

X線観測によるブラックホール連星周囲の 降着円盤の物理状態の分類

阿部由紀子

広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻

M032683

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2005年2月10日

概要

ブラックホール連星はこれまでに多くのX線衛星で観測されている。そのスペクトルは光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤からの放射と power-law 成分でよく再現でき、ここから降着円盤のもっとも内側の半径 R_{in} の値が得られる。1980 年代の観測から光度に関係なく R_{in} は一定に保たれ、降着円盤からの放射光度 L_{disk} は降着円盤のもっとも内側の温度 T_{in} の 4 乗に比例することが分かっている。しかし、「ぎんが」や RXTE 衛星などによって非常に明るいときにこの標準的な描像ではうまく説明のできない 2 つの状態が観測された。1 つは very high state と呼ばれ、 $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係からはずれることが確認されている。Kubota et al. (2001, 2004) では「降着円盤は光学的に厚く幾何学的に薄い状態であるが、その周囲にあると考えられる光学的に薄い高エネルギー電子雲によって降着円盤から放射された光子の一部が逆コンプトン散乱された」結果であると報告されている。これによって GRO J1655–40 と XTE J1550–564 でみられた very high state の標準的な状態からのずれが良く説明されている。この解釈は物理的描像がよく理解されている標準降着円盤からの無理のない延長として重要である。もう 1 つの状態は非常にソフトなスペクトルによって特徴づけられる。このとき降着円盤は光学的に薄く幾何学的に厚い状態から逸脱していると考えられ、 $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ に比例する (Kubota et al. 2004)。

今回我々は、6 つのブラックホール連星候補について RXTE 衛星で観測されたデータを用いて解析を行った。ターゲットの 1 つである 4U 1630–47 では上記の 3 つの状態がすべて確認できた。そこで very high state の状態にあるデータに逆コンプトン散乱を考慮すると、標準的な状態である $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係にしたがうことが分かった。しかし一部のデータは完全には上の描像では説明しきれない状態もあることも分かった。さらに他に 5 天体について調べた結果、上の状態が一般的にみられることがわかり、ブラックホール連星の降着円盤が統一的に理解できる可能性を示す。また標準降着円盤から遷移する条件の 1 つが X 線光度であることも分かった。

目次

第1章 序論	4
第2章 ブラックホールについて	6
2.1 一般相対論におけるブラックホール	6
2.2 ブラックホールの種類	6
2.2.1 恒星質量ブラックホール(ブラックホール連星)	7
2.2.2 銀河中心の巨大質量ブラックホール	8
2.3 ブラックホール候補星の発見と同定法	8
2.4 ブラックホール連星の X 線放射スペクトルの特徴	9
2.4.1 low/hard state	10
2.4.2 high/soft state	11
2.4.3 very high state	14
2.4.4 slim disk モデル	16
2.4.5 QPO	17
2.5 Kubota et al. (2001, 2004) による分類	18
2.6 本研究の目的	18
第3章 観測衛星	20
3.1 RXTE 衛星	20
3.1.1 概要	20
3.1.2 PCA	21
3.1.3 HEXTE	23
3.1.4 ASM	26
3.2 ASCA 衛星	27
3.2.1 概要	27
3.2.2 XRT	28
3.2.3 GIS	29
第4章 データ解析と観測天体	31
4.1 解析方法	31
4.1.1 スペクトル解析	31

4.1.2	時系列解析	31
4.2	観測天体について	32
第5章	データ解析と結果	35
5.1	4U 1630–47	35
5.1.1	全観測について	35
5.1.2	標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング	37
5.1.3	逆コンプトン散乱を考慮したフィッティング	41
5.1.4	slim disk の証拠	44
5.1.5	3 状態の分類法	44
5.2	XTE J1859+226	46
5.2.1	全観測について	46
5.2.2	標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング	46
5.2.3	逆コンプトン散乱を考慮したフィッティング	49
5.3	GX 339–4	51
5.3.1	全観測について	51
5.3.2	標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング	51
5.3.3	逆コンプトン散乱を考慮したフィッティング	54
5.4	XTE J1720–318	56
5.4.1	全観測について	56
5.4.2	標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング	56
5.4.3	slim disk の証拠	58
5.5	XTE J2012+381	60
5.5.1	全観測について	60
5.5.2	標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング	60
5.6	H 1743–322	63
5.6.1	全観測について	63
5.6.2	標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング	63
5.6.3	逆コンプトン散乱を考慮したフィッティング	65
5.6.4	slim disk の証拠	70
5.7	時系列解析	71
5.7.1	QPO	71
5.7.2	短時間の時間変動	72
5.8	個々の天体の結果とまとめ	75
第6章	まとめと考察	77
6.1	まとめ	77
6.2	統一的な分類法	78

6.3	Very High State などのこれまでの分類との関係	81
6.4	ブラックホールの質量	82
6.5	臨界光度	83
6.6	今後の課題	84
付 録 A RXTE の観測ログ		86

第1章 序論

ブラックホールという概念は、1916年にKarl SchwarzschildによってEinsteinの一般相対性理論から重力場を記述する最初の解が発見されたことにはじまる。この解は、質量をもつ「もの」の大きさをどんどん小さくしてある大きさ以下にすると、そこからは光さえもでることができなくなるということを予言していた。この「ある大きさ」とは天体の質量に比例しており、たとえば地球では半径5mm、太陽では半径3kmである。1960年代になるとどのようにしてブラックホールが形成されるかが分かってきた。星の進化の最終段階では、内部の核融合反応が終わるので重力のみが働いて星は重力崩壊を起こし、このときの星の質量が $30M_{\odot}$ 以上ならばブラックホールになると予想されている。ブラックホールはその強い重力のため周りの星間物質を吸い込んでいる。またブラックホールが連星系を成しているときは相手の星の物質がブラックホールの重力に引かれて大量に落ちていく。これらの過程を質量降着という。連星系で相手の星から降着する物質は有限の角運動量を持っているので、ブラックホールのまわりに降着円盤が形成され、その中心付近のもっとも高温の部分からX線が放射されると考えられている。今までに日本のX線衛星である「はくちょう」や「てんま」、「ぎんが」を含めた多くの衛星でブラックホールは観測され、これらの観測によってブラックホールはhigh/soft stateとlow/hard stateの2つのスペクトル状態を持つことが分かっている。high/soft stateのとき降着円盤は光学的に厚く幾何学的に薄いと考えられ、この降着円盤からはhigh/soft stateを特徴づける軟X線成分が放射されることが分かった。さらに、降着円盤の最も内側の半径 R_{in} は常に一定に保たれていることも観測によって明らかになっている。この R_{in} はブラックホールの質量に比例するので質量を決めるための重要な物理量である。

これら2つの状態が多くのブラックホール連星で観測されたが、「ぎんが」やRXTEなどの衛星によって非常に明るい時期にvery high stateとよばれる状態がみつかった。very high stateではスペクトルのハード成分が卓越、 R_{in} が異常に小さい、降着円盤のもっとも内側の温度 T_{in} が異常に高いなどの特徴がある。very high stateの解釈の1つに、GRO J1655-40、XTE J1550-564に対して適用されたコンプトン散乱の影響を考慮した解釈がある(Kubota et al. 2001, 2004)。この解釈は、「降着円盤はhigh/soft stateと同様に光学的に厚く幾何学的に薄い状態であるが、その周囲に光学的に薄い高エネルギー電子雲が存在し、降着円盤から放射された光子の一部を逆コンプトン散乱する」というものである。これによると、ハードなスペクトルや R_{in} 、 T_{in} の異常性がよく説明できる。またXTE J1550-564では非常に明るいときにvery high stateに加えて、もう1つ新しい状態が観測されている(Kubota et al. 2004)。この状態では非常にソフトなスペクトルが観測

される。これは降着円盤の内側が slim disk と呼ばれる状態になっていて、放射効率が低下しているためであると考えられている。この状態を本研究では extreme soft state とよぶことにする。

我々は今回、RXTE 衛星によって観測された 6 つのブラックホール連星候補について解析を行った。RXTE 衛星は同一の天体を数年間にわたりほぼ毎日観測するという特徴をもつため、 R_{in} や T_{in} などのパラメータおよびスペクトルの長期的な変動を見ることができる。くり返し観測されたデータを使って、これらの解釈が普遍的に適用できるか、またどのような条件のもとでそれぞれの状態に遷移するのかを探るのが本研究の目的である。2 章ではブラックホール連星の特徴について述べる。3 章では本研究で用いた観測衛星 RXTE および「あすか」について述べ、4 章で解析方法と 6 つのターゲットについて説明している。5 章では実際に行った解析について述べて、最後に 6 章で今回の結果をまとめる。

第2章 ブラックホールについて

2.1 一般相対論におけるブラックホール

ブラックホールは一般相対論によって初めてその存在が予言された。一般相対論とは重力と時空を関係づける理論で、その基本方程式であるアインシュタイン方程式は次のようになる。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$ はリッチテンソル、 R はスカラー曲率、 $g_{\mu\nu}$ は計量テンソル、 $T_{\mu\nu}$ はエネルギー運動量テンソルで、 Λ は宇宙項と呼ばれるものである。左辺の第 1、2 項は時空の曲がり具合を表し右辺は質量を含んだ物質のエネルギー分布を表しているので、エネルギー分布を与えることにより光や物体の運動を記述できる。1916 年に Karl Schwarzschild が質量 M の天体のまわりの球対称・静的で真空な時空を表す次のようなアインシュタイン方程式の解を見つけた。

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right) dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

この解を Schwarzschild の真空解といい、このメトリックで表される時空を Schwarzschild 時空という。これは物質をどんどん収縮させてある大きさ $\frac{2GM}{c^2}$ 以下にすると、そこからは光さえも出ることができないことを示している。この大きさを Schwarzschild 半径 r_s といい、

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} = 2.96 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ km}$$

で表される。 r_s より内側を Schwarzschild ブラックホールという。Schwarzschild ブラックホールは球対称で、その中心には密度と時空のゆがみが無限大かつ体積がゼロの「特異点」が存在すると考えられている。

2.2 ブラックホールの種類

今日では少なくとも次の 2 種類のブラックホールが存在する兆候が宇宙観測によって見つけられている。

2.2.1 恒星質量ブラックホール(ブラックホール連星)

まず1つ目は序論で述べたように星の重力崩壊によって生じるブラックホールである。重力崩壊を起こしたあとで超新星爆発が起こるが、星の持っていた質量によって爆発後の星の進化の様子に違いが現れてくる。 $30M_{\odot}$ 以下のものは、白色矮星や中性子星になり $30M_{\odot}$ 以上の星はブラックホールになる。単独のブラックホールはほとんど光っていないが、ブラックホールが通常の星と連星系を成している時は相手の星の物質がブラックホールの重力につかまって落ちていき、降着円盤が形成される。そして降着円盤内の物質が中心に向かってゆっくりと落ちていくときに解放される重力エネルギーを電磁放射を通して観測することができる。このとき観測されるX線は次のような特徴がある。

- 中性子星より低エネルギーX線側が明るく、かつ高エネルギー側まで放射スペクトルが伸びている

中性子星とブラックホールのスペクトルの違いは表面の有無によるものである。中性子星の場合、最後には物質が勢いよく表面にぶつかる。その結果、降着円盤からの放射よりも2倍ほど高い 2keV のX線を出す。一方、ブラックホールには表面がないので物質はそのまま吸い込まれこの成分は観測されない。

- 不規則で非常に速い時間変動を示す

時間変動 Δt と半径 R には $R \leq c\Delta t$ という関係がある。さまざまなタイムスケールの時間変動が観測されているがくちょう座X-1のもっとも短い変動は数msなので、 $R \leq 300\text{km}$ となる。§2.3で求めるがくちょう座X-1の質量は $9.5M_{\odot}$ 以上なので、これだけの質量がたった半径300kmの空間内にあることからブラックホールである可能性を示している。

- 多くは数年～数10年に1度、突然数ケタも明るくなる

これはtransient現象またはX線Novaといわれ、図2.1のように数日でX線の明るさが10倍以上になり、数ヵ月かかって次第に暗くなっていく。一般的にだいたい数十年のタイムスケールで準周期的に起こる。

銀河系内でX線で明るく輝いているものの多くは、星が老いた後にできる半径10～10000kmの高密度コンパクト星であり、白色矮星、中性子星、ブラックホールがある。白色矮星は自己重力を電子の縮退圧で支えているので質量の上限は $1.4M_{\odot}$ 程度である。また中性子星は中性子の縮退圧で支えていて $3M_{\odot}$ 程度である。よって、コンパクト星で $3M_{\odot}$ 以上のものは縮退圧で支えることができずに重力崩壊を起こしブラックホールになる。このことからコンパクト星で $3M_{\odot}$ を超えることがブラックホールとされる有力な条件である。

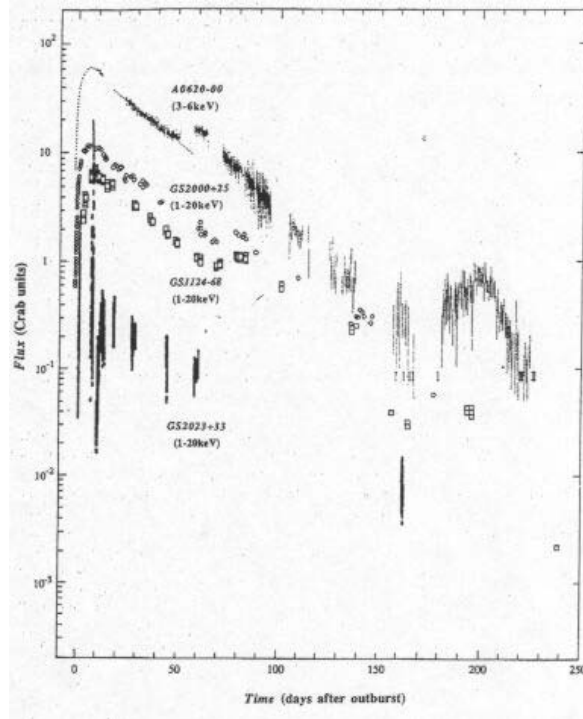


図 2.1: 4つの明るいブラックホール transient 天体のライトカーブ

2.2.2 銀河中心の巨大質量ブラックホール

銀河の中にはその中心の非常に小さな領域(数 pc)で莫大な光度($10^{43-47} \text{ erg s}^{-1}$)を発する活動銀河核 (AGN) と呼ばれるものがある。AGN の放射波長帯は電波、可視光、X 線、 γ 線と広い範囲にわたる。この中心には質量が $10^5-9 M_{\odot}$ の巨大なブラックホールあって、そこへ落ち込む物質の重力エネルギーの解放が活動の源になっていると考えられている。AGN はセイファート銀河、キューサー、電波銀河など一部の銀河であるが、現在ではほぼ全ての銀河の中心にこのような巨大ブラックホールが存在すると考えられている。

