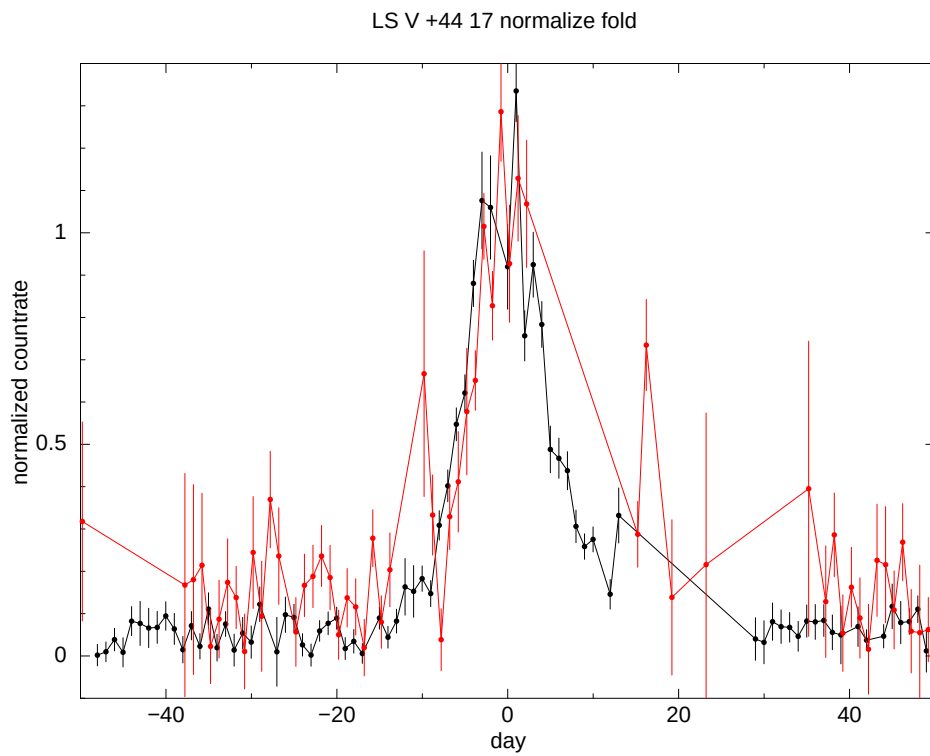


図 4.134: LS V +44 17 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

LS V+44 17 のアウトバーストの光度曲線ではアウトバーストの増光のフェーズでの傾きがよく似ているように見える。

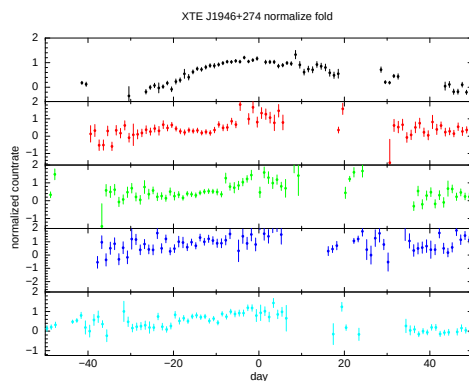


図 4.135: XTE J1946+274 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

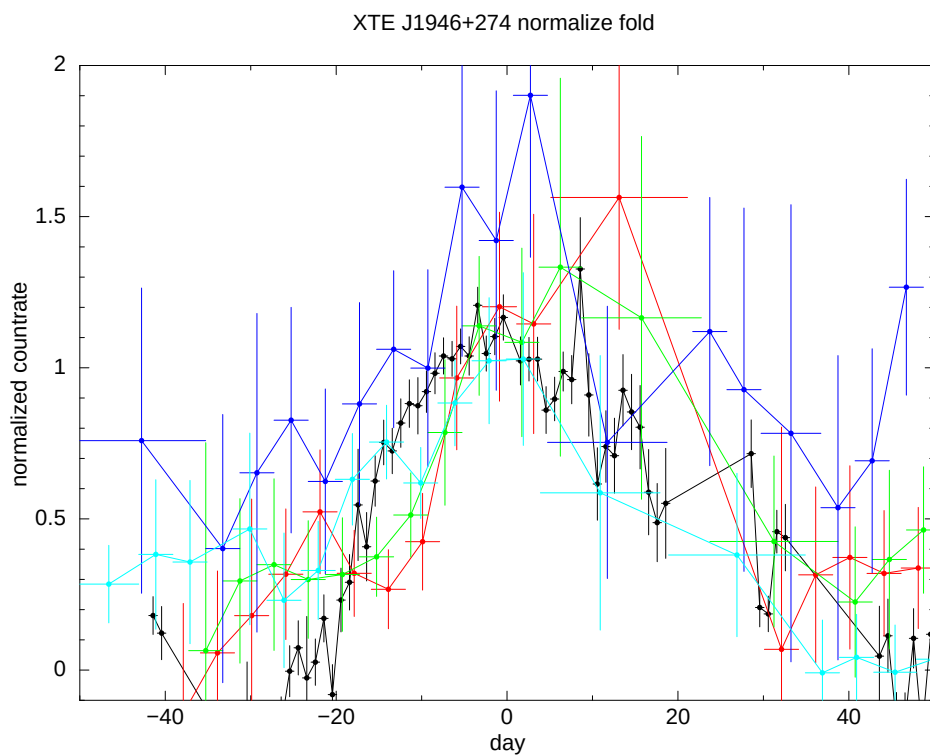


図 4.136: XTE J1946+274 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

MAXIで2回目以降に観測したアウトバーストは引きのばしたときエラーが大きくなったためビンまとめを行った。XTE J1946+274のアウトバーストの光度曲線はMAXIで1回目に観測したもののだけガウス関数のような変動をしている。MAXIで観測したその他のアウトバーストは1回目ほど明るくなくガウス関数のようなかたちをしていない。2回目のアウトバーストはピークの明るさを迎える前に一度暗くなっていることがわかる。

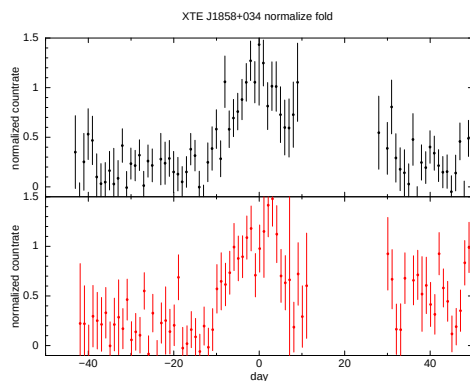


図 4.137: XTE J1858+034 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

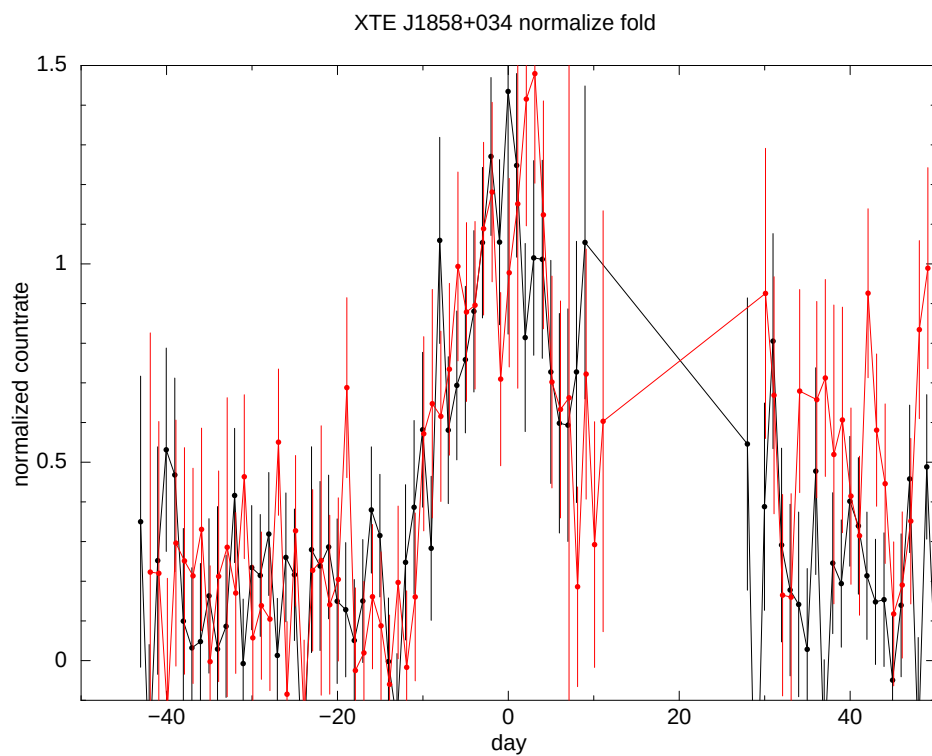


図 4.138: XTE J1858+034 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

XTE J1858+034 のアウトバーストの光度曲線は増光の前に一度ゆるやかに減光している。アウトバースト全体の時間変動が MAXI での 2 回の観測でよく似ている。

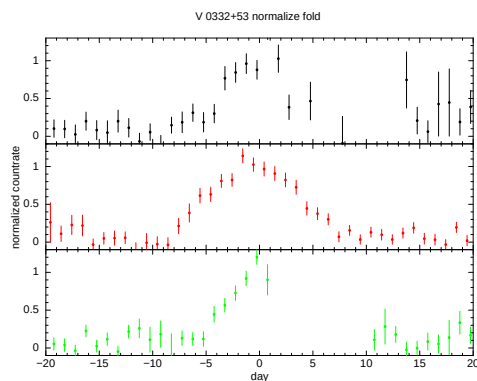


図 4.139: V 0332+53 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

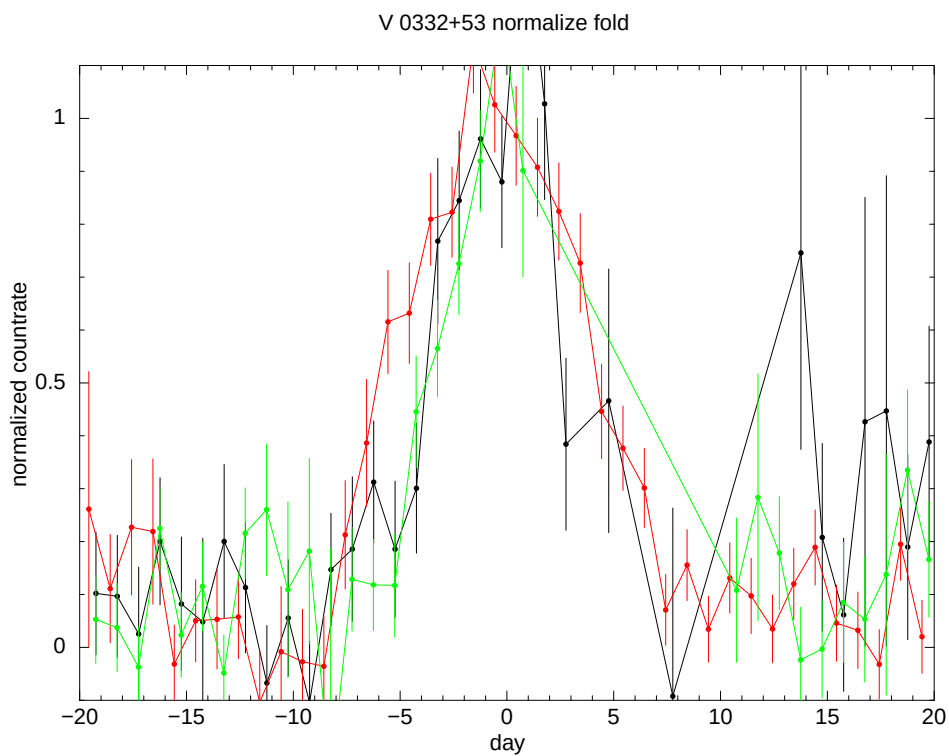


図 4.140: V 0332+53 のアウトバーストのピークを合わせて畳み込んだ光度曲線

V 0332+53 のアウトバーストの光度曲線では MAXI で 2 回目に観測したアウトバーストの増光がほかの 2 回に比べて早い時期にはじまっているように見える。

4.10 ガウス関数での近似

アウトバーストの傾きをを単に直線で考えると A 0535+262 のアウトバーストのようなピーク付近で円みを帯びた光度曲線を描くものではあわせられない。そこでまずアウトバースト全体の光度曲線をガウス関数

$$\text{ガウス関数} = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.11)$$

でフィッティングを行い半値幅、($FWHM = 2.355\sigma$: Full Width at Half Maximum) を求めアウトバーストピークでの Flux と FWHM を比較する。図 4.141~4.147 に結果を示す。アウトバーストのガウス関数フィットの図は付録に示す。

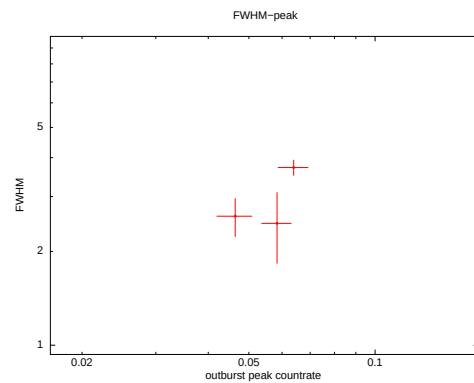
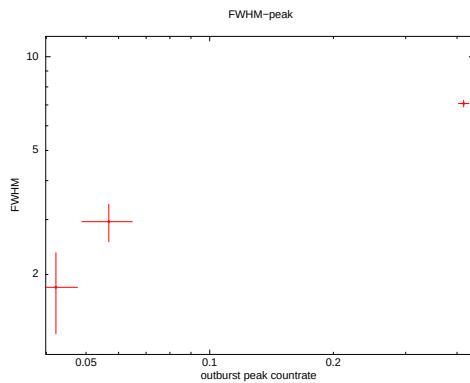


図 4.141: 4U 0115+634 のアウトバーストの半値幅とピークの明るさの図。右側のプロットは 3 軌道周期 3 周分の期間で起こったアウトバースト。は 2 ~ 3 に一定に分布しているように見える。比例関係があるように見える。

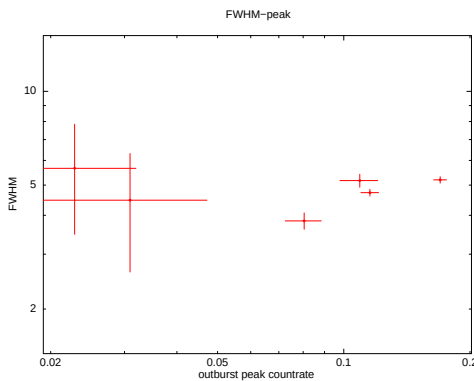
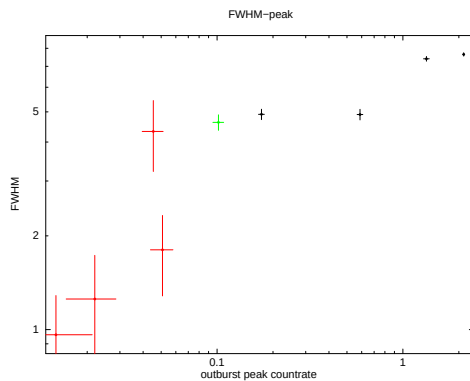


図 4.143: A 0535+262 のアウトバーストの半値幅とピークの明るさの図。ピーク Flux が高い方から 4 つ (黒) がジャイアントアウトバースト、明るさが 0.1 より小さいものがプリカーサ (赤)、他はノーマルアウトバースト (緑) である。ジャイアントアウトバーストはノーマルアウトバーストに比べて FWHM が大きいことがわかる。

図 4.144: GRO J1008-57 のアウトバーストの半値幅とピークの明るさの図。FWHM5 のあたりで一定の分布をとっていることがわかる。

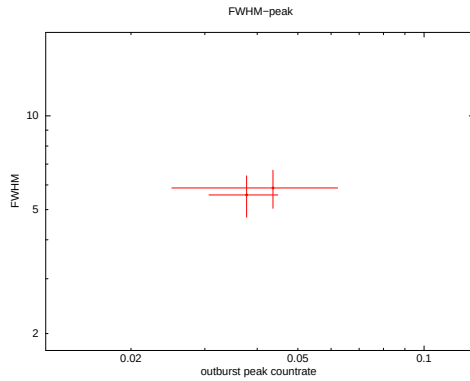


図 4.145: XTE J1858+034 のアウトバーストの半値幅とピークの明るさの図。FWHM5のあたりで一定の分布をとっていることがわかる。

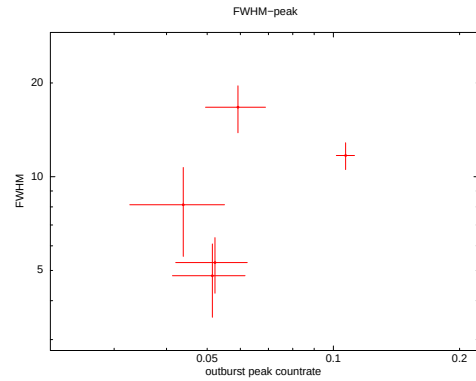


図 4.146: XTE J1946+274 のアウトバーストの半値幅とピークの明るさの図。ピーク Flux が 0.1 にあるアウトバーストはジャイアントアウトバーストのようなガウス関数型の光度曲線を示す。全体にひろがった分布をしていることがわかる。

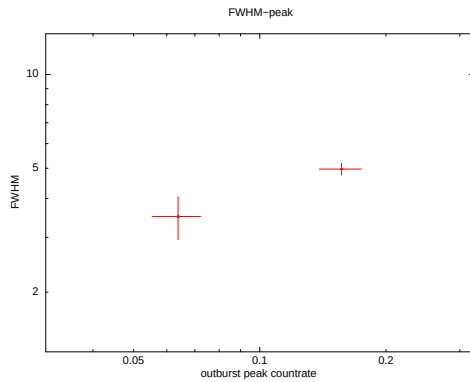


図 4.147: LS V+44 17 のアウトバーストの半値幅とピークの明るさの図。2 回のアウトバーストでピーク Flux の差があるが、FWHM は 4 前後の値で一定の分布をしている。

第5章 議論

5.1 スペクトル解析

前章で行ったスペクトル解析で得られた各天体のパラメータのうち wabs の N_H と powerlaw のべきについての時間的変動を以下にまとめる。フェーズ毎に解析をしたものは増光フェーズを1、ピークフェーズを2、減光フェーズを3としてある。GX 304-1 のフェーズ毎の解析のみ1を増光フェーズ、2を吸収フェーズ、3をピークフェーズ、4を減光フェーズとしてある。

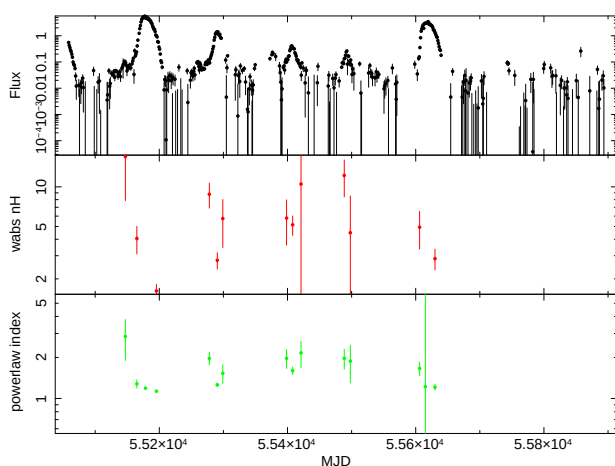


図 5.1: A 0535+262 wabs の光度曲線 (上) と nH(中) と powerlaw のべき (下) の変化

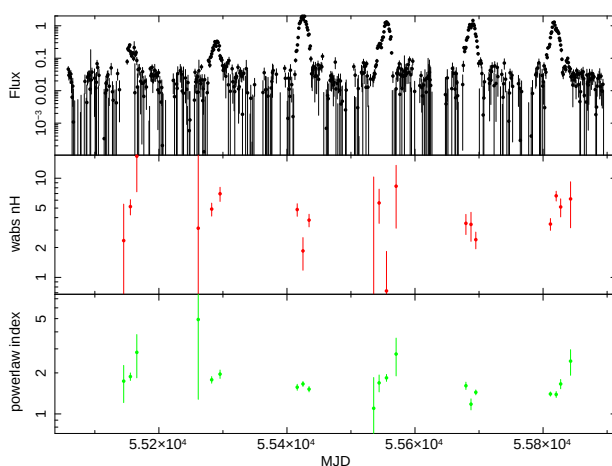


図 5.2: GX 304-1 wabs の光度曲線 (上) と nH(上) と powerlaw のべき (下) の変化

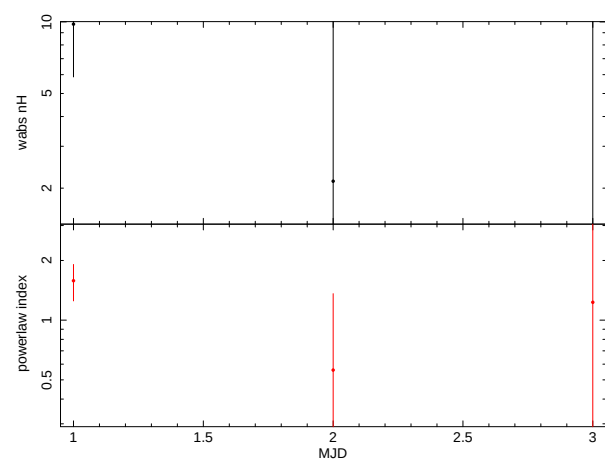


図 5.3: V 0332+53 のフェーズ毎の wabs の nH(上) と powerlaw のべき (下) の変化

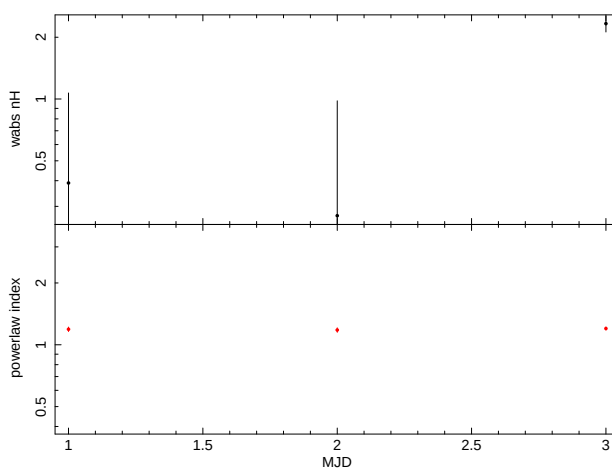


図 5.4: A 0535+262 のフェーズ毎の wabs の nH(上) と powerlaw のべき (下) の変化

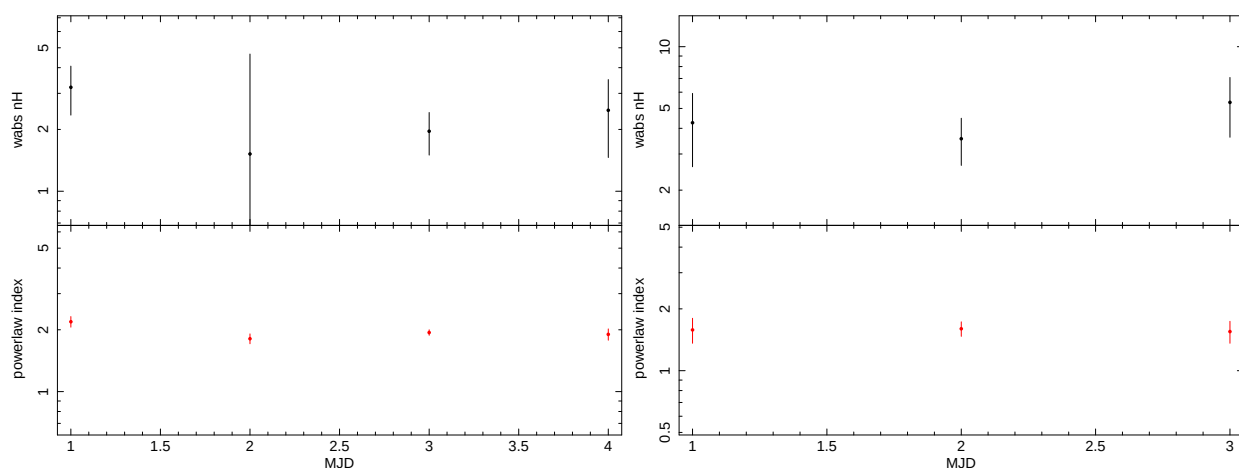


図 5.5: GX 304-1 のフェーズ毎の $wabs$ の nH (上) と powerlaw のべき (下) の変化

図 5.6: GRO J1008-57 のフェーズ毎の $wabs$ の nH (上) と powerlaw のべき (下) の変化

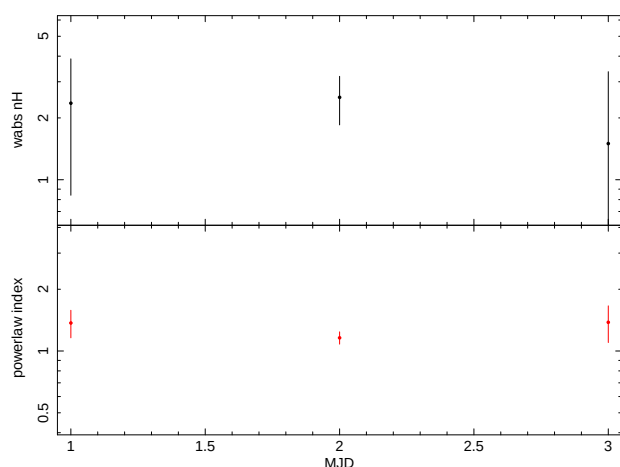


図 5.7: XTE J1946+274 のフェーズ毎の $wabs$ の nH (上) と powerlaw のべき (下) の変化

ピークフェーズでは nH の値が増光、減光のフェーズのときより小さい値をとっていることがわかる。powerlaw の Γ は V 0332+53 の増光フェーズで小さくなっている。他の天体ではほぼ一定の値をとっているようにみえる。