2.3 ブラックホール候補星の発見と同定法

1960 年代にはくちょう座の方向から X 線 (はくちょう座 X-1) が観測されたが当時の X 線検出器の位置分解能は非常に悪く位置を特定することはできなかった。しかし 1971 年に小田らによるすだれコリメータの観測で数秒角の精度で位置が決定され、はくちょう座 X-1 の位置に O9 型の 9 等星 (HD226868: 青色巨星) が存在することがわかった。そしてこの星の電波の光度変化は、はくちょう座 X-1 と同期していることから X 線源とこの星は公転周期 $P=5.6$ 日の連星系を成していることがわかった。HD226868 の相手の X 線源は、次のようなことからブラックホールではないかと考えられている。

連星系のパラメータを特徴づけるものに質量関数がある。これは観測量から直接計算できるので広く利用されている。 M_1 と M_2 をそれぞれ高密度天体と相手の星 (HD226868) の質量とすると、図 2.2 から

$$a = \frac{M_1 + M_2}{M_1} a_2$$

が成り立つ。 i は連星系の傾斜角である。またスペクトルのドップラー偏移から視線方向の速度 v_n がわかり、

$$v_n = \frac{2\pi}{P} a_2 \sin i$$

ケプラーの第 3 法則は、万有引力定数を G とすると

$$\frac{G(M_1 + M_2)}{a^3} = \left(\frac{2\pi}{P} \right)^2$$

なのでこれらの式からはくちょう座 X-1 の質量関数は、

$$f(M) \equiv \frac{M_1^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{P v_n^3}{2\pi G} \simeq 0.252 M_\odot$$

となる。HD226868 の観測から $i \sim 30^\circ$ 、 $M_2 \sim 30 M_\odot$ と見積もられている。したがって $M_x > 9.5 M_\odot$ となり、これは中性子星の質量の上限である $3 M_\odot$ を超えているのではくちょう座 X-1 はブラックホールである可能性が高い。これまでの X 線観測で 40 個ほどのブラックホール候補星が見つかっており、そのうちの約 20 個は質量が $3 M_\odot$ 以上であると確認されている。

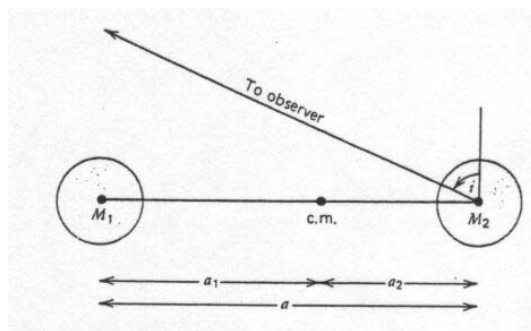


図 2.2: 軌道面から見た連星系のパラメータ

2.4 ブラックホール連星の X 線放射スペクトルの特徴

多くのブラックホール連星は low/hard state と high/soft state という 2 つの異なったスペクトル状態をとることが知られている。さらに「ぎんが」衛星や RXTE 衛星によって、

very high state や extreme soft state などの新たな状態が見つかった。low/hard state を含めたこれらの4つの状態のスペクトルを図2.3に示す。ここではこれらの4つの状態と観測されたそれぞれのスペクトルを再現するモデルについて述べ、最後に low/hard state と very high state のときによく現れる準周期的変動 (QPO) について説明する。

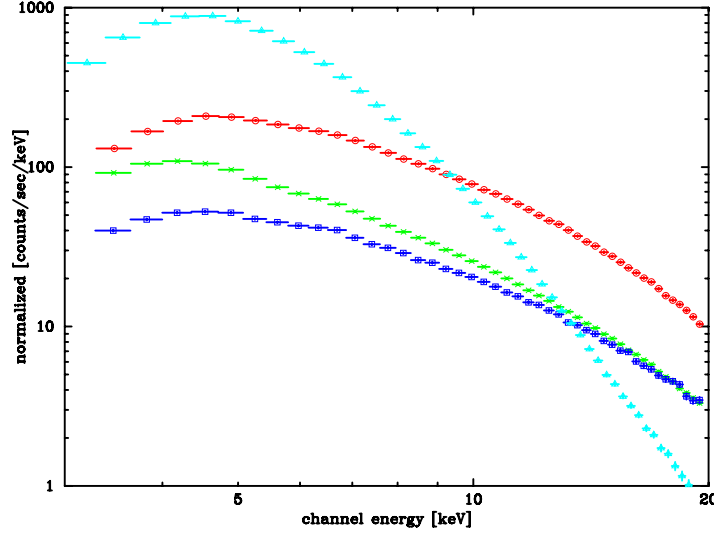


図 2.3: ブラックホール連星候補 4U 1630–47 で観測されたそれぞれの状態のスペクトルを示す。青が low/hard state、緑が high/soft state、赤が very high state で水色が extreme soft state のスペクトル。

2.4.1 low/hard state

X線光度が低いときによく観測されることから、相手の星からの質量降着率が小さいときに起こると考えられている。このときブラックホールから離れたところに光学的に厚く幾何学的に薄いディスクがあり、その内側は光学的に薄いプラズマのような状態になっていると考えられている。放射メカニズムははっきり分かっていないが、光学的に薄い移流優勢降着流 (ADAF) モデルなどがある。low/hard state のスペクトルは単一の power-law モデルに星間吸収を表す wabs モデルをかけたもので再現される。典型的なべき (photon index) は 1.4–1.7 であり高エネルギー側は 1MeV 付近までのびている。また速い時間変動を示す。ただし本研究では low state のデータについては扱っていない。

power-law モデル

power-law のスペクトルは

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

になる。ここで K は normalization、つまり単位時間・単位エネルギー・単位面積あたりの放射光子数で、 α は photon index と呼ばれる無次元量である。このスペクトルは log-log スケールをとると傾き $-\alpha$ の直線になる。この α の値によって、どのようなスペクトルかを大まかに見積もることができる。 α が大きい場合スペクトルの傾きは急なので、低エネルギー側の光子が多く高エネルギー側は少ないというソフトなスペクトルになる。一方、 α が小さいときは、傾きは緩やかになってハードなスペクトルであることを示す。

wabs モデル

X 線が星間物質によって受ける光電吸収をモデル化したものである。光電吸収を受ける確率は

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

となり、 $\sigma_{ph}(E)$ は光電吸収断面積であり、主要元素の断面積を組成比に従って重みをつけてたし合わせたものである。パラメータは水素柱密度 $N_H = nd$ (n : 水素密度、 d : 吸収体の視線方向の厚さ) の 1 つであり、 N_H は主要元素である水素が単位面積あたり視線方向にどれだけあるかの目安である。銀河系の中には $10^6 K$ 以下の低温ガスがあるので、観測される X 線スペクトルは吸収を受けて低エネルギー側で下がっている。1–2 keV の X 線に対しては主に O、Ne、Mg、Si、Fe などの吸収が支配的である。また典型的に銀河面の方向では $N_H = 10^{21 \sim 23} \text{ cm}^{-2}$ である。宇宙空間で起こるどのような放射も星間吸収を受けるので、wabs モデルは全てのスペクトルフィッティングモデルに含まれる。

2.4.2 high/soft state

質量降着率が高いときは high/soft state と呼ばれ、光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤が形成されていると考えられている。このとき観測されるスペクトルは soft 成分と hard 成分から成る。soft 成分は降着円盤からの熱的な放射と考えられ (Makishima et al. 1986)、そのような降着円盤からの黒体放射を近似した multicolor disk モデル (MCD モデル; Mitsuda et al. 1984) でよく再現される。一方、hard 成分の起源はよく分かっていないが、ブラックホールのまわりにあるとされる薄い超高温プラズマによって soft 成分の一部が逆コンプトン散乱したものではないかと考えられている。hard 成分も low/hard state と同様に power-law でほぼ表されるが、そのべきは low/hard state のものよりも大きく 2–2.5 である。またブラックホール連星の X 線スペクトルでは鉄の吸収端がよく観測される。その吸収は broad であるともいわれており (Ebisawa et al. 1994)、smeared edge モデル (smedge モデル) で表される。

MCD モデル

MCD モデルは幾何学的に薄く光学的に厚い降着円盤が黒体放射するときのスペクトルを表したモデル (Mitsuda et al. 1984、Makishima et al. 1986) である。パラメータは降着円盤の最も内側の温度 T_{in} と normalization の2つである。

ビリアル定理により、解放された重力エネルギーの半分がケプラー運動の回転エネルギーになり、もう半分がディスクからの黒体放射になる (これが standard disk の概念)。また降着円盤は半径によって温度が異なるので MCD モデルはいろいろな温度での黒体放射を足しあわせたものになっている (図 2.4)。このため MCD モデルは低エネルギー側のスペクトルの傾きが黒体放射に比べてゆるやかである。ここで中心からの半径 r 、厚さ dr の微小部分からの放射について考える。温度 T において単位時間、単位面積あたりの黒体放射のエネルギー放射は σT^4 になる (ステファンボルツマン定数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-5}$ erg/cm²/K⁴/s)。質量降着率を $\dot{M}$ (半径によらず一定) とすると、ビリアル定理より微小半径部分 dr の重力エネルギーの半分がディスクの上下から黒体放射されるとすると、

$$2 \cdot 2\pi r dr \cdot \sigma T(r)^4 = \frac{1}{2} d \left(-\frac{GM\dot{M}_x}{r} \right)$$

という関係式になる。したがって温度 T は半径 r の関数で表され、

$$T(r) = \left(\frac{3GM\dot{M}_x}{8\pi\sigma r^3} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.1)$$

降着円盤からの全光度は $T(r)$ を用いて

$$L_{\text{disk}} = 2 \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} 2\pi r \cdot \sigma T(r)^4 dr = 4\pi r_{\text{in}}^2 \cdot \sigma T_{\text{in}}^4 \quad (r_{\text{out}} \rightarrow \infty) \quad (2.2)$$

となる。また観測されるフラックスは傾斜角 i 、天体までの距離 D を用いて

$$f_{\text{disk}} = \frac{L_{\text{disk}}}{4\pi D^2} \cos i = 2 \frac{\cos i}{D^2} \cdot 2\pi r_{\text{in}}^2 \cdot \sigma T_{\text{in}}^4$$

となる。

スペクトル観測から T_{in} 、 L_{disk} が分かるので式 (2.2) から r_{in} を求めることができる。理論的には Schwarzschild 半径の3倍まで安定した回転軌道が存在すると考えられており、 $r_{\text{in}} \sim 3r_s \sim \frac{6GM}{c^2}$ とすることが多い。よって、これからブラックホールの質量が得られる。これは光の観測で求めたものとよく一致している。

MCD モデルでは一般相対論を考慮していないために r_{in} は真の値 R_{in} と異なり、補正する必要がある。一般相対論の効果をいれると、 $T(r)$ は次のようになる。

$$T(r) = \left(\frac{3GM\dot{M}_x}{8\pi\sigma r^3} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{R_{\text{in}}}{r}} \right) \right)^{\frac{1}{4}}$$

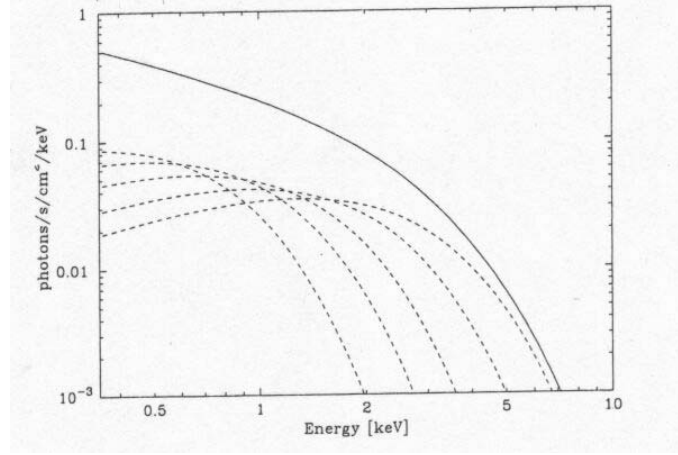


図 2.4: MCD モデルの $T_{\text{in}}=1\text{keV}$ のときの X 線スペクトル (点線はそれぞれ $r/r_{\text{in}}=1$ -1.6(1.3)、1.6-2.5(2.0)、2.5-4.0(3.2)、4.0-6.3(5.0)、6.3-10(7.9) での単温度黒体放射の X 線スペクトルを表している)

$T(r)$ は $r=(7/6)^2 R_{\text{in}}$ で最大であり、

$$T_{\text{max}} = \left(\frac{3GM\dot{M}_x}{8\pi\sigma R_{\text{in}}^3} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot 6^{\frac{3}{2}} \cdot 7^{-\frac{7}{4}}$$

になる。また全光度は

$$L_{\text{disk}} = 4\pi R_{\text{in}}^2 \cdot \left(\frac{7}{3} \right) \cdot \left(\frac{7}{6} \right)^6 \sigma T_{\text{max}}^4 \quad (2.3)$$

となる。X 線スペクトルの高エネルギー側で落ちる様子から最大 T_{max} がわかる。そこで $T_{\text{in}}=T_{\text{max}}$ とすると式 (2.2) と式 (2.3) から $r_{\text{in}}=\sqrt{7/3} \cdot (7/6)^3 \cdot R_{\text{in}}=2.43R_{\text{in}}$ になる。(Kubota et al. 1998)

さらにディスクの垂直方向の電子散乱のために、X 線スペクトル解析では実際のディスク表面の温度 effective temperature よりも高い color temperature が観測される。 $\kappa=T_{\text{col}}/T_{\text{eff}}$ とすると、半径 r の微小半径部分のディスクの光度は

$$dL(r) = 4\pi r dr \cdot \sigma T_{\text{eff}}(r)^4 = 4\pi r dr \cdot \sigma T_{\text{col}}(r)^4 \cdot \kappa^{-4}$$

となるので、電子散乱によって r_{in} は見かけ上 κ^{-2} だけ小さくなる。ブラックホール連星の場合、 $\kappa \simeq 1.7$ -2.0 である。(Shimura & Takahara 1995)

これらの2つの補正を考慮すると、 $\xi=2.43^{-1}=0.412$ として

$$R_{\text{in}} = \kappa^2 \cdot \xi \cdot r_{\text{in}} = 1.19 r_{\text{in}} \quad (2.4)$$