5.2 光度曲線の傾き解析

5.2.1 FWHM とピーク Flux

アウトバーストのときの光度曲線をガウス関数にフィットしたときの FWHM とアウトバーストのピーク Flux を全天体でまとめたものを以下の図 5.8 に示す。

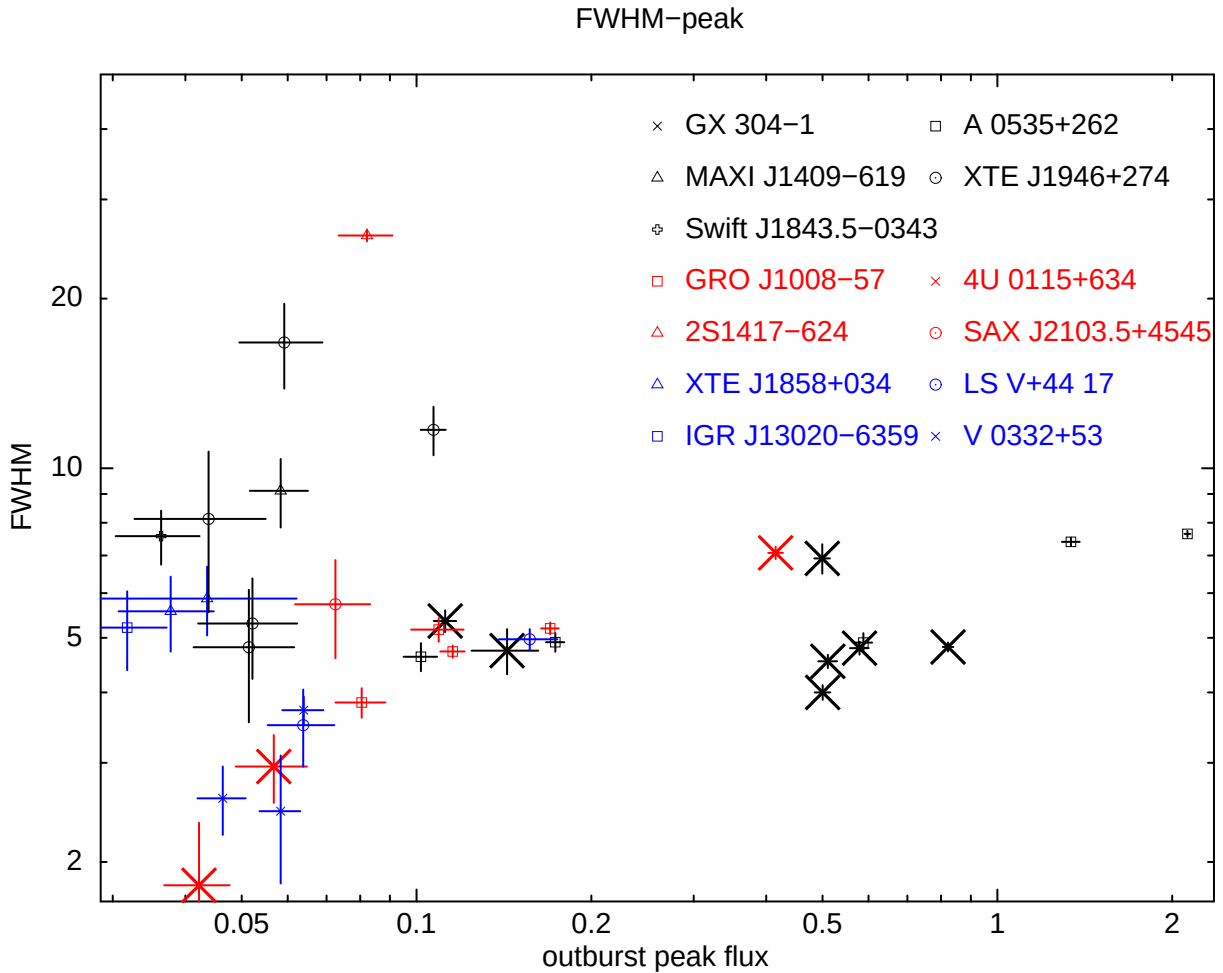


図 5.8: FWHM とピーク Flux

左上に分布しているのは長い時間をかけてアウトバーストを起こす天体である。FWHM が 5 日のあたりに直線状に分布しているように見える。また光度が低いと傾き 36.0 の直線分布になっているように見える。A 0535+262 でのジャイアントアウトバーストのときや 4U 0115+634 の 3 周期分の大アウトバーストのときでは FWHM は大きくなり 5 日の分布から外れてくる。MAXI で 7 回目に観測された GX 304-1 のアウトバーストも FWHM が大きくなっているが、これはアウトバーストの収束までの全データがそろっていないため確かな結果ではない。FWHM の分布をヒストグラムにまとめたものを図 5.9 に示す。

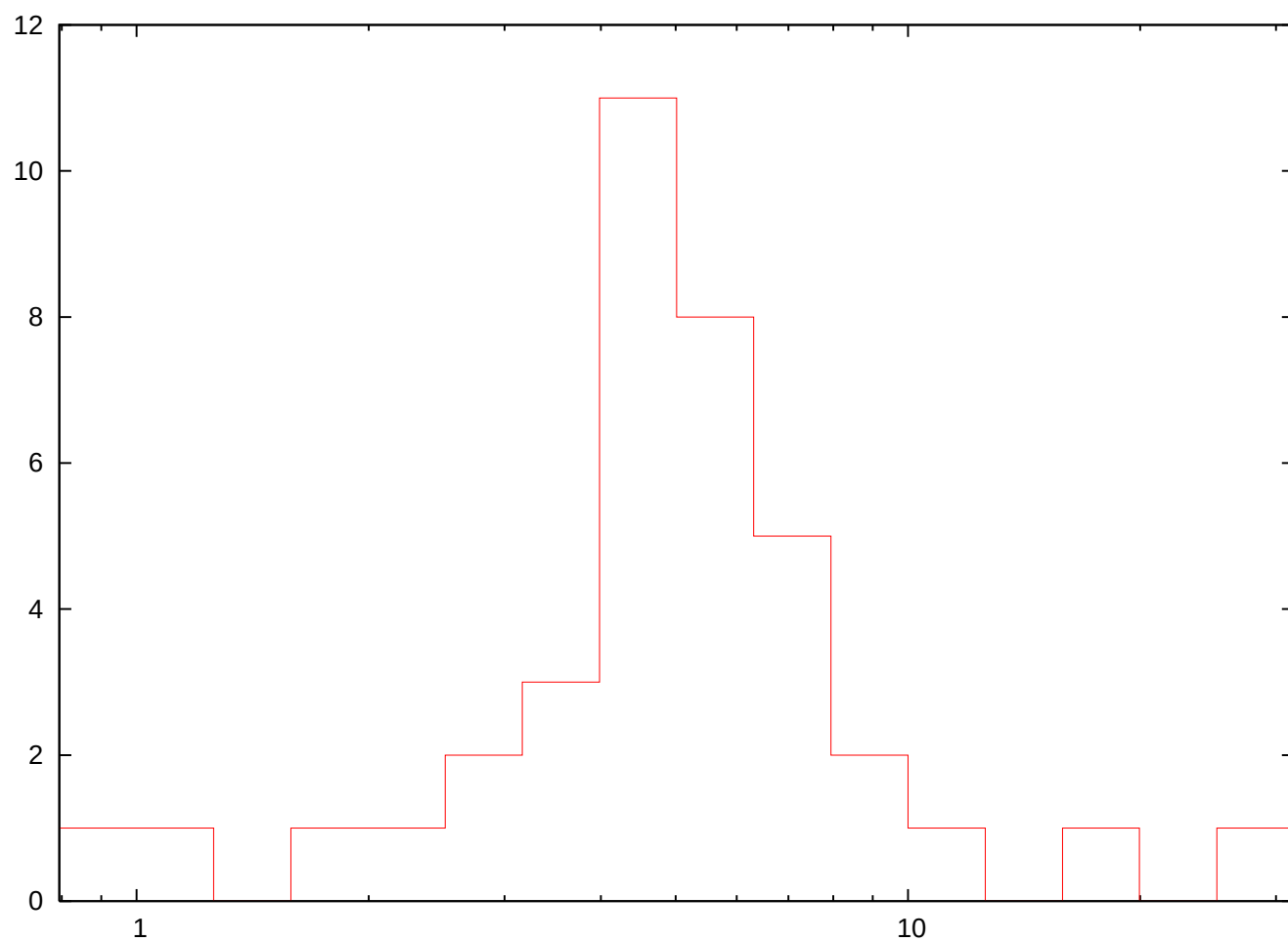


図 5.9: FWHM のヒストグラム。4から5日に多く分布していることがわかる。7日のあたりの分布は A 0535+262 のジャイアントアウトバーストや 4U 0115+634 の軌道周期 3 周分のアウトバーストが含まれる。

5.2.2 FWHMと他のパラメータとの比較

ここでは前項で求めたアウトバーストのFWHMをBe型X線連星パルサーの持つ他のパラメータと比較して調べる。比較するパラメータは表4.1から離心率、軌道周期、スペクトル型を使う。またこれらのパラメータから新たに中性子星の軌道の長半径、近星点速度を求めこれらもFWHMと比較をする。

中性子星の軌道の長半径 a を以下の式で求めた。

$$a = \sqrt[3]{\left(\frac{P_{orb}}{2\pi}\right)^2 GM} \quad (5.1)$$

ここで使うBe型星の質量 M をスペクトル型から以下の式で求めた。[45]

$$M = 84 \exp\left(-\frac{\text{スペクトル型}}{5.78}\right) \quad (5.2)$$

ここではOの場合はその後の数、スペクトル型がBの場合はBの後の数に10を足して換算してある。例えばスペクトル型がO8のときは8、B2の場合は10+2で12としてある。

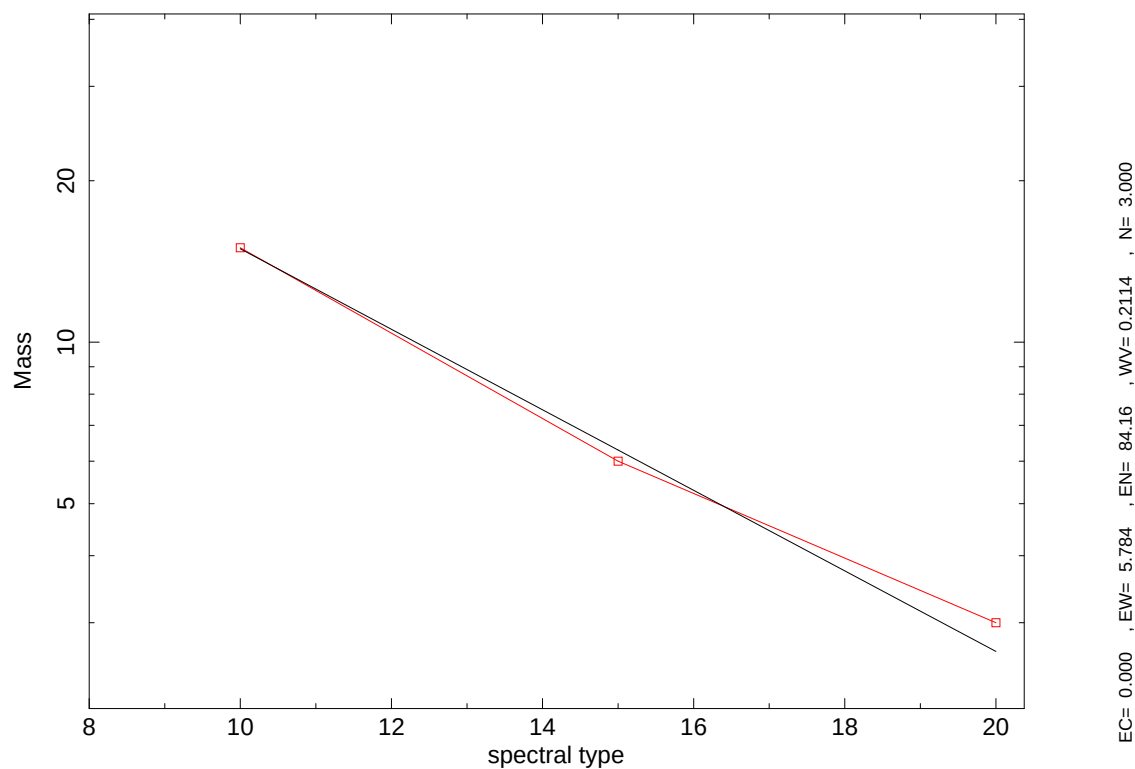


図 5.10: スペクトル型からの質量の推定

以上で求めたパラメータと表 4.1 から離心率 e 、軌道周期、スペクトル型を使ってアウトバーストの FWHM との図を以下の図 5.11~5.13 に示す。

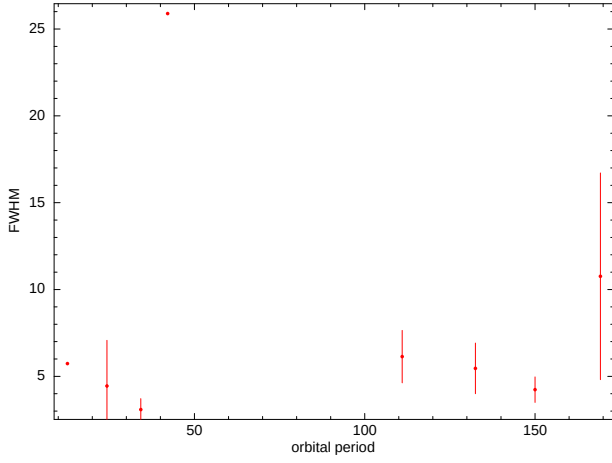


図 5.11: 軌道周期と FWHM

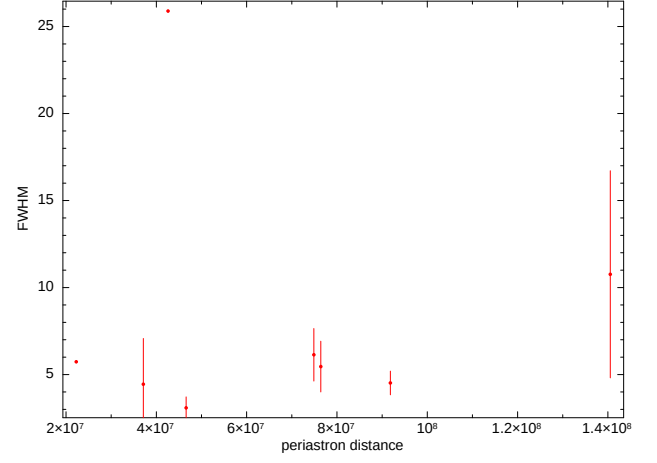
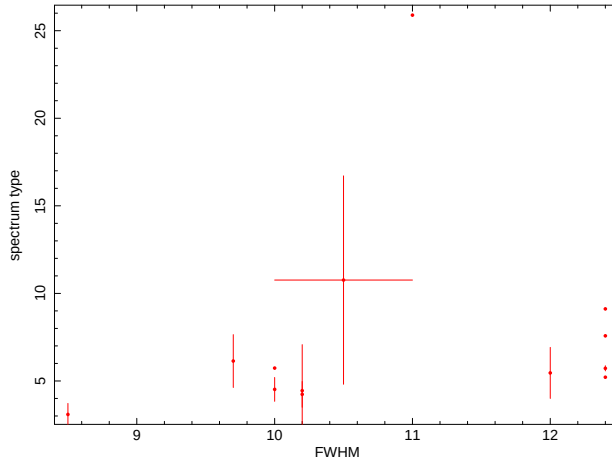
図 5.12: 近星点距離 $a(1-e)$ と FWHM

図 5.13: スペクトル型と FWHM

スペクトル型、近星点距離、軌道周期と FWHM との間に相関はあまり見られないように見える。次にこれらのパラメータを使って近星点での速度を求め、FWHM との相関があるかを調べた。近星点での速度 $v_{\text{periastron}}$ はケプラーの第 3 法則を使い以下のように求めた。

$$v_{\text{periastron}} = \frac{2\pi a \sqrt{1-e^2}}{P_{\text{orb}} (1-e)} \quad (5.3)$$

近星点での速度 $v_{\text{periastron}}$ と FWHM の図を図 5.15 に示す。

ここで Be 型星の星周円盤の厚みが一定であるとして

$$FWHM = \frac{\text{星周円盤の厚み}}{v_{\text{periastron}}} \quad (5.4)$$

として星周円盤の厚みを見積もった。

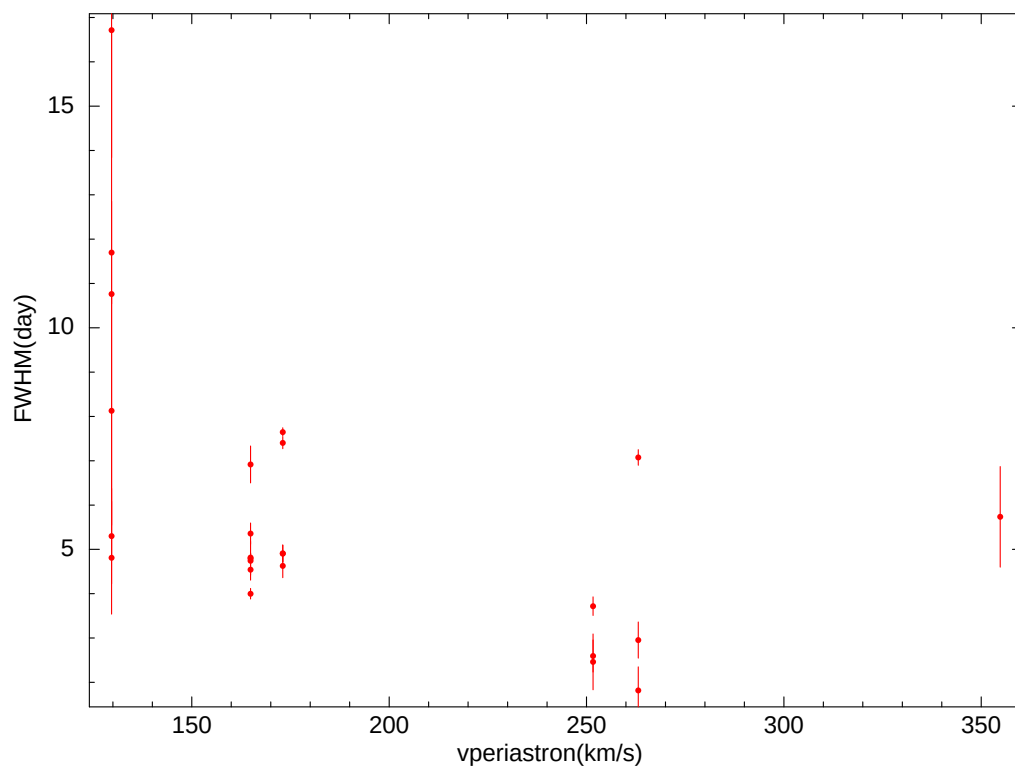


図 5.14: 近星点での速度と FWHM の図。 $v_{periastron}$ が大きくなるにつれて FWHM が小さくなっているように見える。

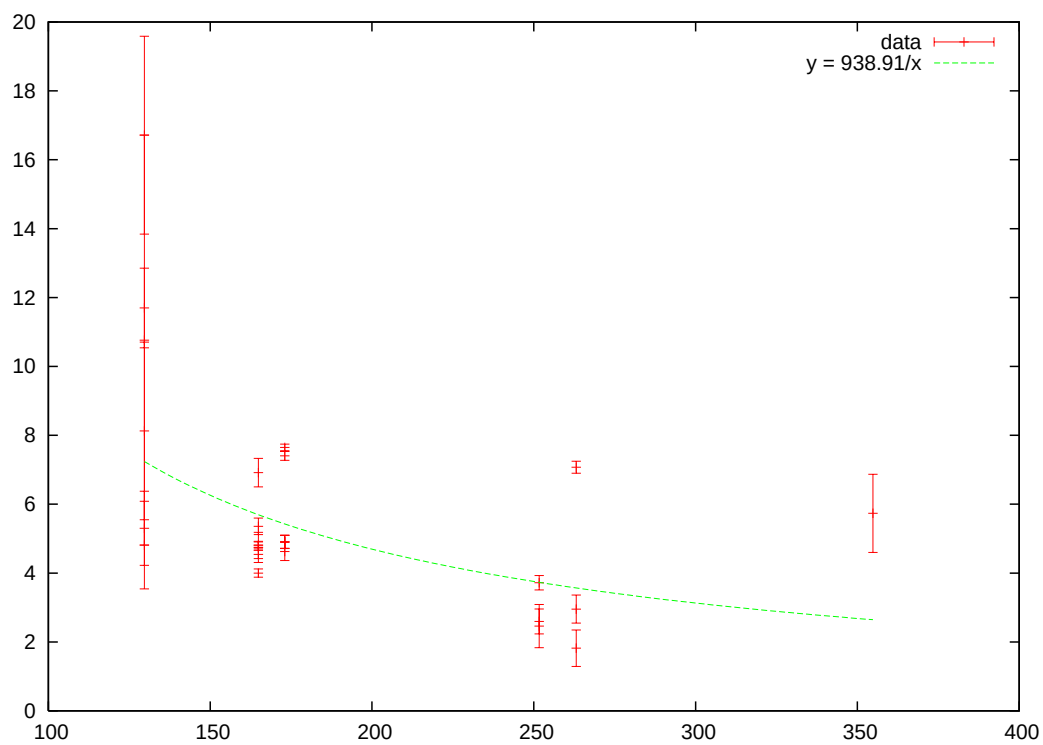


図 5.15: 星周円盤の厚み T を近星点での速度と FWHM に $FWHM = \frac{\text{厚み } T}{v_{periastron}}$ でフィットし見積もった。このフィットの結果では星周円盤の厚み T は $8.1 \times 10^7 km$ であることになる。

恒星の半径は $\sim 10^6\text{km}$ 、星周円盤の厚みが $\sim 10^5\text{km}$ であるといわれており、比較すると得られた結果では大きすぎることになる。このことから中性子はアウトバースト発生時に星周円盤に並行に近い角度で入射して星周円盤を突っ切る時間を長くかせいでいると考えられる。

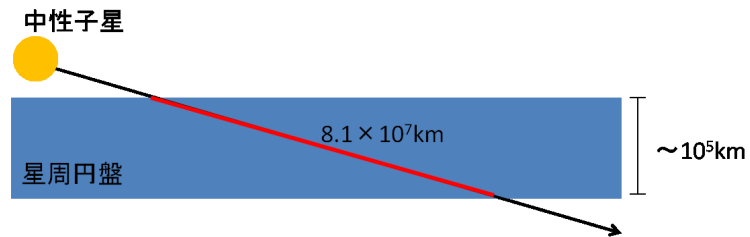


図 5.16: 中性子星が星周円盤を突っ切る図。中性子星が星周円盤を突っ切るとき並行に近い角度で入射していることが考えられる。

5.2.3 2段階の傾きがあるとき

A 0535+262、GX 304-1、4U 0115+634、GRO J1008-57、LS V +44 17ではアウトバーストが大きく増光する前にそれよりも緩い増加率で増光しているように見える。この緩い傾きとアウトバーストのピーク光度、ガウス関数に近似したときの FWHM との関係があるかどうかを調べた。図 5.17、図 5.18 に緩い傾きとアウトバーストの模式図と

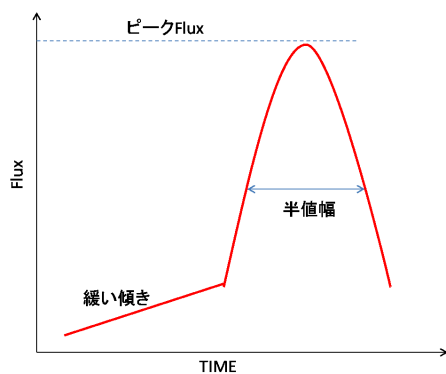


図 5.17: アウトバーストの緩い傾きの模式図

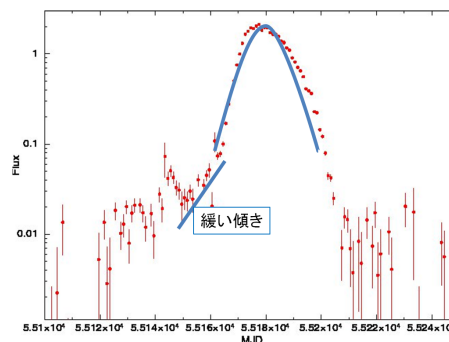


図 5.18: 緩い傾きの A 0535+262 での例

緩い方の傾きとピーク Flux、ガウス関数に近似したときの FWHM を比較したものを図 5.19、5.20 に示す。

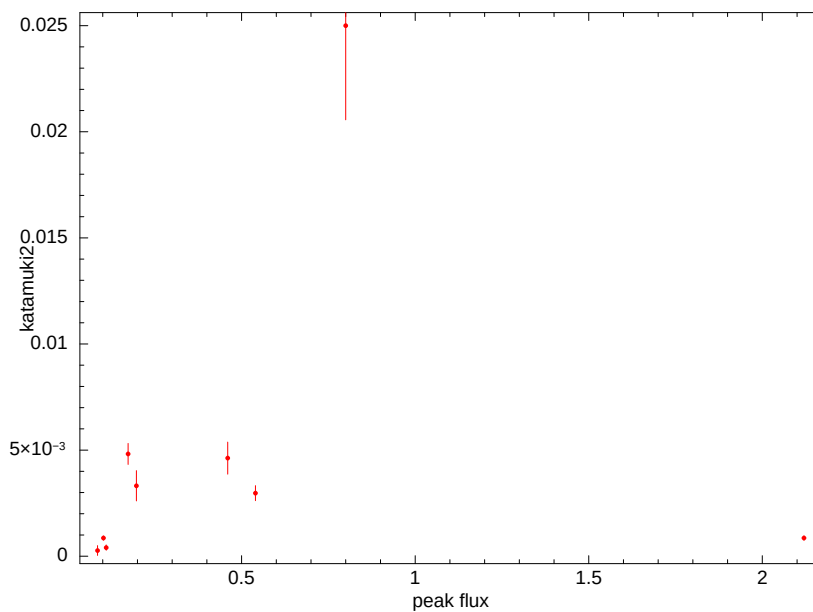


図 5.19: 2段階傾きがあるときの緩い方の傾きとピーク光度の図。飛び抜けて傾きが大きい点は GX 304-1 で飛び抜けて Flux が大きいのは A 0535+262 のアウトバースト。相関しているようには見えない。