となる。ただし $\kappa=1.7$ として計算している。本研究ではこの式を用いて R_{in} を求めている。

〈smedge モデル〉

smedge モデルは broad な吸収を表している。吸収が起こるエネルギー E_{smedge} 、吸収の強さを表す τ_{smedge} 、吸収端の広がり示す W_{smedge} 、光電子の散乱断面積のべき (ふつうは -2.67 で、今回はこの値に固定) の 4 つがあり、式は次のようになっている。

$$M(E) = \begin{cases} 1 & \text{for } E < E_{\text{smedge}} \\ \exp \left(\left(-\tau_{\text{smedge}} \times \left(\frac{E}{E_{\text{smedge}}} \right)^{-2.67} \right) \left(1 - \exp \left(\frac{E_{\text{smedge}} - E}{W_{\text{smedge}}} \right) \right) \right) & \text{for } E > E_{\text{smedge}} \end{cases}$$

X 線スペクトルのエネルギー E が E_{smedge} よりも低いときは影響は受けないが、 E_{edge} より高いとき、X 線スペクトルは幅 W_{smedge} でなまされる。また 2keV 以上では主に Fe-K edge が観測され、鉄の電離度により E_{smedge} はだいたい 7~9keV の間で変化する。

2.4.3 very high state

理論的に X 線光度がエディントン光度 L_E の $\sim 10\%$ をこえると、放射圧がガス圧より大きくなり standard disk の解が不安定になるといわれている。high/soft state にあるブラックホール連星の X 線スペクトルは前節の標準的な描像でよく合うものが多いが、ぎんが衛星や RXTE 衛星によって非常に光度が高いときにはこの描像では説明できない 2 つの状態が見つかった。1 つは very high state と呼ばれる high/soft state よりハードなスペクトル状態で、もう 1 つは非常にソフトなスペクトルを示す extreme soft state である。ここではまず very high state について説明し、後者の状態については次節で述べる。

very high state は光度が非常に高いときに見られる。そのスペクトルは high/soft state に比べハードになっているが、power-law のべきは low/hard state のものより大きい。このため steep power-law state とも呼ばれる (McClintock, Remillard 2003)。このスペクトルを前述の標準降着円盤モデルでフィッティングすると、ブラックホール連星としてふさわしくないほど T_{in} が高く r_{in} が小さくなる。マイクロキューサー GRO J1655-40 と XTE J1550-564 の very high state の詳細な解析によって、この状態は黒体放射された光子が高エネルギー光子によって逆コンプトン散乱されることから生じると考えられる (Kubota et al. 2001, 2004)。そしてこの論文では、逆コンプトン散乱を考慮すると r_{in} は high/soft state の時期の値と一致することが報告されている。ディスクの不安定性から内側でコロナが形成されて高エネルギー電子ができると考えられている。この逆コンプトン散乱を表すモデルとしては compbb モデルと thcomp モデルの 2 つがある。

compbb モデル

コンプトン散乱した単一温度の黒体放射を表すモデルである (Nishimura et al. 1986; 図 2.5)。つまり黒体放射で発生した低エネルギーの光子が高温プラズマとコンプトン散乱して高エネルギー側に叩き上げられる現象である。この高温プラズマの起源を説明するモデルには、降着円盤の内側が放射圧によって光学的に薄く 10^9K ほどの高温になる「hot disk モデル」と、高温のコロナが光学的に厚いディスクをはさみこむ構造をした「hot corona モデル」がある。compbb のパラメータは黒体放射の温度 T_{bb} 、高温プラズマの電子温度 T_e 、トムソン散乱の光学的な深さ $\tau = n_e \sigma_T d$ (n_e : 電子密度、 σ_T : トムソン散乱断面積、 d : 散乱体の厚さ)、normalization の4つである。本研究では、 $T_{\text{bb}} = T_{\text{in}}$ としている。

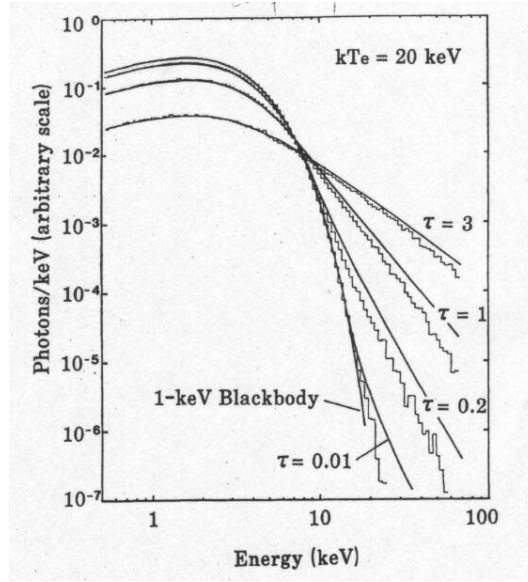


図 2.5: $kT_e=20\text{keV}$ のプラズマ ($\tau=0.01\sim 3$) による 1keV の黒体放射のコンプトン散乱。直線は compbb モデルで、階段関数はモンテカルロシミュレーションの結果を表す (Nishimura et al. 1986)

thcomp モデル

compbb モデルと異なり、seed photon は MCD 放射として計算する熱的なコンプトン散乱を表すモデルで (Zycki et al. 1999)、Kompaneets equation の解に基づいている。本研究では kT_e 以下のスペクトルの形を表す Γ_{thc} と normalization の2つをフリーパラメータとし、反射成分などは考慮しない。さらに MCD 放射が逆コンプトン散乱を受けると仮定しているので、seed photon の温度は MCD モデルの T_{in} と同じ値に固定する。thcomp モデルは compbb モデルに比べてより良いフィッティングが期待できる。今回は解析環境

の諸事情により 4U1630–47 についてのみ thcomp モデルを使っているが、どちらのモデルを使用しても主な結果にそれほど影響はみられない (Kubota et al. 2004)。

2.4.4 slim disk モデル

非常に光度が高いときにみられる high/soft state よりもソフトな extreme soft state のスペクトルを説明するモデルとして slim disk モデル (Abramowicz et al. 1988; Watarai et al. 2000) がある。このモデルでは降着円盤は光学的に厚く幾何学的にも厚い状態である。このような降着円盤からの放射は standard disk より放射効率が低下して移流冷却が優勢になると考えられる。移流冷却とは解放された重力エネルギーが放射されずに、物質の運動エネルギーのまま中心のブラックホールに落ちていく現象である。Watarai et al. (2000) では slim disk から放射されるスペクトルを計算しており、その特徴は次のようになっている。

- standard disk に比べて温度勾配がゆるやか (図 2.6a) なので、スペクトルはソフトになる (図 2.6b)
- r_{in} が $3r_s$ より小さい
- 標準降着円盤モデルでフィットすると $r_{\text{in}} \propto T_{\text{in}}^{-1}$ 、つまり $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係がある

非常に光度が高いときには、降着円盤の内側が放射圧によって少し膨らんで slim disk の状態になっていると考えられる (Kubota et al. 2004)。

(a) 降着円盤の表面温度の半径依存性

(b) スペクトル

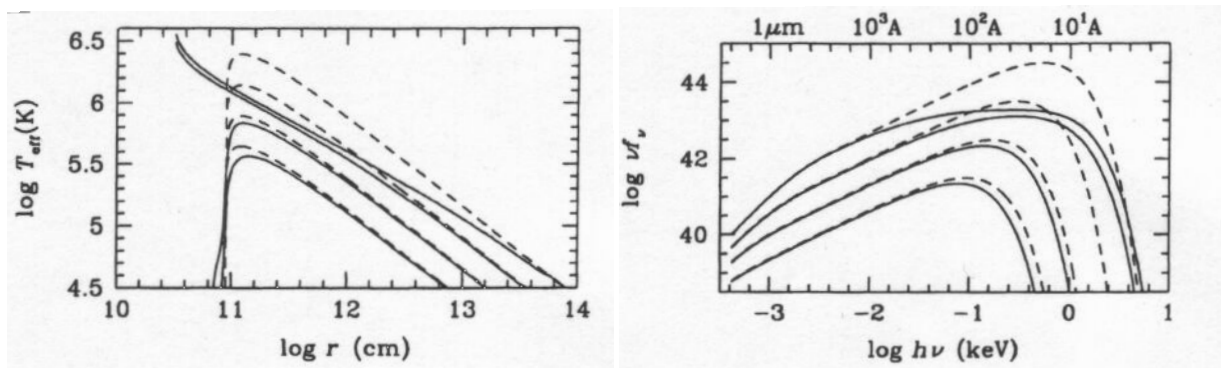


図 2.6: slim disk モデル (点線) と standard disk モデル (実線) の温度特性とスペクトルを示す。上の線ほど質量降着率が大きい (Watarai et al. 2000)

***p*-free model**

MCD モデルを数学的に一般化したモデルで、式 (2.1) の温度の半径依存性を

$$T(r) = T_{\text{in}} \left(\frac{r}{r_{\text{in}}} \right)^{-p}$$

に置き換える。 p はフリーパラメータである。 $p=0.75$ のときは MCD モデルに対応し、 $p < 0.75$ では同じ T_{in} の MCD モデルのスペクトルよりソフトになる。つまり、 p が小さいということは降着円盤の内側の放射効率が低いことを示している。

2.4.5 QPO

ブラックホールや中性子星の X 線強度は変動することが観測されている。この変動は周期的ではないが全くランダムでもないので、準周期的変動 (Quasi Periodic Oscillation; QPO) と呼ばれている。QPO に対してフーリエ変換を行い、パワースペクトルをとると図 2.7 のように幅の広がったピークが出る。逆に、このように幅の広がったピークを示すパワースペクトルを持つ X 線現象のことを QPO と定義することもある。一般的に QPO は Lorentzian モデルを使って再現され、 $Q = \nu / \Delta\nu > 2$ (ν は QPO の中心周波数、 $\Delta\nu$ は半値幅) を満たすものを QPO であるとすることが多い。中性子星で観測される QPO は当初は中性子星の高速回転に関係していると考えられたが、今では降着円盤の不安定性が原因であるとされている。一方、ブラックホールでは QPO は主に low/hard state と very high state で観測されているが、その起源はよく分かっていない。Dieters et al. (2000) などによると、これらの state のときのパワースペクトルはだいたい図 2.7(a) のように flat-top 型になり、high/soft state のときには power-law 型 (図 2.7(b)) のようになる。また GRO J1655–40 や XTE J1550–564 などのいくつかのブラックホール連星の very high state では QPO 周波数と X 線 flux は正相関することが分かっている (Sobczak et al. 2000; Remillard et al. 2002)。

Lorentzian

ローレンツ関数を表したモデルである。Lorentzian モデルには 3 つのパラメータがあり、LN は normalization で LC は中心周波数 (前述の ν)、LW は半値幅 ($\Delta\nu$) を表す。式は

$$Y = \frac{LN}{1 + (2(X - LC) / LW)^2}$$

である。

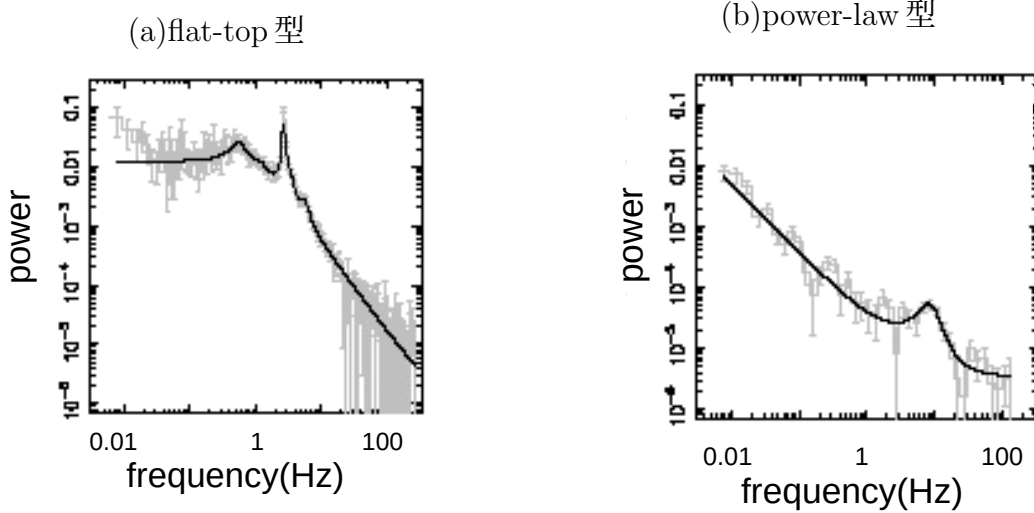


図 2.7: 4U 1630-47 の low/hard state(a) と high/soft state(b) でみられた QPO(Dieters et al. 2000)

2.5 Kubota et al. (2001, 2004) による分類

Kubota et al. (2001, 2004) ではマイクロネーサー GRO J1655-40 と XTE J1550-564 の high/soft state と very high state の解析結果を報告している。どちらの天体もディスク光度 L_{disk} がある臨界光度より十分低い (または T_{in} が臨界温度 1-1.2keV より低い) とき標準的な描像を満たしており、これを *standard regime* と名付けた。 L_{disk} が臨界光度に達すると、スペクトルは hard 成分が支配的になり、標準降着円盤モデルで得られる r_{in} は小さくなる。この異常な点から、この時期を *anomalous regime* としている。前述したように支配的な hard 成分は高エネルギー電子による逆コンプトン散乱で引き起こされるとして解析しなすと、半径やディスクの温度は *standard regime* の値に戻ることが確認されている。さらに XTE J1550-564 では非常に光度が高いときに L_{disk} が T_{in}^4 ではなく T_{in}^2 に比例する放射効率の低い状態が見られ、これを *apparently standard regime* とした。このとき、光学的に厚く移流冷却がきいてくる slim disk モデルの兆候を示すことも報告している。

2.6 本研究の目的

質量降着率が高いとき、ブラックホール連星は *standard regime*、*anomalous regime*、*apparently standard regime* の 3 つの状態に分類できる。2 つ目と 3 つ目の regime は標準的な降着円盤の描像から少し離れた状態として説明できる。さらに標準的な降着円盤の描像はよく理解されているので、これら 2 つの regime を特徴づけるためにこの描像を拡張す

ることは重要である。しかしながら、そのような試みは GRO J1655–40 と XTE J1550–564 のみでしか行われていない。また、この 3 状態がアウトバーストを繰り返しおこすブラックホール連星についても成り立つかは明らかでないので、約 650 日の周期でアウトバーストを繰り返すブラックホール候補星 4U1630–47 について詳しく調べた。さらに *anomalous regime* と *apparently standard regime* があらわれる条件や時期についても興味があるため 4U 1630–47 以外に数個のブラックホール候補星について解析を行い、統一的な描像について議論する。それぞれの天体については 4 章で詳しく述べる。

第3章 観測衛星

3.1 RXTE 衛星

3.1.1 概要

天文学者の Bruno Rossi にちなんで名付けられた NASA の X 線衛星 Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE) は 1995 年 12 月 30 日に Delta II ロケットによって打ち上げられた。

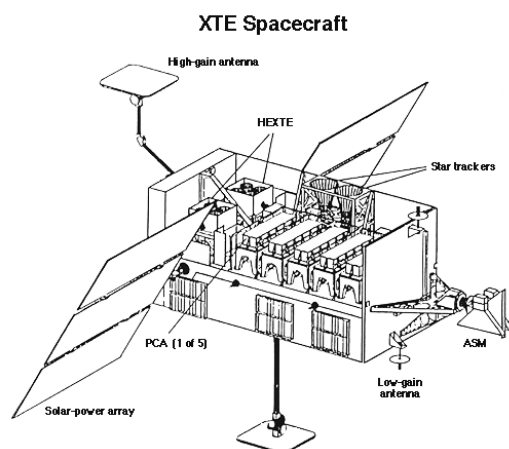


図 3.1: RXTE 衛星の全体図

RXTE の軌道は遠地点が約 580km、近地点が約 560km で傾斜角は 23° 、軌道周期は約 90 分である。RXTE は transient や X 線バーストなどが検出された特定の source のみを観測するように設計されている。1 つの天体を数年の間ほぼ毎日観測するので長期的な変動を見ることができ、ブラックホール連星などの観測に適している。3 つの観測装置、Proportional Counter Array (PCA) と High Energy X-ray Timing Experiment (HEXTE) と ALL Sky Monitor (ASM) が RXTE には搭載されているが、イメージをとることはできない。PCA と HEXTE のエネルギー範囲はそれぞれ 2–60keV、12–250keV である。ASM は 1.5–12keV の範囲で 90 分かけて全天の 80 % をスキャンしている。

3.1.2 PCA

PCA の概要

PCA は既知の X 線源の精密な観測を主な目的として Goddard Space Flight Center (GSFC) によって開発された。5つの proportional counter unit (PCU) から成り、すべてを合わせた collecting area は 6500 cm^2 と今までで最大である。図 3.1.2 に PCA の概略図を示す。

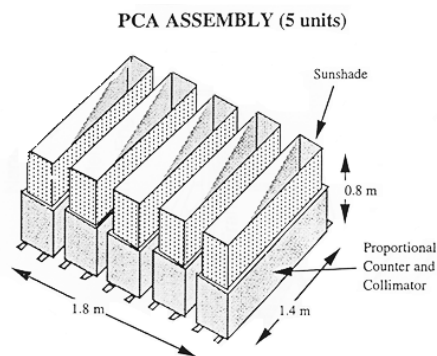


図 3.2: PCA の概略図

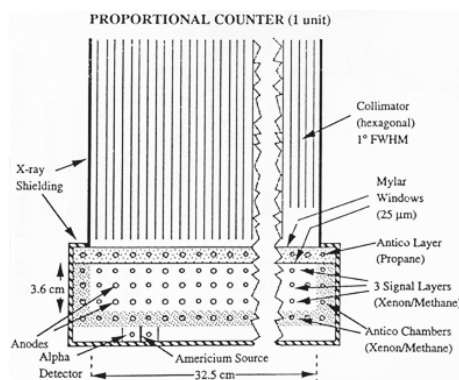


図 3.3: PCU の概略図

図 3.1.2 に示すように、それぞれの PCU にはキセノンを用いたガス比例計数管と視野を 1° に制限するコリメーターがある。ガス比例計数管はプロパン層とキセノン層 (シグナル層) に分かれていて、そのまわりには veto 層がある。シグナル層と veto 層の反同時計数をとることでバックグラウンドを減らすことができる。プロパン層はバックグラウンドである荷電粒子を除去するが、 3keV 以上の光子は通す。プロパン層の下にあるキセノン層は3つに分かれていて、一番上の層で 10keV 以下の光子の 90% が検出される。図 3.4 に5つの PCU を合わせた有効面積を、表 3.1 に PCA の諸元を示す。

PCA で得られたデータはまず EDS(Event Data Selector) に送られる。EDS は8つの Event Analyzer (EA) があって、データを加工する。6つの EA が PCA データを、残りの2つが ASM データを扱う。PCA を扱うもののうちの2つは standard mode でスペクトルデータを作る。PCA の standard mode は2つあり、Standard-1 は時間分解能 0.125s で Standard-2 は 16s の時間分解能と 129 energy channel をもつ。本研究では Standard-2 を使ってスペクトル解析を、Event mode データを使って時系列解析を行った。

ガス比例計数管の検出原理

anode が張ってあるガス室に電圧をかけて anode を陽極にし、まわりを陰極にする。X 線が入射するとキセノンと光電効果を起こして電子が発生する。電子は他のキセノンの外

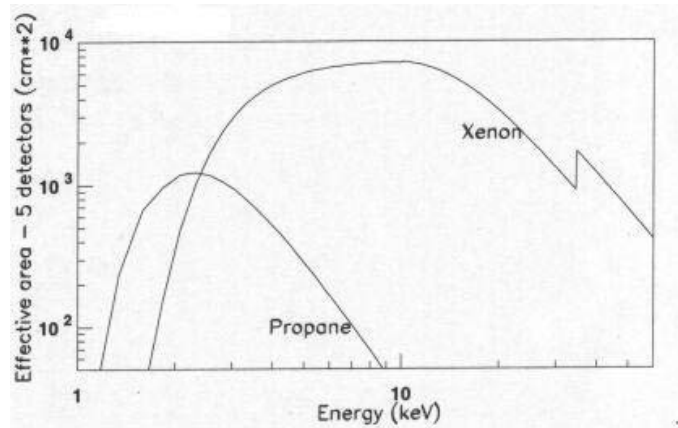


図 3.4: PCA の有効面積

殻電子を電離する。このとき発生する電子を1次電子群といい、陽極である anode へとドリフトしていく。anode 付近では電場が強いので電子はより加速されて、キセノンを電離させる。このとき生じた電子もさらに加速されて電子をたたき出す。このくりかえしによって電子なだれが発生し、増幅される。

電子なだれが anode 付近に限られるのは、電極に発生するパルスの信号の大きさが X 線の吸収される場所に関係しないようにするためである。増幅率を一定にすれば、パルスの信号の大きさが入射 X 線のエネルギーに比例する。また電子がドリフト中に吸収される確率を小さくするためにガス比例計数管には希ガスが使われる。RXTE ではキセノンをを用いることによって高エネルギー側の X 線にも感度が良くなっている。

background

バックグラウンドにはコリメータを通してやってくる目的天体外の X 線によるものと、荷電粒子や γ 線などによる非 X 線の2種類ある。非 X 線によるバックグラウンドのいくらかは veto 層やプロパン層との反同時計数によって除くことができる。この方法で取り除けなかったものは得られたデータからバックグラウンドとして引く。しかし PCA は常にバックグラウンドの観測をしているわけではないのでバックグラウンドモデルを使う。このモデルは観測を行っているときの衛星の状態や位置などに基づいて計算される。南大西洋上空には South Atlantic Anomaly (SAA) があり、ここでは荷電粒子の数が多いのでバックグラウンドが激増する。このため観測中に衛星が SAA を通ったかなどの情報は非常に重要である。またバックグラウンドモデルのデータベースは blank-sky の観測データか地球によって視野が隠されている時期のデータを使って作られる。

表 3.1: PCA の諸元

Energy range	2-60 keV
Energy resolution	< 18 % at 6keV (FWHM)
Time resolution	1 μ s、standard-2 mode では 16s
Field-of-view	1 °(FWHM)
Collecting area	6500 cm ²
Effective area	3000 cm ² at 3keV 6000 cm ² at 6keV
Layers	1 プロパン (veto) + 3 キセノン + 1 キセノン (veto)
Sensitivity	0.1 mCrab
Background	90 mCrab
Telemetry	18 kb/s

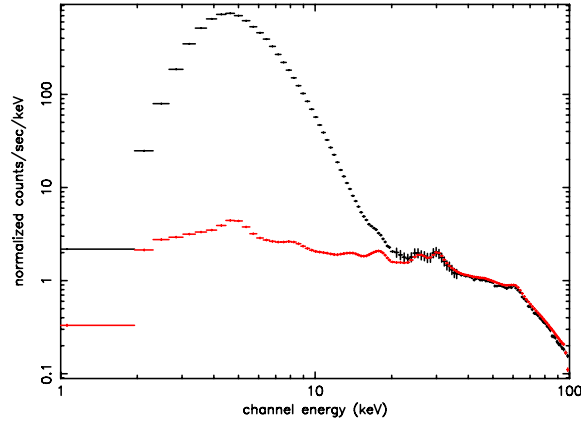


図 3.5: 4U1630-47 の X 線スペクトル (上) と見積もられたバックグラウンド (下)

3.1.3 HEXTE

HEXTE の概要

HEXTE は San Diego にある California 大学の Center for Astrophysics & Space Sciences で開発された。RXTE の他の検出器とともに HEXTE でも銀河系内だけでなく SMC や LMC にある白色矮星や中性子星、ブラックホール候補星などのコンパクト天体についてのタイミング情報を調べることができる。

HEXTE は 4 つの NaI/CsI フォスウィッチシンチレーション検出器をもった独立した 2 つの cluster(A、B) から構成されている。これらの検出器はそれぞれフォスウィッチ検出器、

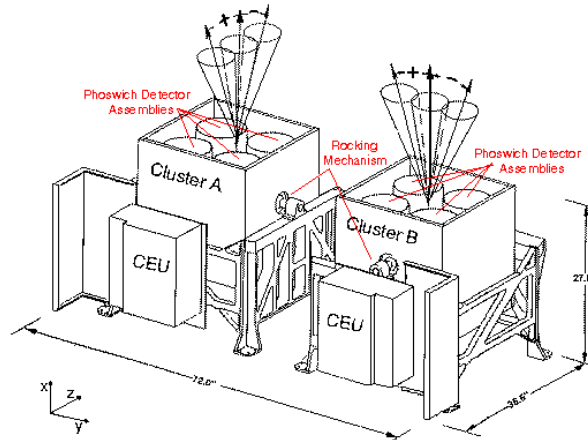


図 3.6: HEXTE の概略図

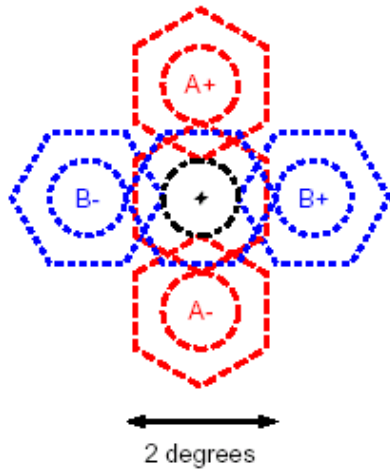
光電子増倍管、コリメータ、ゲイン調整検出器、エレクトロニクスから成る。フォスウィッチの構造を取り入れることで、CsI 結晶によって NaI 検出器の効率的なシールドができるので低バックグラウンドを可能とする。図 3.6 に示すように、線源方向に対して $\pm 1.5^\circ$ か $\pm 3.0^\circ$ で振動する。2つの cluster の振動軸が互いに直交するように配置されているので、線源のまわりの空間 4 点でバックグラウンドを測ることができる (図 3.7(a))。図 3.7(b) に示すように、この振動は 2つの cluster のうち少なくともどちらか 1つは on-source position でデータをとるように同期している。まず on-source position でデータを取り、off-source position へ移動 (例えば A+) してデータ取得、再び on-source position で観測して、もう 1つの off-source position (A-) でデータを取った後 on-source position へ戻るのが 1 サイクルである。観測している間はこのサイクルが連続的に繰り返される。on-source position でのデータ取得時間 (dwell time) は 16、32、64、128 秒から選ぶことができる。また on-source から off-source への移動などに 2 秒かかり、その間のデータ取得は禁じられている。

フォスウィッチ検出器

2つの cluster のそれぞれで 4つのフォスウィッチシンチレータと光電子増倍管によって X 線が検出される。X 線がフォスウィッチ検出器に入射すると、NaI 結晶の 1つのヨウ素原子と相互作用する。その結果、電子が励起されてこれが基底状態に戻るときに差分エネルギーをシンチレーション光として放出し、光電子増倍管で増幅される (シンチレーション光子の数は入射 X 線のエネルギーに比例)。

荷電粒子が入射した場合も光が放出されるが、このようなイベントはエレクトロニクスで除去する。横方向から入射した荷電粒子も cluster のまわりにある半同時計数検出器によって除くことができる。さらに検出器の正面からきた宇宙線は一般的に NaI と CsI 結

(a)



(b)

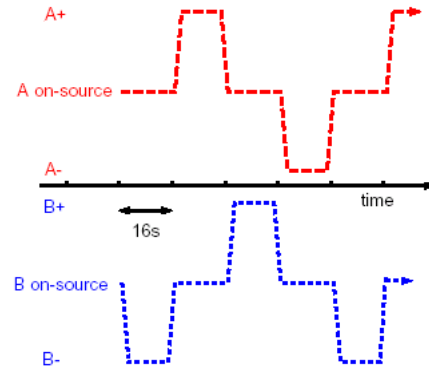


図 3.7: (a) ターゲットとバックグラウンドの視野。円は FWHM response で六角形は視野の境界である。(b) 2つの cluster のターゲット/バックグラウンド観測の切替えのタイミングパターン (1.5° の振動、16s の on-source dwell time を仮定している)。

表 3.2: HEXTE の諸元

Energy range	12–250 keV
Energy resolution	$\Delta E/E \sim E^{-0.5}$ 、15 % at 60keV
Field-of-view	2.2°(FWZI)、1°(FWHM)
Detector material	NaI、CsI
Net detector area	$2 \times 890 \text{ cm}^2$
Count rate from Crab Nebula(12–250keV)	250 count/s/cluster
Count rate from internal background(12–250keV)	90 count/s/cluster
Source/background dwell time	16 to 128 s
Calibration source	^{241}Am (lines at 17 and 60 keV)
Gain variation	< 1 %
Detector operating temperature	17–27 °C
Weight	390 kg
Operational power	45 W
Allocated telemetry rate	5000 bit/s (average)