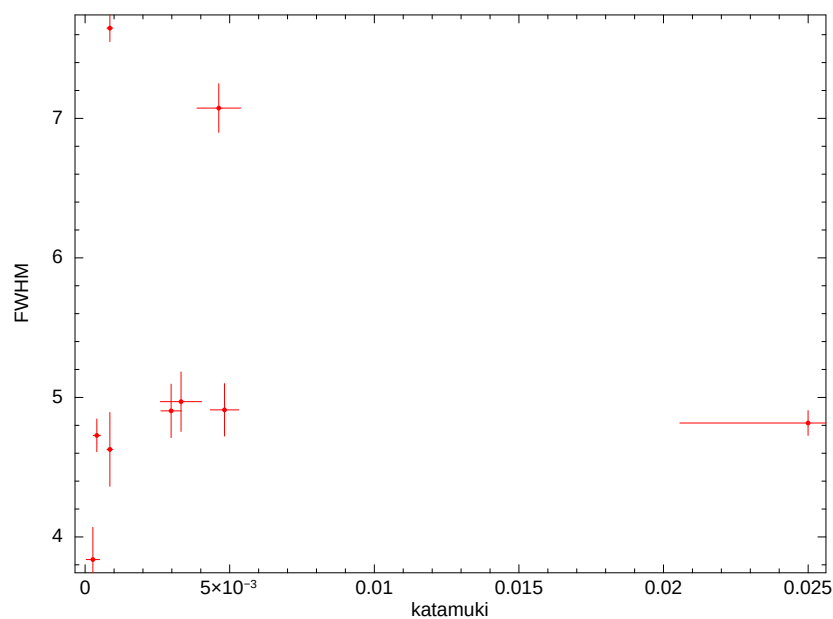


図 5.20: 2段階傾きがあるときの緩い方の傾きと FWHM の図。FWHM が大きいのは A 0535+262 と GX 304-1 である。こちらもはっきりとした相関は見られない。

第6章 まとめ

6.1 光度曲線の軌道周期での畳み込み

MAXIで観測されている天体の光度曲線を畳み込み軌道周期を確かめた。GRO J1008-57では先行結果である248.9日からのズレがあることがわかり、新しく軌道周期249.4日を求めた。XTE J1858+034ではMAXIで観測された2回のアウトバーストとMAXI以前に観測された2回のアウトバーストのピーク時刻によって軌道周期を求めた。その結果、軌道周期52.8日が妥当であることがわかった。

6.2 スペクトル解析

MAXIで観測したBe型X線連星パルサーのスペクトルの解析を行った。特に明るいA 0535+262、GX 304-1のについては期間を光度曲線と光度比によって分割し解析を行った。その他の比較的暗い天体は複数回のアウトバーストのスペクトルを足し合わせフェーズごとに区切って解析を行った。その結果、A 0535+262、GX 304-1のピークではpcfabsモデルが必要となることがわかった。また、A 0535+262ではピークのフェーズではpowerlawの Γ の値が増光フェーズ、減光フェーズよりも小さい値をとることがわかった。

6.3 ピーク光度と増光の傾きの相関

アウトバーストの光度曲線の傾きとアウトバーストのピークFluxの比較を行い関係を調べた。直線とガウス関数でのフィッティングを行い光度曲線の傾きを計算した。その結果、長い期間でアウトバーストを示す天体などのぞきFWHMで5日程度(4~6日)に分布していることがわかった。また、そのFWHMと他のパラメータとの関係があるかどうかを調べたが特に相関は見られなかった。

謝辞

久保田あや先生には理化学研究所を紹介していただき、貴重な経験を積む機会を与えていただいたほか、解析などいろいろと御指導いただきました。本当にありがとうございました。

本論文の執筆にあたり、たくさんの方にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。理化学研究所 MAXI チームの三原建弘先生、杉崎睦氏、芹野素子氏、小浜光洋氏、中平聡氏、日本大学歯学部の中島基樹氏には、解析から生活の知恵まで非常にたくさんの事をご指導いただきました。本当にありがとうございました。牧島一夫先生、松岡勝先生や MAXI チームの皆様には解析だけでなく就職活動のアドバイスをいただき大変お世話になりました。ありがとうございました。

MAXI チームの筑波 JAXA の皆様、東京工業大学の皆様、日本大学の皆様、京都大学の皆様、青山学院大学の皆様、大阪大学の皆様、宮崎大学の皆様、中央大学の皆様、お世話になりました。ありがとうございました。

芝浦工業大学の田村さんには解析の相談から何から本当にお世話になりました。田村さんがいなかったらこの2年間は乗り切れませんでした。本当にありがとう。

ひかるくん、じろうくんたちには大学6年間支えてもらいました。本当にありがとう。

加えてこの2年間の生活に大きな影響を与えてくれた多くの友人に感謝します。そして何よりも、いつも僕の事を心配し、時に厳しく時に優しく支えてくれた両親に感謝します。皆様、本当にありがとうございました。

付 録 A MAXIで得られた PSR B1259-63 の 光度曲線と先行研究との比較

PSR B1259-63 は降着円盤によって増光をする天体である。パルス周期 0.048s、軌道周期 1237 日の長円軌道を持っている。この天体が 2010 年 2 月 4 日に γ 線で増光した [12]。この時の γ 線の増光のときに X 線での増光が MAXI でどのように観測されているか確かめた。

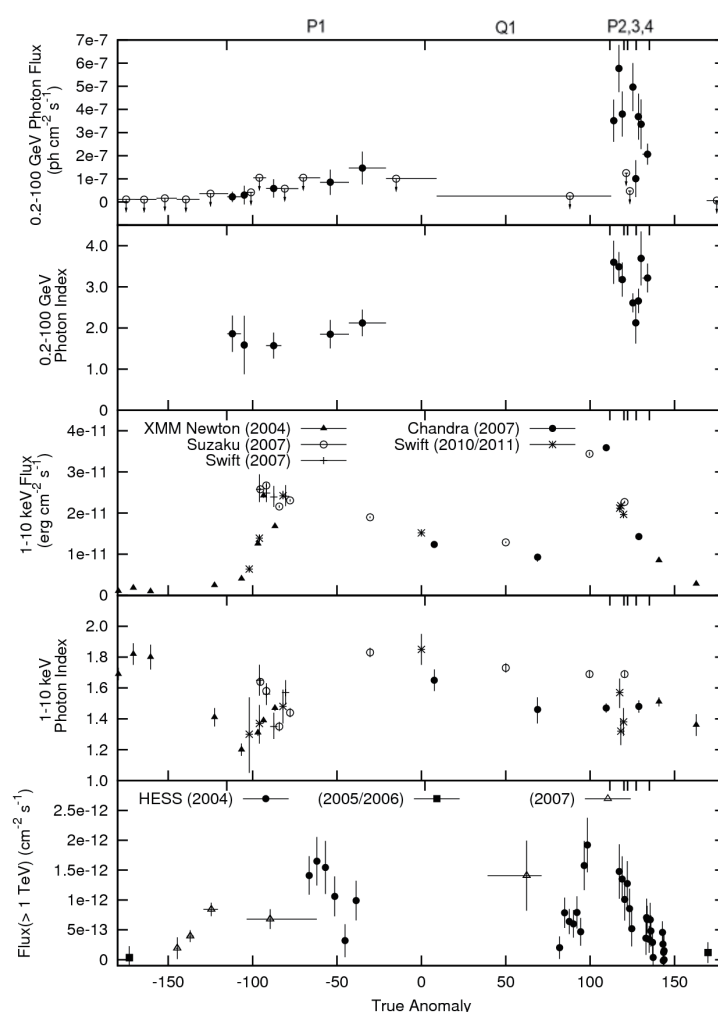


図 A.1: 先行研究での PSR B1259-63 の X 線、 γ 線の時間変動。横軸には軌道運動を行なう天体のある時刻における位置を表す真近点角 (True anomaly) がとってある。

A.1 イメージによる確認

一日毎の天体の位置の領域のイメージを確認し、近くにある別の天体からの X 線の漏れ込みがあるかどうかを調べ漏れ込みのない期間のみのデータを使うことにした。図 A.2~A.10 に確認した期間のイメージを示す。

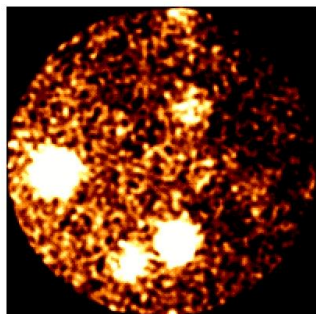


図 A.2: 55492-55522

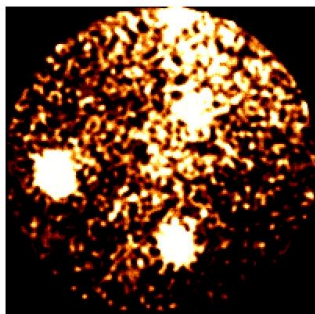


図 A.3: 55522-55533

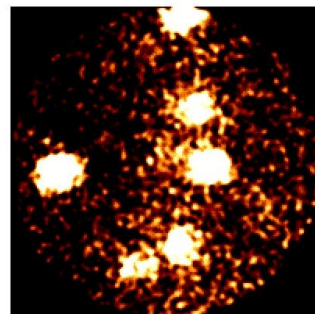


図 A.4: 55533-55544

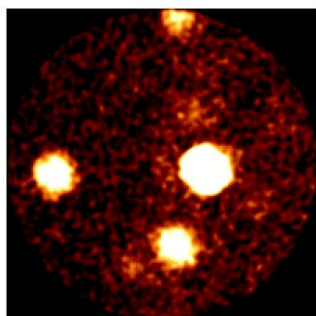


図 A.5: 55544-55562

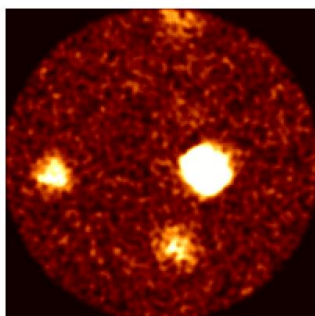


図 A.6: 55562-55569

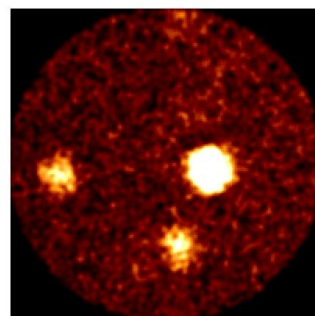


図 A.7: 55569-55597

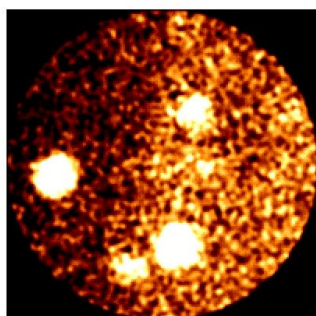


図 A.8: 55598-55628

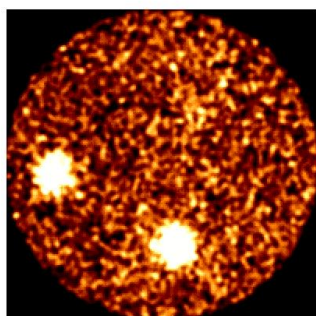


図 A.9: 55628-55640

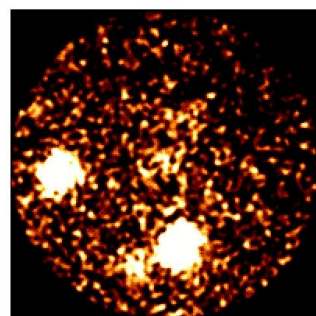


図 A.10: 55641-55653

A.2 光度曲線の作成

前節で抽出した期間で Flux を求めてその値で光度曲線を作成した。Flux を求めるにあたって期間ごとのスペクトルで wabs*powerlaw モデルでフィットを行った。図 A.11 に MAXI での光度曲線を示す。

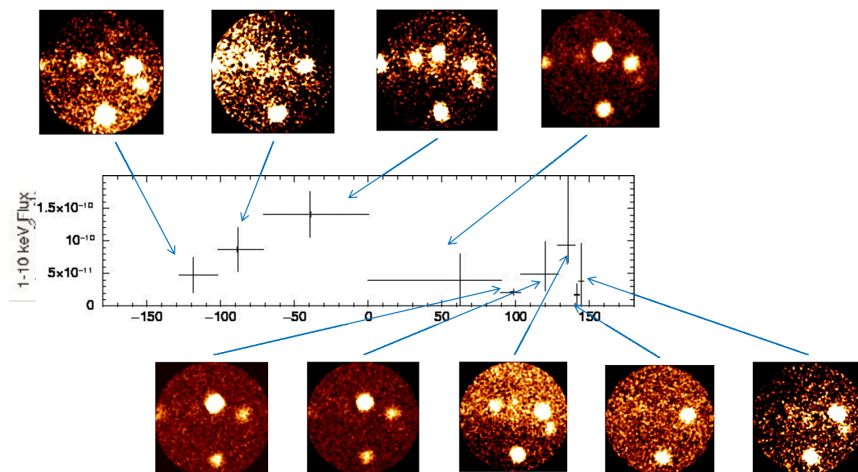


図 A.11: MAXI で得られた PSR B1259-63 の光度曲線と対応する期間のイメージ。

section 先行研究との比較以上で MAXI で得られた PSR B1259-63 の光度曲線を比較したものを図 A.12 に示す。

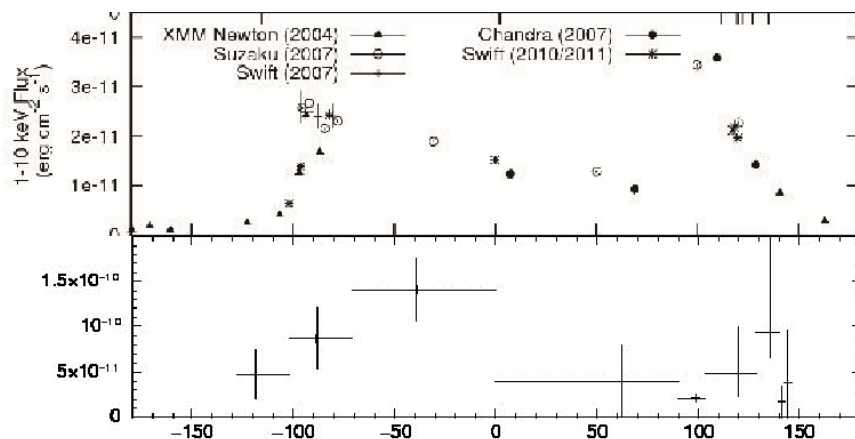


図 A.12: 先行研究と今回えられた結果との比較。先行研究の光度曲線 (上) と MAXI で得られた光度曲線 (下)。

MAXI で得られた光度曲線では先行研究のものより大きな値をとっていることがわかる。また光度曲線のピークの位置が一致していないこともわかる。PSR B1259-63 には近隣に IGR13020-6359、GX304-1 など天体がありそれらからの X 線 Flux が混入していると考えられる。