FWZI = Full Width at Zero Intensity

晶の両方で相互作用するので欲しいイベントと区別することができる。

2つの結晶内で生じたシンチレーション光は立ち上がり時間が違うので (NaI:0.25 μ s、CsI:0.63 μ s) 区別可能である。したがって、光電子増倍管からの信号の波形をつかって NaI でエネルギーロスしたイベント (=欲しいイベント) 以外を除くことができる。除去されたイベントはどちらの結晶でも反応した荷電粒子や NaI 結晶で部分的にエネルギーを落とした X 線である。

3.1.4 ASM

PCA とは異なり、突発的に出現する X 線新星のような現象を発見してすばやくデータをとることと、X 線源の長期変動の観測を目的にしている。3つの scanning shadow detector (SSC) から成り、それぞれの SSC はキセノンの 1 次元位置検出型比例計数管である。2つの SSC は ASM の回転軸に対して垂直でお互いに 12 °ずつ傾いており、もう 1 つは回転軸方向を見ている。エネルギー範囲は 1.5-12keV で 6 °× 90 °のコリメータがついている。ASM の大きな特徴は互いに傾いた細長い視野 (criss-cross) を持っていることである。これを使うと広範囲の X 線源を観測でき、その位置を精度よく決めることができる。表 3.3 に ASM の諸元を示す。

ASM データから得られた light curve は横軸が MJD(Modified Julian Date) になっている。MJD は 1858 年 11 月 17 日を 0 日とする通日である。通常の暦には不連続な部分があるので、MJD のような連続性のある絶対的な日付は便利でよく使用される。

表 3.3: ASM の諸元

Energy range	1.5-12 keV
Energy resolution	3 channels in 1.5-12 keV
Positional resolution	3' × 15'
Angular resolution	0.2 degree
Effective area	90 cm ² (3 detectors)
Field-of-view	6 °× 90 °
Sensitivity	20 mCrab in 90 min

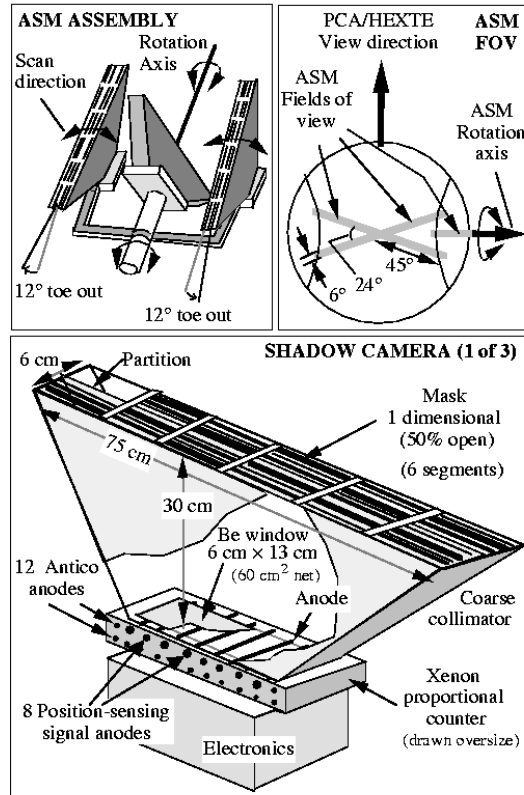


図 3.8: 3つの SSC の位置関係 (左上)、ASM の視野 (右上) と SSC の概略図 (下)

3.2 ASCA 衛星

3.2.1 概要

「あすか」衛星は、「はくちょう」(1979年2月打ち上げ)、「てんま」(1983年2月打ち上げ)、「ぎんが」(1987年2月打ち上げ)に次ぐ我が国4番目のX線天文衛星である。宇宙科学研究所(現JAXA宇宙科学研究本部)のM-3SII型ロケット7号機によって1993年2月20日に打ち上げられ、近地点が約520km、遠地点が約620kmの軌道に投入された。衛星重量は約420kgで、軌道上でオプティカルベンチを伸展して4.7mの長さになる。この衛星はX線望遠鏡(XRT; X-Ray Telescope)、X線CCDカメラ(SIS; Solidstate Imaging Spaectrometer)、撮像型蛍光比例計数管(GIS; Gas Imaging Spectrometer)から成る。4台の望遠鏡の焦点面にSISとGISがそれぞれ2台ずつ配置されており、0.5–10keVのエネルギー範囲で撮像と分光観測を行う。

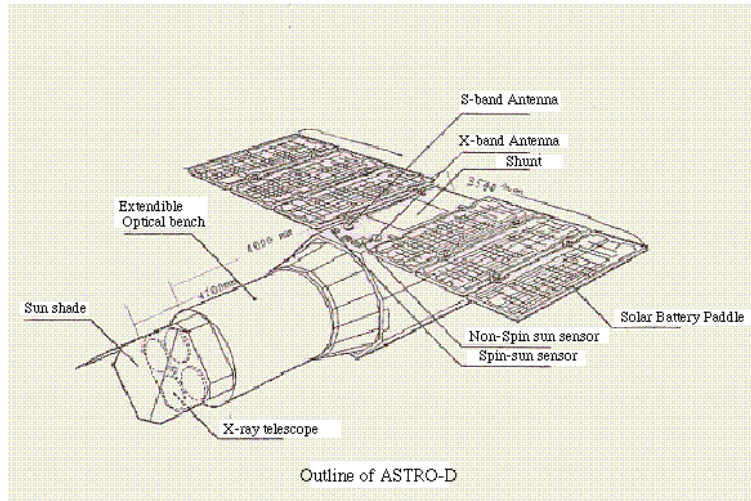


図 3.9: 「あすか」衛星の全体図

3.2.2 XRT

XRT は約 0.5–10keV までの広範囲の X 線を効率よく集光できるので、「あすか」以前ではできなかった高いエネルギーの X 線像を多くの天体から得ることが可能になった。XRT の基本は Wolter 博士が発明した斜入射型の X 線望遠鏡で、Serlemitsos 博士が発案した多重薄膜型構造になっている。これは図 3.10 に示すように、非常に薄いアルミニウムの板に金を精密にコーティングした反射鏡をたくさん集めたものである。鏡面基板を極限まで薄くすることで反射鏡の積層数を増やし、開口効率と有効面積を高めている。XRT の有効面積と諸元を図 3.11、表 3.4 にそれぞれ示す。

Energy range	0.5-10 keV
Energy resolution	SIS; $\sim 2.2\%$ (5.9keV) GIS; $\sim 8.0\%$ (5.9keV)
focal length	3.5 m
spatial resolution	180 arcsec
Field-of-view	24 arcmin (1keV) 16 arcmin (7keV)

表 3.4: XRT の諸元

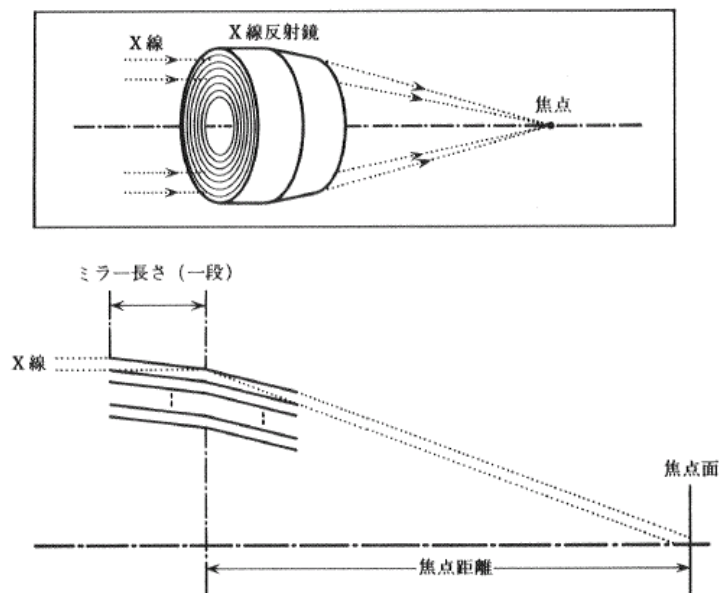


図 3.10: XRT の構造

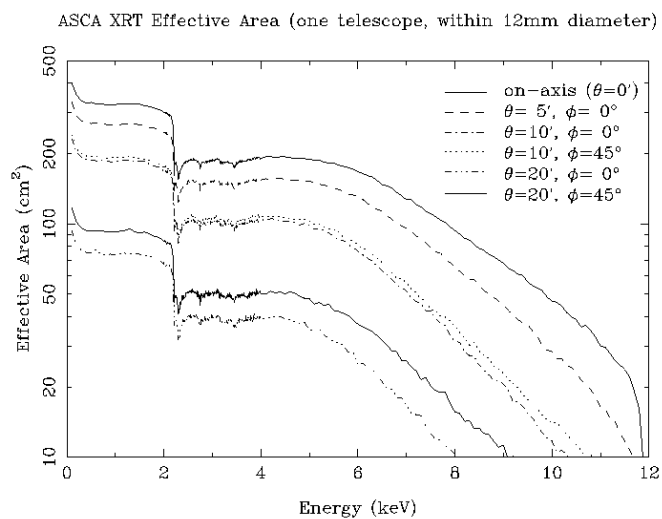


図 3.11: XRT の有効面積

3.2.3 GIS

ガス蛍光比例計数管はエネルギー分解能を低下させる従来の比例計数管の電子なだれを起こさずに、1次電子雲は電場にそってドリフト領域から発光領域へと導かれて紫外線を発光する。これを位置検出型の光電子増倍管で検出する。

GIS には観測モードとメモリチェックモードの 2 つがあり、さらに観測モードには PH モード、PH PCAL モード、MPC モードがある。PH モードが通常の観測では使われており、時間分解能は最高約 0.1ms である。また GIS はバックグラウンドが低く、非 X 線バックグラウンドは $\sim 3 \times 10^{-4}$ counts/s/cm²/keV である。

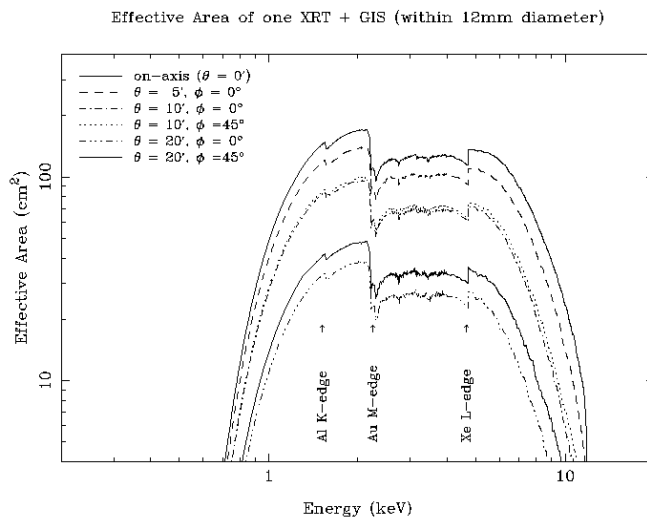


図 3.12: GIS の有効面積

第4章 データ解析と観測天体

4.1 解析方法

4.1.1 スペクトル解析

スペクトル解析にはイベントファイル、バックグラウンドファイル、Ancillary Response File(ARF ファイル)、Redistribution Matrix Function(RMF ファイル) が必要である。ARF ファイルは一次元行列 $A(E)$ を定義しており、検出器の検出効率と望遠鏡の有効面積のエネルギー依存性を表している。RMF ファイルは二次元行列 $R(P, E)$ を定義し、エネルギーをチャンネル分布に変換する行列の入ったファイルであり、エネルギー分解能などの情報を含んでいる。これらの2つのファイルを掛け合わせて検出器に依存したレスポンス関数が作られる。次式のようにレスポンス関数を通していくつかのパラメータをもつ理論的なモデル $S(E)$ からモデルスペクトルを作る。

$$M(P) = \int R(P, E)A(E)S(E)dE$$

この $M(P)$ を実際に得られたデータ $D(P)$ と比較し、次の式で示される χ^2 統計の最小値をとるモデルとパラメータを見つけることをスペクトル解析という。

$$\chi^2 = \sum_P \left(\frac{D(P) - M(P)}{\sigma(P)} \right)^2$$

$\sigma(P)$ は統計誤差 σ_{poission} と系統誤差 σ_{sys} を用いて $\sqrt{\sigma_{\text{poission}}^2 + \sigma_{\text{sys}}^2}$ と表される。多くの場合は $\sigma_{\text{poission}} \gg \sigma_{\text{sys}}$ であり σ_{sys} は無視できる。しかし大面積の RXTE/PCA で明るい天体を観測したときは σ_{poission} が小さくなり、 $\sigma_{\text{poission}} \ll \sigma_{\text{sys}}$ となってしまう。したがって、本研究の PCA データの解析では $\sigma_{\text{sys}}=1\%$ を、さらに $\sim 30\text{keV}$ でキセノンによる吸収が起こるので $20\text{--}35\text{keV}$ に 10% の σ_{sys} を入れてスペクトル解析を行った。

4.1.2 時系列解析

次式で表されるフーリエ変換を用いて、時間関数 $f(t)$ を振動周期 ω の関数 $F(\omega)$ に変換して振動の周期性を調べる解析である。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\exp(-i\omega t)dt$$

通常、 $F(\omega)$ ではなく $P(\omega) = |F(\omega)|^2$ で表されるパワースペクトルが使われる。観測された X 線強度が周期 ω で振動していれば図 2.7 のようなピークが横軸 ω に現れる。本研究では、FTOOL powspec version 1.0 を用いて 3–30keV のエネルギー範囲で 0.1–100Hz のパワースペクトルをつくり、解析を行った。

4.2 観測天体について

§2 で述べた 3 つの状態がブラックホール連星の統一的な描像として成り立つかどうかを調べるため、RXTE 衛星で観測された 6 個のブラックホール候補星 (表 4.1) について解析を行った。本研究では質量降着率が高いときのスペクトル状態に興味があるため、low/hard state やアウトバーストが起こっていないときのデータは使っていない。次に、各天体についての過去の研究結果などについて簡単に述べていく。

表 4.1: 解析に用いたブラックホール候補星のリスト

天体名	RA(2000)	DEC(2000)	スペクトル状態 ^a
4U 1630–47	16 34 01.61	-47 23 34.8	LS, HS, VHS
XTE J1859+226	18 58 41.5	+22 39 30	LS, HS
GX 339–4	17 02 49.4	-48 47 22	LS, HS, VHS
XTE J2012+381	20 12 37.70	+38 11 01.2	LS, HS
XTE J1720–318	17 19 59.06	-31 44 59.7	LS, HS
H 1743–322	17 46 15.61	-32 14 00.6	HS, VHS

^a LS ; low/hard state, HS ; high/soft state, VHS ; very high state

4U 1630–47

4U 1630–47 は 1969 年に Vela 5B によって発見され、その後で X 線衛星ウフルによって位置が特定された X 線 transient 天体であり、銀河面上にあって銀河中心に近い。位置は天球座標 (赤経赤緯) では (247.544 , -47.273)、銀河座標では (336.90 , 0.28) である。4U とはウフル第 4 カタログの X 線天体を意味し、1630–47 は赤経 16 時 30 分、赤緯 -47 度に位置することを表す。コンパクト星の質量は求められていないが、X 線の諸々の特徴は典型的なブラックホール連星と同じである。その transient 現象の周期は 600~690 日で、今までにも数回 transient 現象が観測されている。他のブラックホール連星の典型的な transient 現象の周期 10–50 年に比べて周期が短いために 4U 1630–47 はブラックホールを含む X 線 transient 天体の研究によく使われる。また transient 時の X 線スペクトルや時間変動の特徴から 4U 1630–47 は連星系の相手の星が低質量星である low-mass X-ray binary(LMXB)

と考えられている。これまでに1998年のtransientでは、 r_{in} の変動(Oosterbroek et al. 1998)やOPQの存在(Tomsick et al. 2000)などのvery high/soft stateの特徴が確認されている。

XTE J1859+226

RXTE 衛星に搭載されたASMによって1999年10月9日に発見された。連星系の相手の星が同定されているので、コンパクト星の質量が $7.6\text{--}12M_{\odot}$ と分かっている。この質量からXTE J1859+226はブラックホール連星である可能性が極めて高いといえる。また、連星系の軌道周期は9.1hrで質量関数は $f(M) = (7.4 \pm 1.1) M_{\odot}$ 、距離は11kpcである(McClintock et al. 2004)。発見直後のXTE J1859+226は200keVまでのびたlow/hard state状態にあったが、軟X線フラックスの増加に伴って硬X線フラックスが減少しはじめhigh/soft stateに遷移する。この時期に0.45–5.5HzのQPOが現れることがCui et al. (2000)で報告されている。

GX 339–4

1973年にOSO-7に搭載されたMIT検出器によって発見された。X線スペクトルのふるまいや速い時間変動などからブラックホール連星候補とされているが、コンパクト星の質量はまだ明らかでない。1997年のアウトバーストでは0.1–18HzのQPOが現れることがNowak et al. (2000)によって報告されている。また2002年に起こったアウトバーストでは数HzのQPOを伴ったvery high/soft stateが観測されている(McClintock et al. 2004)。

H 1743–322

1977–1978年のアウトバーストの間にHEAO-1とAriel V衛星によって発見された。IGR J17464–3213やXTE J17464–3213とも呼ばれる。観測されたスペクトルの特徴からブラックホール候補とされている。この天体は2003年3月21日にINTEGRALによる銀河系中心付近のスキャンによって再び観測された。このとき数日のうちにフラックスは3倍になり、15–200keVのエネルギー範囲で60–70 mCrabにまで達している(Lutovinov et al. 2004)。さらにMcClintock et al. (2004)によると、H 1743–322はvery high/soft stateの状態も過去に観測されている。

XTE J2012+381

1998年5月24日にRXTE衛星のASM検出器によって発見された。その後ASCA衛星による観測から0.5の精度で位置が分かった。可視光と赤外線の観測から、XTE J2012+381

の相手の星は赤色の星であることが Hynes et al. (1999) で報告されている。

XTE J1720–318

RXTE 衛星に搭載された ASM 検出器によって 2003 年 1 月に初めて検出された。このとき 2–12keV で約 130 mCrab から約 430 mCrab にまで増光し、low/hard state から high/soft state へ遷移した。X 線での発見直後に電波フレアも観測されている。

第5章 データ解析と結果

この章では6つのブラックホール連星候補のスペクトル解析についてまず述べ、それから時系列解析の結果を示す。

5.1 4U 1630–47

5.1.1 全観測について

RXTE/ASMによって得られた1996年–2004年の4U1630-47のライトカーブと hardness ratio を図 5.1 に示す。5つの transient 現象が約 500 日おきに起きているのがわかる。本研究では5つのアウトバーストについてRXTE/PCAで取得した322個のデータについて解析を行った(図 5.1 の上の矢印)。それぞれのアウトバーストの時期を拡大したものを図 5.2 に示す。また HEXTE データの統計が良い場合のみ、PCA データに加えて解析した。

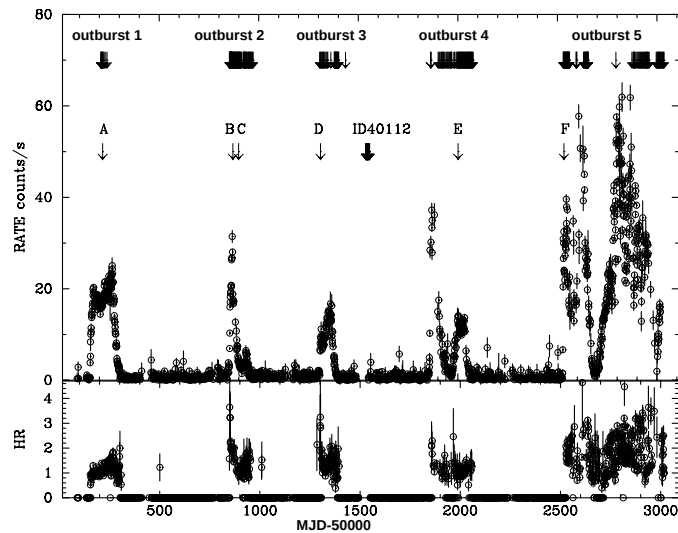


図 5.1: RXTE/ASM による 4U 1630–47 の 1996–2004 のライトカーブと hardness ratio(5–12keV/3–5keV)

図 5.1 に示した観測 ID40112 の時期は天体からの放射が弱いが、観測されたカウントレートは PCA のバックグラウンドレベルを越えている。X 線スペクトルの強度や強い鉄

ラインなどから、銀河面にある diffuse な X 線成分を観測していると考えられる。これは高温プラズマからの熱的な放射だが高温プラズマの起源はまだ明らかになっていない。この X 線は 4U1630-47 にとってはバックグラウンド (BGD) となる。そこで ID40112 の 29 個の観測データを星間吸収を受けた熱制動放射 (bremss モデル) と鉄ラインを表すガウシアンでフィットした。得られたベストフィットパラメータの平均値 (表 5.1) で上記のモデルのパラメータを固定したものを銀河面 BGD モデルとして、4U 1630-47 のスペクトルフィッティングのときに入れることにした。つまり、得られたスペクトルから普通のバックグラウンドモデルを引いたものに対して、さらにこの銀河面 BGD を引くのではなく、フィッティングモデルとして入れた。図 5.3 にそのモデルを示す。

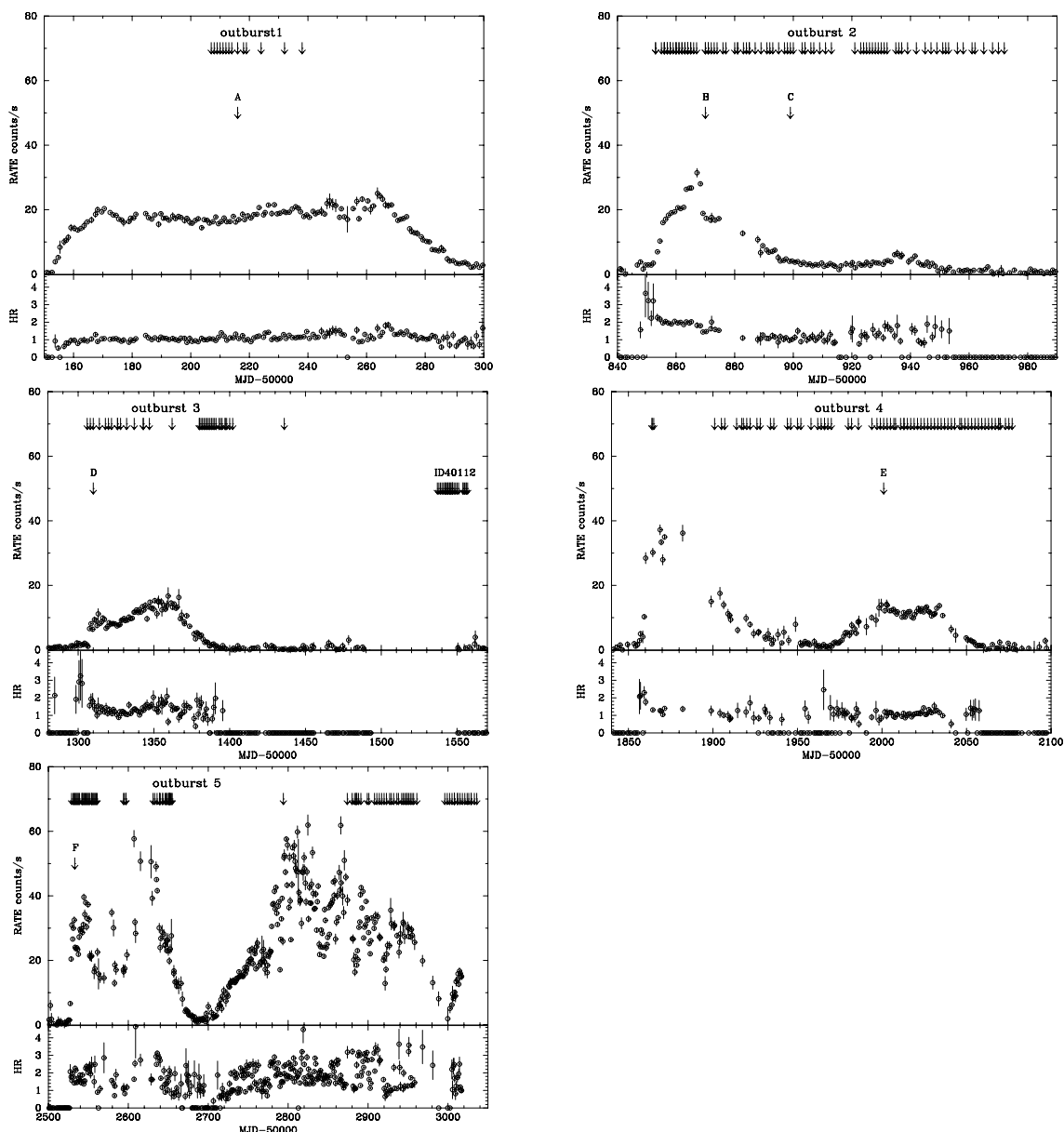


図 5.2: 図 5.1 で示した 5 つのアウトバーストの拡大図

モデル	wabs	bremss		gaussian	
	N_H	kT	normalization ^{a)}	Line E	normalization
	(10^{22}cm^{-2})	(keV)		(keV)	(photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
平均値	1.62	17.0	0.025	6.58	5.98×10^{-4}

a) bremss モデルの normalization の単位は $(3.02 \times 10^{-15} / 4\pi D^2) \int n_e n_i dV$ (cm^{-5})、 n_e と n_i はそれぞれ電子とイオンの密度で D は天体までの距離を表す

表 5.1: バックグラウンドモデルのパラメータ

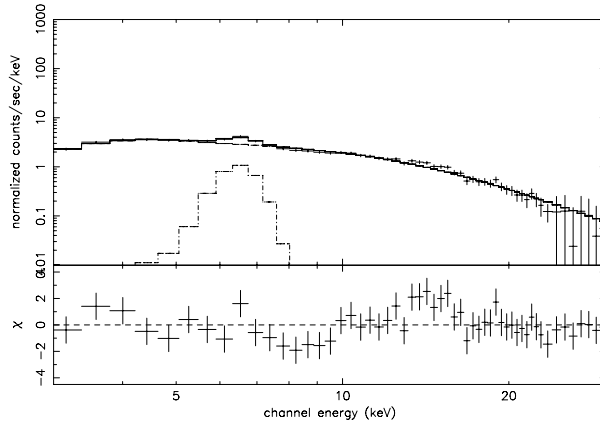


図 5.3: 銀河面 BGD モデル (クロスは ID40112 の実データ)

5.1.2 標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング

標準降着円盤から観測される X 線スペクトルは high/soft state では soft 成分と hard 成分があり、それぞれ MCD モデルと power-law モデルでよく合う。そこで観測された 4U 1630–47 の X 線スペクトルがどのように時間変動するかをみるため、MCD + power-law に星間吸収を掛けたモデルですべてのスペクトルをフィットした。まず 4U 1630–47 の星間吸収の値がよく分かっていないため N_H を固定せずにフィットし、平均値 $9.5 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ を得た。これ以降、4U 1630–47 の N_H はこの値で固定する。§2.4.2 で述べたようにブラックホール連星からの X 線スペクトルではしばしば broad な鉄の吸収端が観測されるので、上記のモデルに smedge モデルを掛けて (= 標準降着円盤モデルとする) フィッティングを行った。 E_{smedge} はだいたい 9keV となったが、これは鉄が電離しているために遮蔽効果がなくなったせいである。 τ_{smedge} はエラーが大きい 0.1–3 で、 W_{smedge} は制限できなかった。したがって、吸収端の特徴についてこれ以上議論しない。

それぞれのアウトバーストで観測された典型的なスペクトル (図 5.1 の A~F) のベストフィットパラメータを表 5.1 に示す。また図 5.4 には標準降着円盤モデルで得られた X 線光度、ベストフィットパラメータ、reduced χ^2 の時間変化をプロットしている。ただしこの天体は星間吸収が非常に強いため T_{in} が 0.8keV より低いデータは除いている。図 5.4 の横軸は outburst 1~5 のそれぞれに対して MJD-50200、MJD-50762、MJD-51038、MJD-51420、MJD-51798 である。