付 録B アウトバーストの直線でのフィット

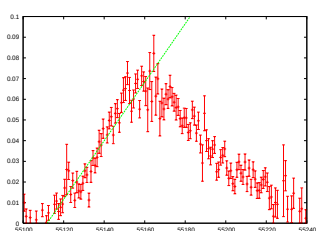


図 B.1: 2S1417-624 1

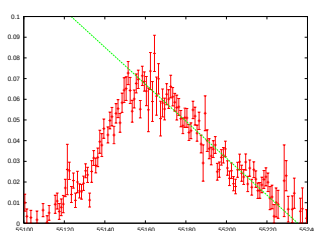


図 B.2: 2S1417-624 2

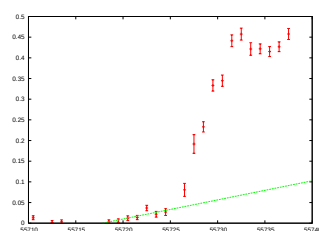


図 B.3: 4U0115+634 1

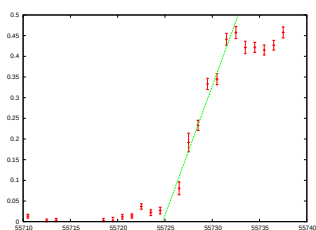


図 B.4: 4U0115+634 2

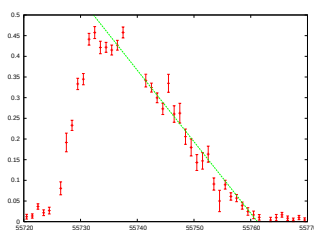


図 B.5: 4U0115+634 3

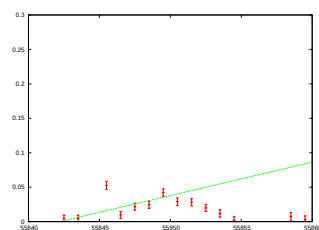


図 B.6: 4U0115+634 4

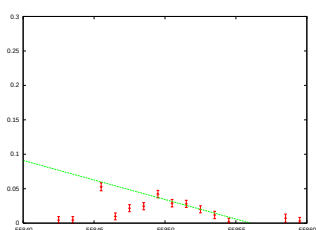


図 B.7: 4U0115+634 5

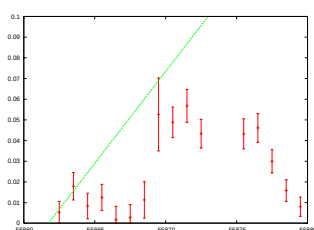


図 B.8: 4U0115+634 6

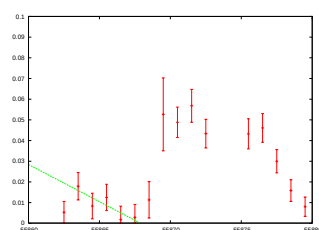


図 B.9: 4U0115+634 7

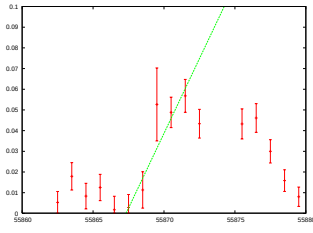


図 B.10: 4U0115+634 8

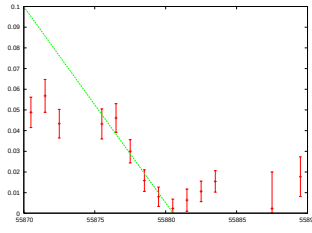


図 B.11: 4U0115+634 9

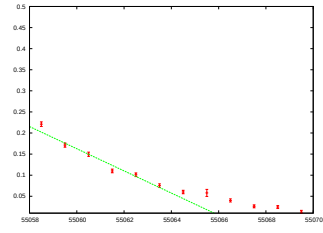


図 B.12: A0535+262 1

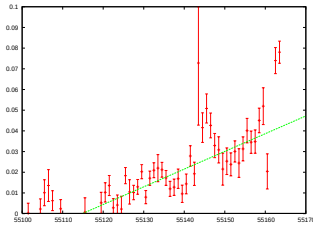


図 B.13: A0535+262 2

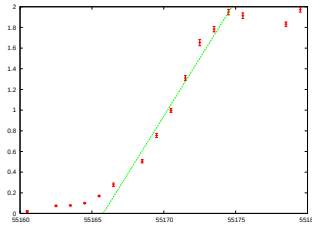


図 B.14: A0535+262 3

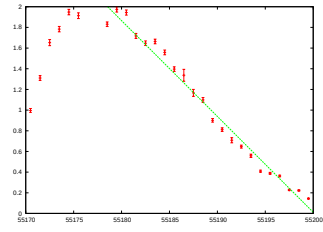


図 B.15: A0535+262 4

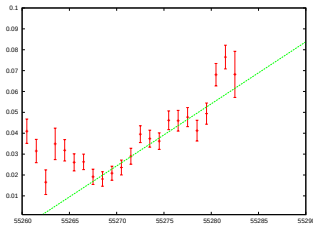


図 B.16: A0535+262 5

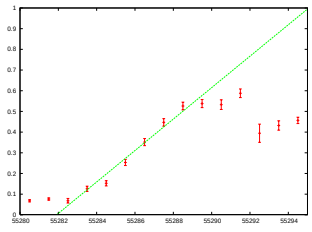


図 B.17: A0535+262 6

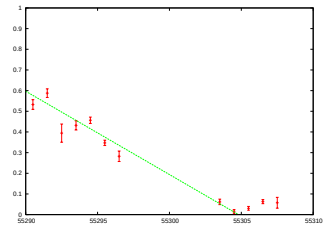


図 B.18: A0535+262 7

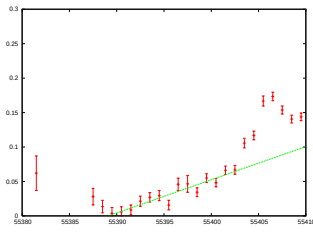


図 B.19: A0535+262 8

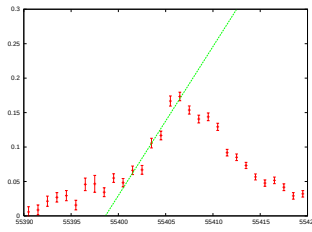


図 B.20: A0535+262 9

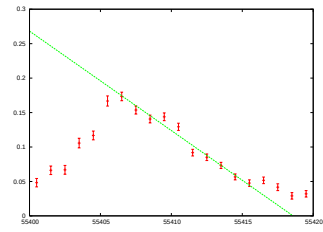


図 B.21: A0535+262 10

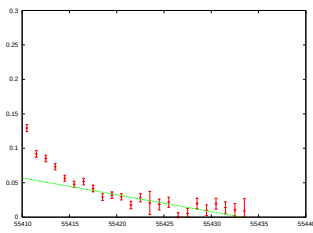


図 B.22: A0535+262 11

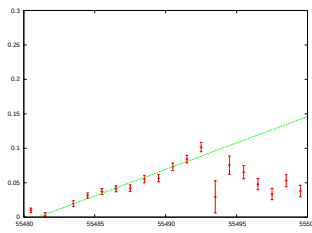


図 B.23: A0535+262 12

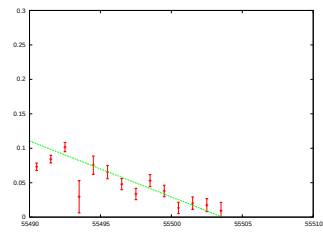


図 B.24: A0535+262 13

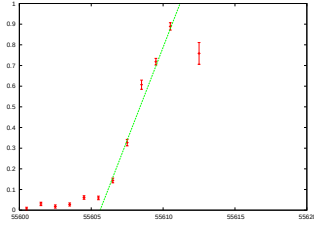


図 B.25: A0535+262 14

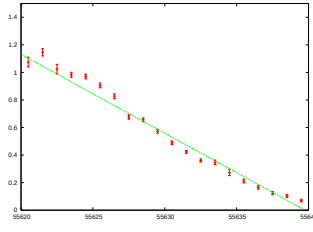


図 B.26: A0535+262 15

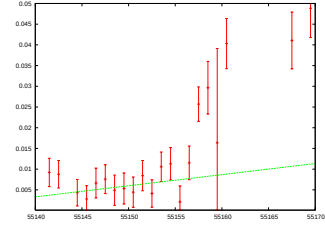


図 B.27: GRO J1008-57 1

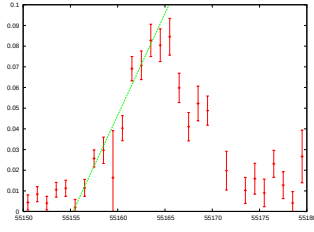


図 B.28: GRO J1008-57 2

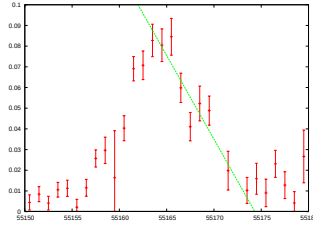


図 B.29: GRO J1008-57 3

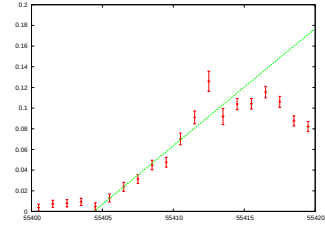


図 B.30: GRO J1008-57 4

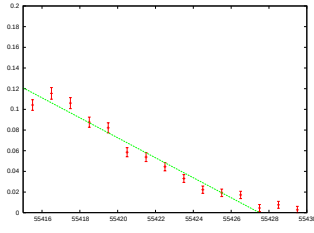


図 B.31: GRO J1008-57 5

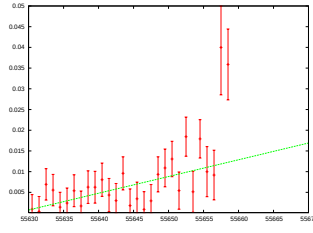


図 B.32: GRO J1008-57 6

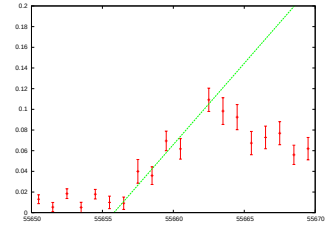


図 B.33: GRO J1008-57 7

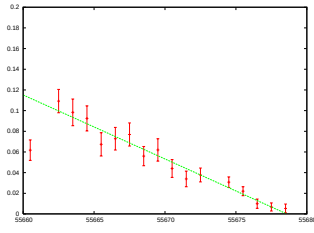


図 B.34: GRO J1008-57 8

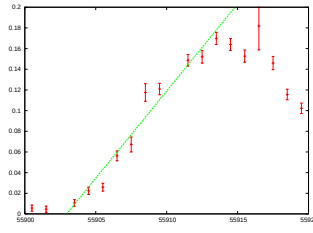


図 B.35: GRO J1008-57 9

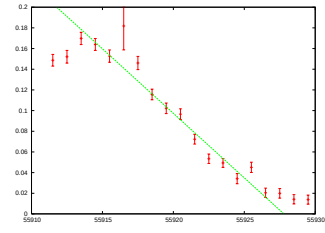


図 B.36: GRO J1008-57 10

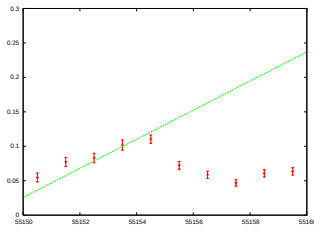


図 B.37: GX 304-1 1

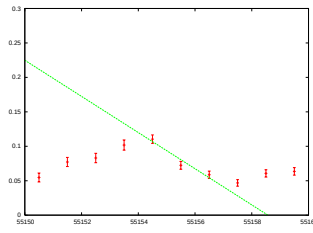


図 B.38: GX 304-1 2

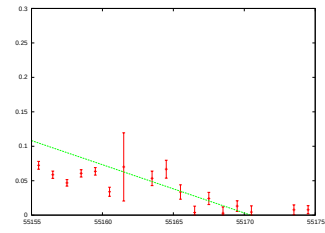


図 B.39: GX 304-1 3

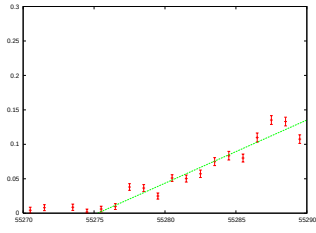


図 B.40: GX 304-1 4

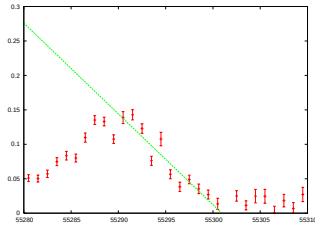


図 B.41: GX 304-1 5

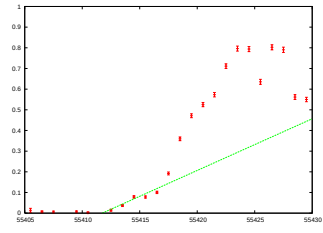