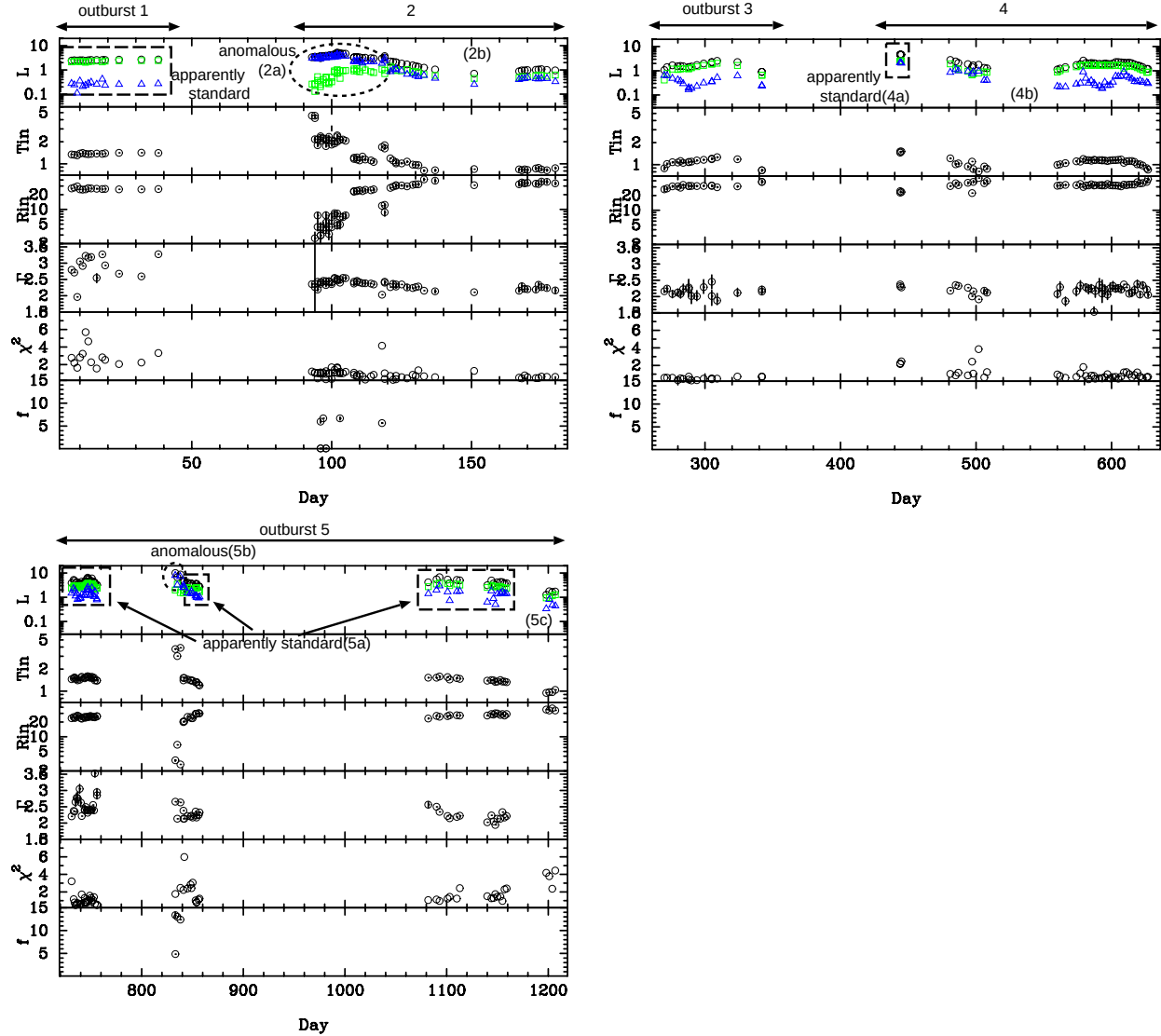


図 5.4: 標準降着円盤モデルによるフィッティング結果。左上が outburst 1 と 2、右上が outburst 3 と 4、左下が outburst 5 である。3 つの図は上から X 線光度 (単位は $10^{38} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$)、 T_{in} (keV)、 R_{in} (km)、power-law のべき Γ 、reduced χ^2 、QPO 周波数 (Hz) を表している。X 線光度では黒が L_{tot} 、緑が L_{disk} 、青が L_{pow} である。

表 5.2: それぞれのアウトバーストのベストフィットパラメータ

モデル	N_{H} (10^{22} cm^{-2})	T_{in} (keV)	R_{in} (km)	Γ_{ph}	$N_{\text{thc}},$ Γ_{thc}	$L_{\text{disk}}/L_{\text{thc}}/L_{\text{pow}}$ ($10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)	E_{smedge} (keV)	τ_{smedge}	χ^2/dof
A ^{a)} (1) MCD ^{b)}	9.5	$1.39^{+0.01}_{-0.01}$	$26.4^{+0.3}_{-0.3}$	$2.55^{+0.13}_{-0.15}$	-	2.34/-/0.26	$7.16^{+0.30}_{-0.16}$	>1.00	80.3/52
B ^{a)} (2a) MCD ^{b)}	9.5	$1.17^{+0.05}_{-0.03}$	$23.0^{+1.7}_{-1.5}$	$2.37^{+0.04}_{-0.42}$	-	0.91/-/2.36	$8.31^{+0.47}_{-0.62}$	>1.00	114.7/109
THCOMP ^{b)}	9.5	$1.04^{+0.05}_{-0.07}$	$42.0^{+4.0}_{-3.2}$	2.0 (fix)	$1.07^{+0.38}_{-0.22}$ $2.73^{+0.27}_{-0.19}$	1.16/1.19/1.02	$9.00^{+0.0}_{-0.8}$	$0.39^{+0.26}_{-0.61}$	103.9/106
THCOMP2 ^{b)}	$7.50^{+0.13}_{-0.09}$	$1.17^{+0.04}_{-0.06}$	$30.3^{+2.4}_{-1.4}$	2.0 (fix)	$0.74^{+0.20}_{-0.10}$ $2.67^{+0.10}_{-0.09}$	0.95/0.94/1.02	>8.99	$0.12^{+0.87}_{-0.09}$	233.2/212
C ^{a)} (2b) MCD ^{b)}	9.5	$1.07^{+0.02}_{-0.02}$	$29.6^{+1.2}_{-1.3}$	$2.13^{+0.06}_{-0.05}$	-	1.04/-/0.66	$8.65^{+0.34}_{-0.28}$	>1.00	28.2/51
D ^{a)} (3) MCD ^{b)}	9.5	$1.02^{+0.03}_{-0.03}$	$27.9^{+1.8}_{-1.6}$	$2.24^{+0.08}_{-0.07}$	-	1.76/-/0.63	$8.81^{+0.19}_{-0.49}$	>1.00	27.4/46
E ^{a)} (4a) MCD ^{b)}	9.5	$1.15^{+0.02}_{-0.01}$	$31.8^{+0.7}_{-0.7}$	$2.29^{+0.10}_{-0.13}$	-	1.63/-/0.49	$8.68^{+0.33}_{-0.23}$	>1.00	36.4/46
F ^{a)} (5a) MCD ^{b)}	9.5	$1.49^{+0.01}_{-0.01}$	$24.7^{+0.7}_{-0.9}$	$2.65^{+0.13}_{-0.13}$	-	2.73/-/1.13	>9.00	$0.19^{+0.81}_{-0.13}$	22.8/47

a) A, B, C, D, E, F はそれぞれ観測 ID10411-01-11-00, 30188-02-20-00, 30172-01-08-00, 40418-01-03-00, 60118-01-07-00, 70417-01-02-02 に対応している

b) MCD は標準降着円盤モデルで、THCOMP は標準降着円盤モデルに *thcomp* モデルを考慮したモデル、THCOMP2 は ASCA の GIS データを加えた結果。

r_{in} は MCD モデルの normalization K_{MCD} の定義 $K_{\text{MCD}} = \left(\frac{r_{\text{in}}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{10 \text{ kpc}}{D}\right)^2 \cos \theta$ から求めた。4U 1630–47 の距離 D と傾斜角 θ は正確に決まっていないので、 $D=10\text{kpc}$ 、 $\cos \theta=1/\sqrt{3}$ と仮定している。 L_{disk} は式 (2.3) から計算し、 L_{pow} は power-law の 0.1–100keV のフラックス f_{pow} から放射が等方的と仮定して $L_{\text{pow}}=4\pi D^2 f_{\text{pow}}$ で求めている。また $L_{\text{tot}}=L_{\text{disk}}+L_{\text{pow}}$ である。

X線スペクトルの特徴の違いを見やすくするため、図 5.5 に L_{disk} と T_{in} の相関図を示す。この図で、group A は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係にしがっているため、 r_{in} が一定な標準降着円盤が成り立っていると考えられる。その他の 2 つの group はこの関係からそれている。group B のデータは L_{disk} が $1.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ 以上と非常に高く、さらに $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ ではなく $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の直線にのっている。group C では同じ T_{in} に対して group A や B のデータの L_{disk} より小さい。またブラックホール連星では T_{in} が $\sim 1\text{keV}$ であるのに対し、異常に高くなっている。X線スペクトルの特徴によって観測データを 3 つに分類することができたので、次にそれぞれの group について詳しくみていく。

group A は outburst 3 と outburst 2, 4, 5 の後半部分 (それぞれ 2b, 4b, 5c とする) を含んでいる。図 5.4 から分かるように、これらのデータでは L_{disk} が $5 \times 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$ から $2 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ に変化しても R_{in} はほぼ一定に保たれている。さらに reduced $\chi^2 \sim 1$ とフィッティングも良く合、group A の典型的なスペクトル (図 5.6(a)) は支配的な soft 成分と power-law tail から成る。以上のことから group A は標準的な降着円盤の状態にあると考えられるので、Kubota et al. (2001, 2004) にならって *standard regime* と名付ける。このときの R_{in} は $30\text{--}45 \left(\frac{D}{10\text{kpc}}\right) \left(\frac{\cos \theta}{1/\sqrt{3}}\right)^{-\frac{1}{2}} \text{ km}$ で、ブラックホールの質量は $3.4\text{--}5.1 \left(\frac{D}{10\text{kpc}}\right) \left(\frac{\cos \theta}{1/\sqrt{3}}\right)^{-\frac{1}{2}} M_{\odot}$ となった。

outburst 2 の前半部分と outburst 5 の中間部分 (それぞれ 2a と 5b とする) が group C に含まれる。このときの典型的なスペクトルを図 5.6(b) に示しており、*standard regime* のスペクトルと比較すると power-law 成分が支配的であることが分かる。group C のデータは全体的にフィッティングが悪く、 L_{pow} が非常に高い (図 5.4)。また R_{in} は 10km 以下

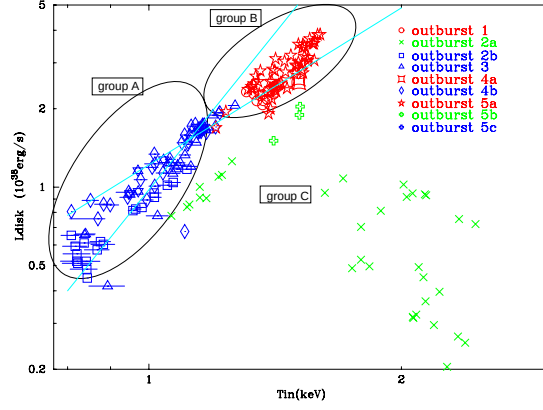
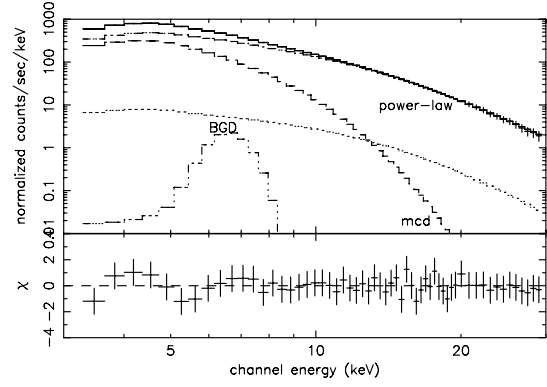
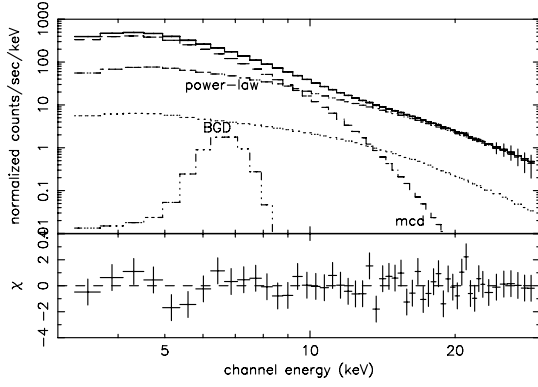


図 5.5: L_{disk} と T_{in} の相関図。青、緑、赤はそれぞれ group A、B、C を表す。また傾きの急な直線は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ で、ゆるやかな方が $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ である。

(a) Observation E (outburst 4b)

(b) Observation B (outburst 2a)



(c) Observation A (outburst 1)

(d) Observation F (outburst 5a)

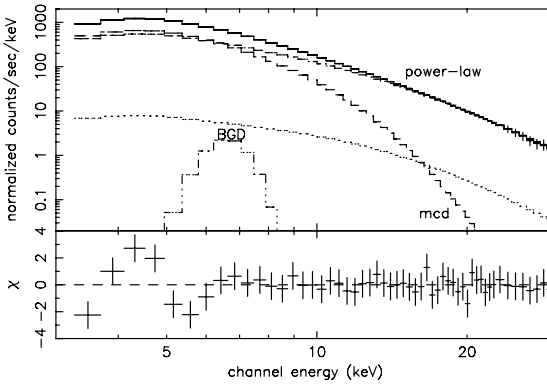
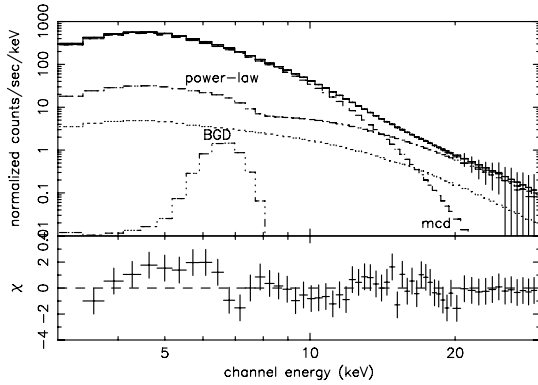


図 5.6: それぞれのスペクトル状態の典型的なスペクトル。右上は *standard regime*、左上は *anomalous regime*、下の2つは *apparently standard regime* のスペクトルである。