図 B.42: GX 304-1 6

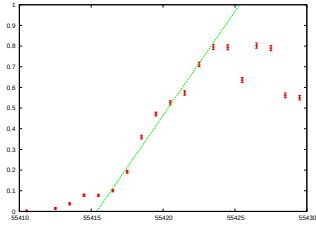


図 B.43: GX 304-1 7

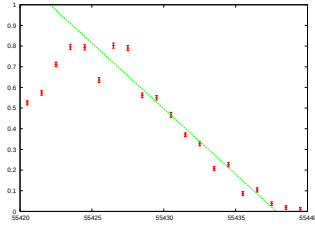


図 B.44: GX 304-1 8

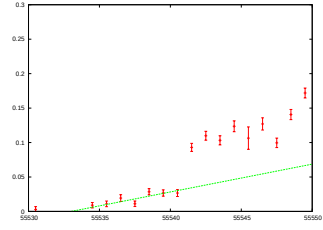


図 B.45: GX 304-1 9

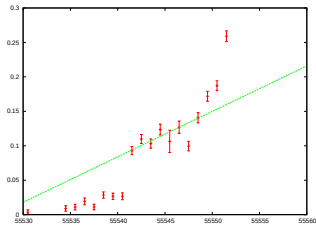


図 B.46: GX 304-1 10

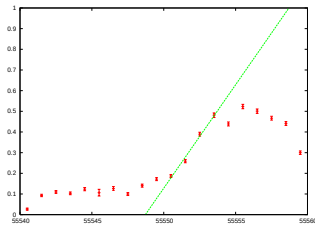


図 B.47: GX 304-1 11

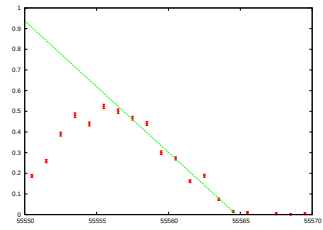


図 B.48: GX 304-1 12

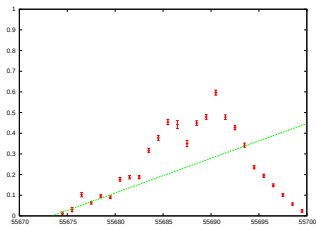


図 B.49: GX 304-1 13

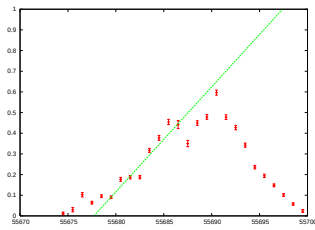


図 B.50: GX 304-1 14

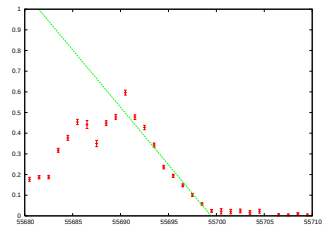


図 B.51: GX 304-1 15

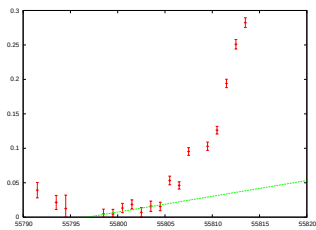


図 B.52: GX 304-1 16

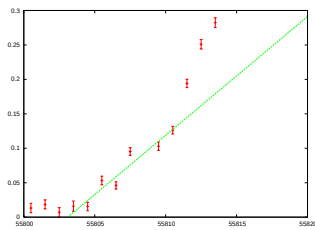


図 B.53: GX 304-1 17

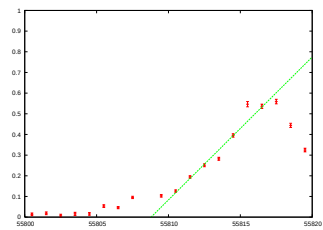


図 B.54: GX 304-1 18

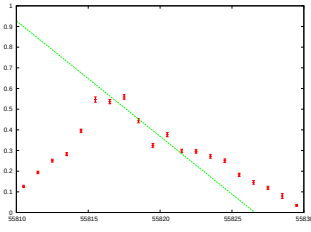


図 B.55: GX 304-1 19

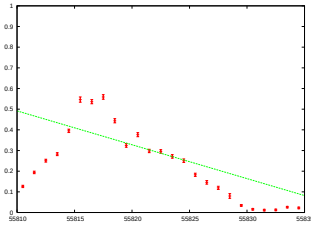


図 B.56: GX 304-1 20

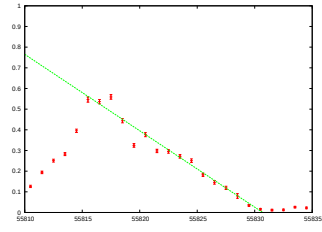


図 B.57: GX 304-1 21

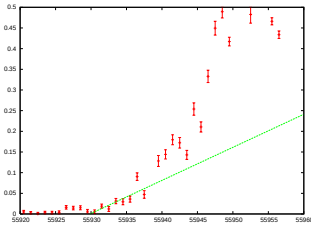


図 B.58: GX 304-1 22

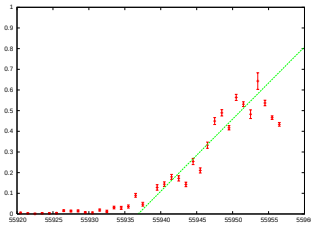


図 B.59: GX 304-1 23

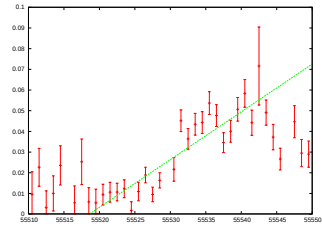


図 B.60: MAXI J1409-619 1

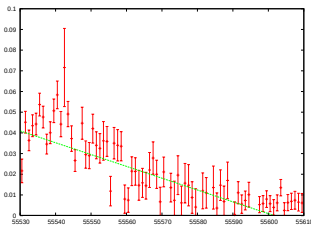


図 B.61: MAXI J1409-619 2

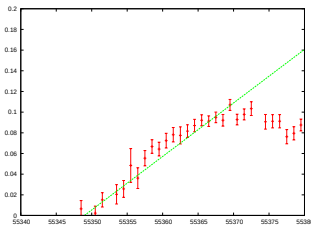


図 B.62: XTE J1946+274 1

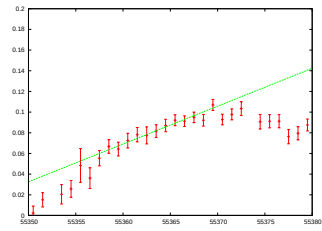


図 B.63: XTE J1946+274 2

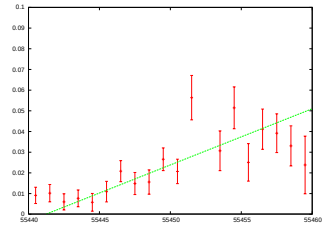
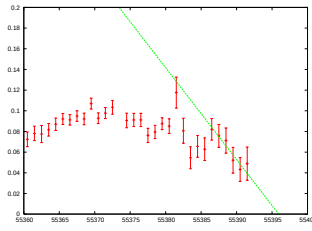
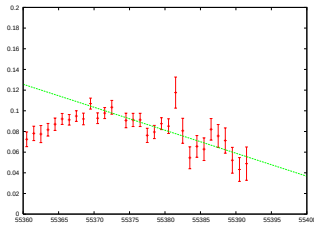


図 B.64: XTE J1946+274 3 図 B.65: XTE J1946+274 4 図 B.66: XTE J1946+274 5

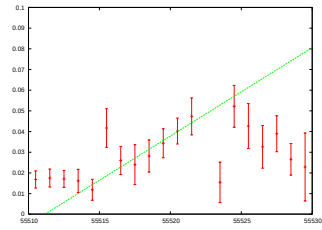
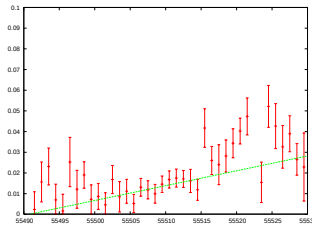
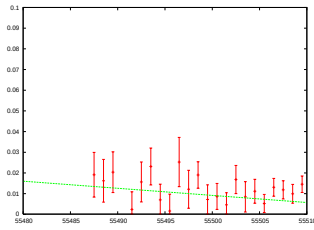


図 B.67: XTE J1946+274 6 図 B.68: XTE J1946+274 7 図 B.69: XTE J1946+274 8

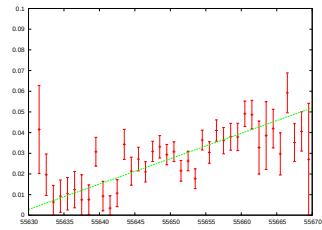
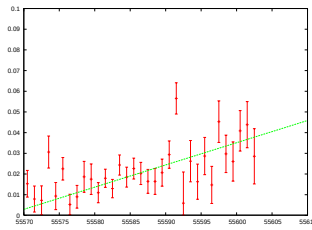
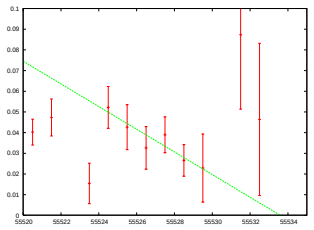


図 B.70: XTE J1946+274 9 図 B.71: XTE J1946+274 10 図 B.72: XTE J1946+274 11

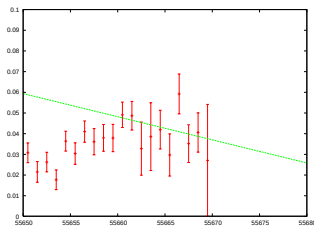


図 B.73: XTE J1946+274 12

付録C アウトバーストのガウス関数でのフィット

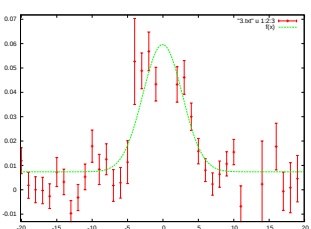


図 C.1: 4U 0115+634:1 回目 図 C.2: 4U 0115+634:2 回目 図 C.3: 4U 0115+634:3 回目

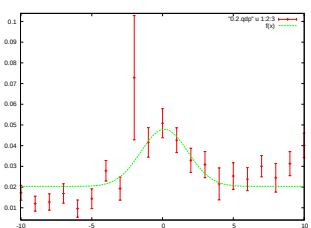


図 C.4: A 0535+262 プリカー
サ 1

図 C.5: A 0535+262: プリ
カーサ 2

図 C.6: A 0535+262: プリ
カーサ 3

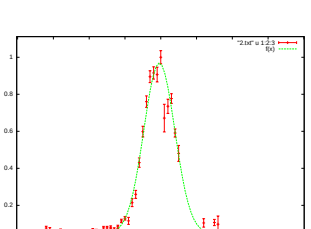


図 C.7: A 0535+262:プリカーサ 4

[htb]

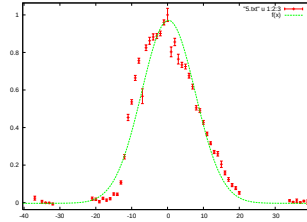
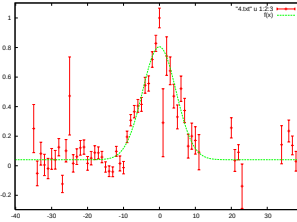
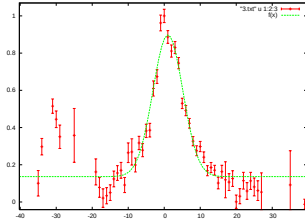


図 C.10: A 0535+262:3 回目 図 C.11: A 0535+262:4 回目 図 C.12: A 0535+262:5 回目

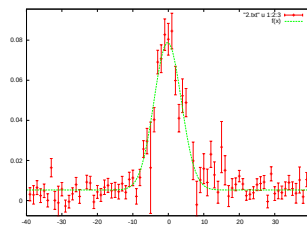
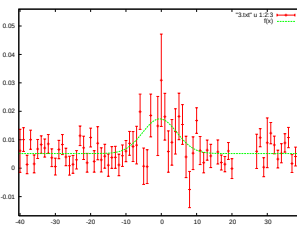
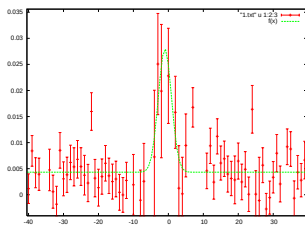


図 C.13: GRO J1008-57:プリカーサ 1 図 C.14: GRO J1008-57:プリカーサ 2 図 C.15: GRO J1008-57:1 回目

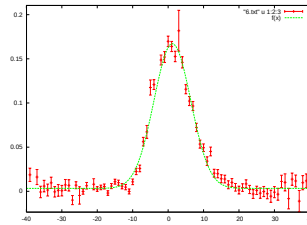
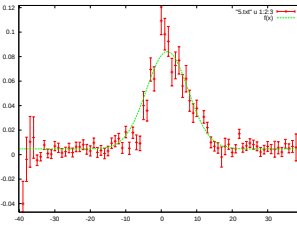
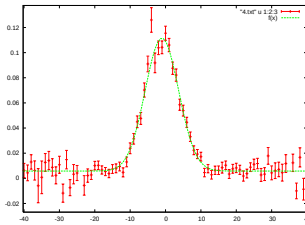


図 C.16: GRO J1008-57:2 回目 図 C.17: GRO J1008-57:3 回目 図 C.18: GRO J1008-57:4 回目

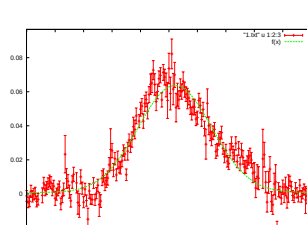
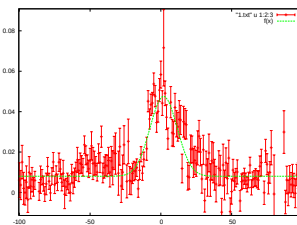
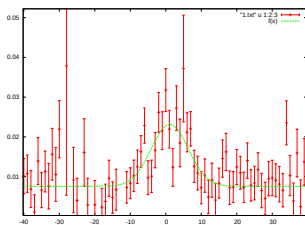


図 C.19: IGR J13020-6359:1 回目 図 C.20: MAXI J1409-619:1 回目 図 C.21: 2S 1417-624:1 回目

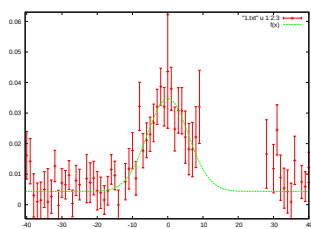


図 C.22: XTE J1858+034:1 回目

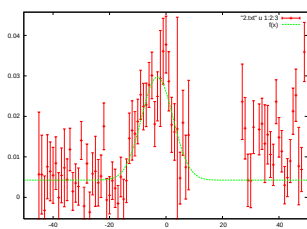


図 C.23: XTE J1858+034:2 回目

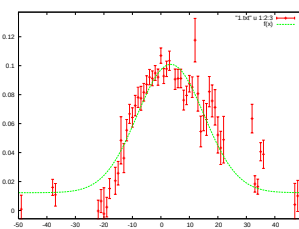


図 C.24: XTE J1946+274:1 回目

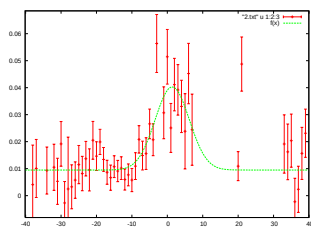


図 C.25: XTE J1946+274:2 回目

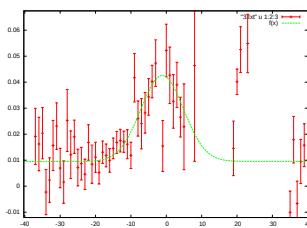


図 C.26: XTE J1946+274:3 回目

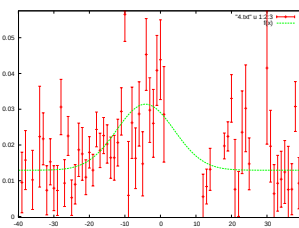


図 C.27: XTE J1946+274:4 回目

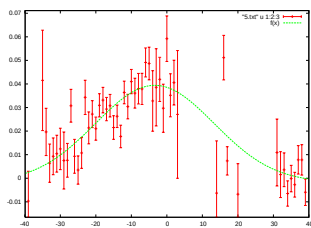


図 C.28: XTE J1946+274:5 回目

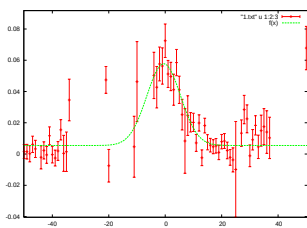


図 C.29: SAX J2103.5+4545:1 回目

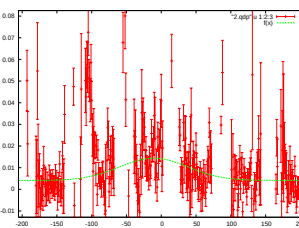


図 C.30: SAX J2103.5+4545:2 回目

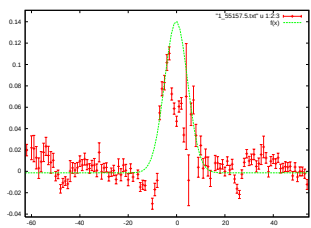


図 C.31: GX304-1:1 回目

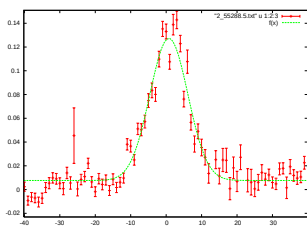


図 C.32: GX304-1:2 回目

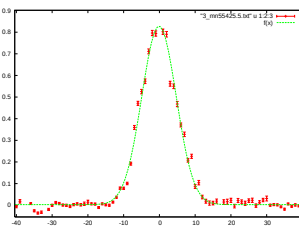


図 C.33: GX304-1:3 回目

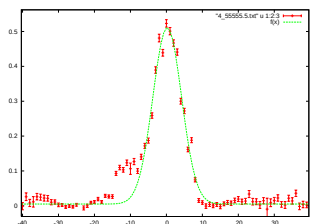


図 C.34: GX304-1:4 回目

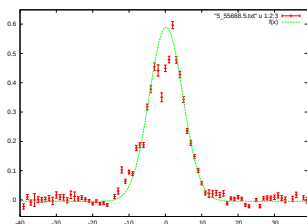


図 C.35: GX304-1:5 回目

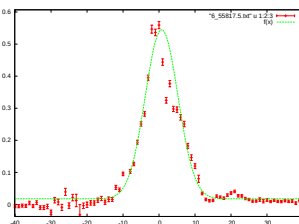


図 C.36: GX304-1:6 回目

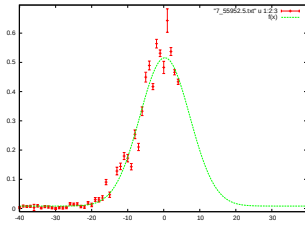


図 C.37: GX304-1:7 回目

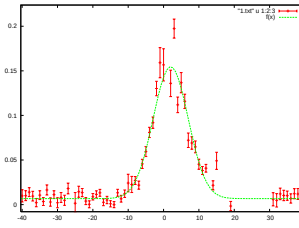


図 C.38: LS V +44 17:1 回目

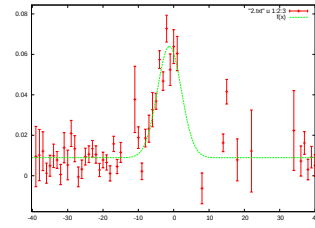


図 C.39: LS V +44 17:2 回目

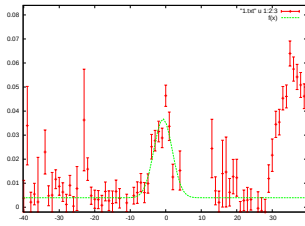


図 C.40: V 0332 +53:1 回目

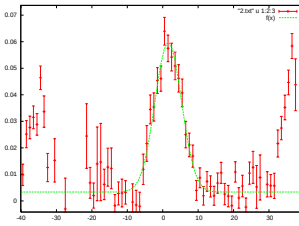


図 C.41: V 0332 +53:2 回目

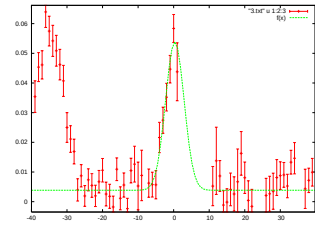


図 C.42: V 0332 +53:3 回目

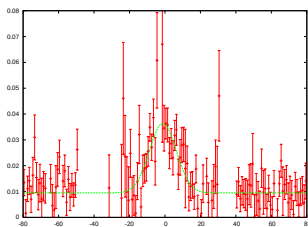


図 C.43: Swift J1843.5-0343:1 回目

関連図書

- [1] 大休寺 新, 「全天 X 線監視装置 MAXI に搭載された X 線 CCD カメラ SSC の軌道上バックグラウンドの研究」 宮崎大学 修士論文
- [2] 中島基樹, 「位置検出型ガス比例計数管用カーボンファイバー芯線の特性評価」 日本大学 修士論文 (2002 年)
- [3] 齊藤慧, 「特異天体 XSS J12270.4859 の多波長観測」 東京大学 修士論文 (2010 年)
- [4] 山本堂之, 「全天 X 線監視装置 MAXI による X 線天体の変動研究」 日本大学 修士論文 (2010 年)
- [5] 石川翔大, 「全天 X 線観測装置 MAXI による低質量 X 線連星系の研究」 芝浦工業大学 卒業論文 (2011 年)
- [6] 鵜澤明子, 「X 線飛翔体観測装置を用いた星生成領域の研究」 中央大学 修士論文 (2011 年)
- [7] 井上一, 「シリーズ現代の天文学 17-宇宙の観測 I 高エネルギー天文学-」 日本評論社, 268, 2
- [8] Grimm et al. 「The Milky Way in X-rays for an outside observer」 (2002/9)
- [9] Levine, L. et al. 2011, ApJS, 196, 6
- [10] Matsuoka, M. et al. 2009, PASJ, 61, 999
- [11] Coe, M. et al. 2007, MNRAS, 378, 1427
- [12] Tam, P. H. T. et al. 2011, ApJ, 736L, 10
- [13] J. in 't Zand 「X-ray bursts and superbursts: what can MAXI do?」
- [14] 鳥居研一 著, 「現代物理学最前線 4/パルサーからマグネターのすべて」 共立出版株式会社, 2001
- [15] 佐藤 桂子, 「近傍銀河中の X 線源のスペクトル解析」 広島大学修士論文 (2001 年)
- [16] 山崎 智紀, 「広帯域線スペクトル解析による活動銀河核周辺の物質構造の研究」 広島大学修士論文 (2008 年)
- [17] 上原悠一, 「「すざく」による活動銀河核からの鉄輝線と広帯域連続 X 線の研究」 東京大学 修士論文 (2009 年)
- [18] Clark, J. S. et al 1999, A&A, 348, 888
- [19] 野本憲一 編, 「シリーズ現代の天文学 7 恒星」 日本評論社
- [20] 小山勝二、嶺重慎 編, 「シリーズ現代の天文学 8 ブラックホールと高エネルギー現象」 日本評論社
- [21] 川野正貴, 「MAXI による X 線連星 Cir X-1 の時間変動とスペクトルの解析」 立教大学卒業論文 (2012 年)
- [22] Mowlavi, N. et al, 2006A&A, 451, 187
- [23] Camero-Arranz, A. et al, 2011, AIPC.1379, 115
- [24] McBride, V. A. et al, 2006, A&A, 451, 267
- [25] James, Marykuty et al, 2011, MNRAS, 410, 1489
- [26] Lei, Ya-Juan et al, 2009, ApJ, 707, 1016
- [27] Orlandini, Mauro et al, 2010, arXiv1012, 12180

- [28] Shrader, C. R. et al, 1999, ApJ, 512, 920
- [29] Coe et al, 2007, MNRAS, 378, 1427
- [30] Levine et al, 2011, ApJS, 196, 6
- [31] Casares, et al, 2011, ApJ, 731, 105
- [32] Ducci, L. et al, 2008, int, workE, 116
- [33] Renaud, M. et al, 2006, ApJ, 647, 1375,
- [34] Lopes de Oliveira, R. et al, 2006, A&A, 454, 265
- [35] Manchanda, R. K. et al, 1999, MNRAS, 305, 409
- [36] Yamamoto Takayuki et al, 2011, arXiv1102, 4232
- [37] 4U2206+543mag:2010A&A...520A..22W
- [38] XTE J1858+034mag:1998A&A...337..815P
- [39] EXO 2030+375mag:2008A&A...491..833K
- [40] GS1843+00:2000A&A...375..501D, 2001A&A...371.10181
- [41] LS I +61 303:2011ApJ...733...89L, (d)2009ApJ...699L.102A, (e)2007ApJ...668..481S
- [42] Reig, P.; Negueruela, I. et al, 2005, A&A, 440, 1079R
- [43] Romero, G. E. et al, 2007, A&A, 474, 15R
- [44] Reig, P.; Negueruela, I. et al, 2005, A&A, 440, 1079R
- [45] 国立天文台編 理科年表 (平成 5 年) 丸善