と小さく T_{in} は 2keV 以上と非常に高く、これらの値はブラックホール連星としては異常である。これらの特徴は Kubota et al. (2001, 2004) で報告されている GRO J1655–40 と XTE J1550–564 の *anomalous regime* とよく似ている。したがって、group C は *anomalous regime* の状態にあると考えられ、4U 1630–47 では $L_{\text{tot}} \geq 2 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ のとき現れている。

outburst 1 と outburst 4 の前半部分、さらに outburst 5b と 5c を除いた outburst 5 (それぞれ 4a と 5a とする) は group B に分類される。outburst 1 では、スペクトル (図 5.6(c)) は *standard regime* と同じように支配的な soft 成分と弱い power-law tail で表されるが、reduced χ^2 がかなり大きくなっている。 L_{disk} が $1.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ 以上とかなり高く、 L_{tot} のわりに L_{pow} の値が低い。さらに *standard regime* と比べると、 R_{in} は 25km とやや小さく power-law モデルのべきは 2.5 以上と大きくなっている。outburst 1 のこれらの特徴は XTE J1550–564 の *apparently standard regime* でみられたものと同じである。outburst 4a と 5a では outburst 1 とは少し異なる特徴がみられる：図 5.6(d) に示すように、power-law 成分はそれほど弱くなく、べきも 2.2–3.0 で *standard regime* の値より少し大きいだけである。しかし、outburst 1 と同様に L_{disk} は $1.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ 以上で、 $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係がある。したがって、power-law 成分の特徴はやや異なるが、MCD 成分のふるまいは *apparently standard regime* の特徴と一致している。

5.1.3 逆コンプトン散乱を考慮したフィッティング

§5.1.2 で group C に分類されたデータのスペクトルの特徴は Kubota et al. (2001, 2004) や Kobayashi et al. (2003) で報告された GRO J1655–40 と XTE J1550–564 の *anomalous regime* の特徴とよく一致している。したがってこれらの論文と同じように、power-law 成分の増加は降着円盤からの放射の一部が降着円盤のまわりにある高エネルギー電子によって逆コンプトン散乱されるためであると考ええる。そして標準降着円盤モデルに *thcomp* モデルを加えたモデル (3 成分モデルとする) で group C に属するデータのフィッティングを行った。seed photon は MCD 放射から供給されるという仮定から、seed photon の温度は MCD モデルの T_{in} の値に固定する。20–100keV の HEXTE データを seed photon の温度を 1keV にした *thcomp* モデルでフィットすると、電子温度 T_e が 20–40keV あたりになるので $T_e=20\text{keV}$ に固定する。さらに *thcomp* モデルを入れると power-law モデルが決まりにくくなるので power-law のべきを 2.0 に固定した。図 5.7 にこの結果を示す (横軸は図 5.4 と同じ)。

Kubota et al. (2004) にしたがって、図 5.8(a) に $(L_{\text{disk}} + L_{\text{thc}})$ vs. T_{in} を示す。 T_{in} の値は 0.9–1.4keV に下がったが、 $(L_{\text{disk}} + L_{\text{thc}})$ には逆コンプトン散乱で受け取ったエネルギーが含まれるため降着円盤の本来の光度 $L_{\text{disk}}^{\text{int}}$ より高くなっているはずである。そこでこの影響を取り除いて本来の放射光度を見積もるために、

$$F_{\text{disk}}^{\text{P}} + F_{\text{thc}}^{\text{P}} \cdot 2 \cos \theta = 0.0165 \cdot \left(\frac{r_{\text{in}}^2 \cdot \cos \theta}{(D/10\text{kpc})^2} \right) \cdot \left(\frac{T_{\text{in}}}{1\text{keV}} \right)^3 \text{ photons s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \quad (5.1)$$

を計算する (Kubota et al. 2004)。この式で F_{disk}^p と F_{thc}^p はそれぞれ MCD 成分と *thcomp* 成分の 0.01–100keV の photon flux、 T_{in} は逆コンプトン散乱を考慮した値である。またこの式で得られた R_{in} を図 5.7 にプロットして、 $R_{\text{in}}=30\text{--}50\text{km}$ と *standard regime* のときの値とよく一致している。 $L_{\text{disk}}^{\text{int}}$ は図 5.7 の値を用いて $L_{\text{disk}}^{\text{int}} = 4\pi r_{\text{in}}^2 \cdot \sigma T_{\text{in}}^4$ から計算され、 T_{in} との相関を図 5.8(b) に示す。この図から *anomalous regime* のデータは $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の直線上にのっていることが分かる。したがって GRO J1655–40 と XTE J1550–564 で示されたように、逆コンプトン散乱によってハード成分の放射が強くなるが、降着円盤自体は標準的な描像が成り立っていると考えられる。

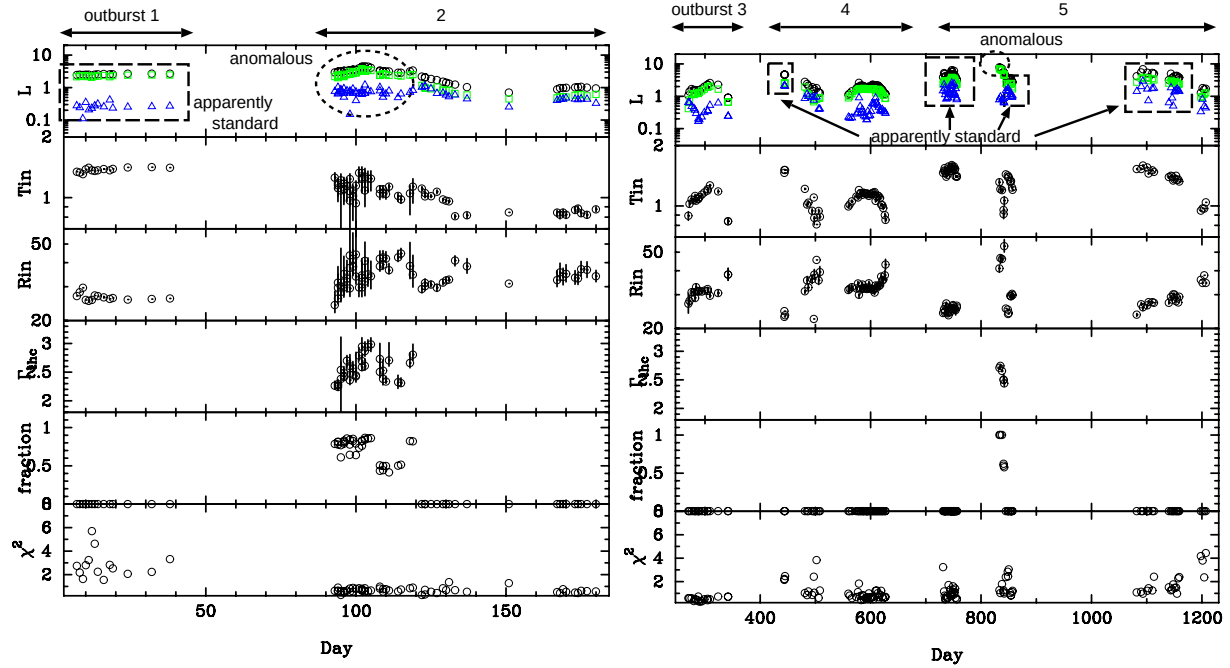
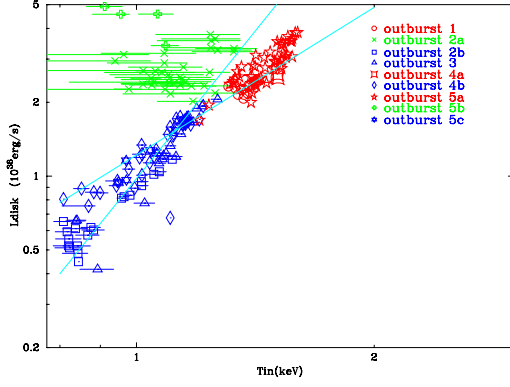


図 5.7: 逆コンプトン散乱を考慮した結果。 *standard regime* と *apparently standard regime* については図 5.4 と同じだが、 *anomalous regime* では逆コンプトン散乱を入れたフィッティング結果を示している。上から X 線光度 (単位: $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 T_{in} (keV)、 R_{in} (km)、*thcomp* モデルのべき Γ_{thc} 、光度比 $L_{\text{thc}} / (L_{\text{disk}} + L_{\text{thc}})$ 、reduced χ^2 である。

図 5.8(b) をみると、補正後でもいくつかのデータは $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ からずれている。これらは outburst 5b のデータで、このときの光度は全観測の中でもっとも高い。そのため、この時期の降着円盤は標準的な描像から少しずれているのではないかと考えられる。

1998 年 2 月 26 日 (outburst 2a) に ASCA 衛星による同時観測が行われている (図 5.1 の B)。ASCA/GIS データのエネルギー範囲は 0.7–10keV と PCA に比べて低エネルギー側をカバーしているので、このデータを使うことによって T_{in} や N_{H} のより正確な値を得ることができる。そこで PCA と HEXTE の同時観測データに 1–10keV の GIS データを加え、 N_{H} を固定せずに 3 成分モデルでフィットする。結果を表 5.2 に、スペクトルを図 5.9 に示す。reduced $\chi^2=1.1$ と非常によく合い、またベストフィットパラメータは 3keV 以下のな

(a)



(b)

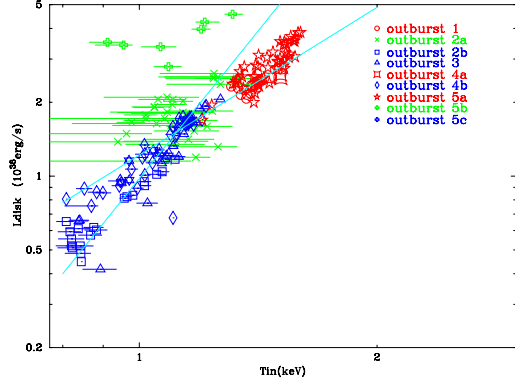


図 5.8: 図 5.5 と同じ図だが、*anomalous regime* のデータは (a) $(L_{\text{disk}} + L_{\text{thc}})$ (b) $L_{\text{disk}}^{\text{int}}$ と計算し直している。

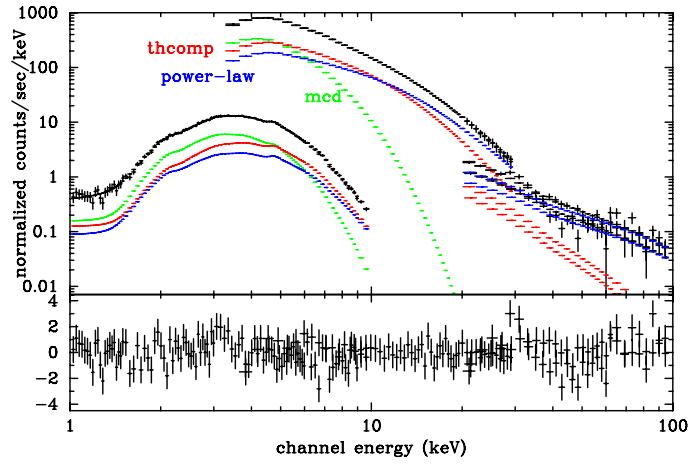


図 5.9: GIS、PCA、HEXTE の同時観測データの 3 成分モデルによるフィッティング結果。

い RXTE データのみの場合とそれほど変わらない。よってこの結果は 3 成分モデルを強く指示している。5–10keV では *thcomp* 成分が強く、その低エネルギー側では MCD 成分、高エネルギー側では power-law 成分が強くなっている (図 5.9)。これは同じ PCA スペクトルの標準降着円盤モデルによるフィット (図 5.6) と対照的で、このモデルでは *thcomp* 成分を T_{in} を増加させ power-law の傾きを steep にすることで無理に再現しようとしている。

5.1.4 slim disk の証拠

group B に分類した outburst 1、4a、5a のスペクトルの特徴は *standard regime* のものとよく似ている。しかし group B のデータには $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係があるため、降着円盤の内側部分が slim disk 解で記述できる *apparently standard regime* (Kubota et al. 2004) に対応しているのではないかと考えられる。そこで outburst 1 のデータが slim disk の描像で説明できるかを調べるために、標準降着円盤モデルで MCD モデルの代わりに p -free モデルを入れてフィッティングを行った。比較のために *standard regime* のデータも入れ、power-law モデルのべきは 2 に固定してフィットした。図 5.10 に得られた p と T_{in} の相関図を示す。ただし p と T_{in} のカップリングを防ぐために、この図では標準降着円盤モデルで得られた T_{in} を用いている。*apparently standard regime* データは p が 0.5–0.6 と *standard regime* の 0.6–0.9 より小さく、降着円盤の内側部分の放射効率が低くなっているという結果が得られた。つまりこれは放射冷却に加えて移流冷却のような別の冷却過程の必要性を示唆している。slim disk 解は移流冷却を考慮していて、standard disk より p の値が小さくなると予想されている (e.g., Watarai et al. 2000)。また §2.4.4 で述べたように、slim disk で予想されるスペクトルは標準降着円盤モデルの下で $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係があり、group B でみられた特徴と一致する。以上のことから、4U 1630–47 は XTE J1550–564 に続いて *apparently standard regime* を示す第 2 の天体である。

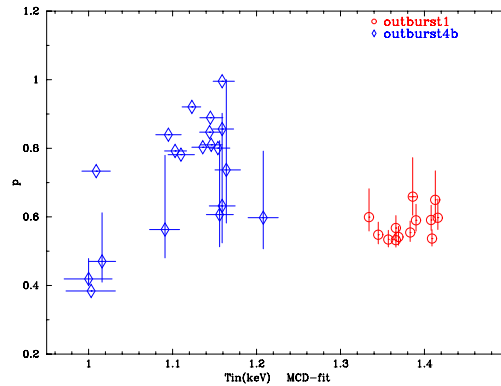


図 5.10: p と T_{in} の相関図。赤と青のデータポイントはそれぞれ *apparently standard regime* と *standard regime* のデータを表す。

5.1.5 3 状態の分類法

ここまでで 4U 1630–47 は X 線光度が $2.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ より低いときは *standard regime*、この値より高いときは *anomalous regime* か *apparently standard regime* を示すことが分かった。しかしこの臨界光度は GRO J1655–40 や XTE J1550–564 では異なり、ブラックホール連星に共通の値ではない。今回我々は 4U 1630–47 の解析を通して、多くのブラックホール連星について成り立つであろうと考えられる新たな分類法を発見した。図

5.11 に $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ vs. L_{tot} の関係を示す。3つの状態が明らかに分かれているのがこの図から分かる。*standard regime* は $L_{\text{tot}} < 2.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ の領域に、*anomalous regime* は $L_{\text{tot}} > 2.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ かつ $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} > 0.45$ の領域に位置している。また *apparently standard regime* は $L_{\text{tot}} > 2.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ かつ $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ の領域にある。すでに述べたように臨界光度はブラックホール連星ごとに異なるので、十分にデータ数がないターゲットでは決めることができない。しかし *anomalous regime* は $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ のみで決まるので、観測されたデータが *anomalous regime* を含んでいれば臨界光度を制限でき、さらに *apparently standard regime* も見つけることができると考えられる。これ以降、この分類にしたがって5つのブラックホール候補星について解析を進めていく。

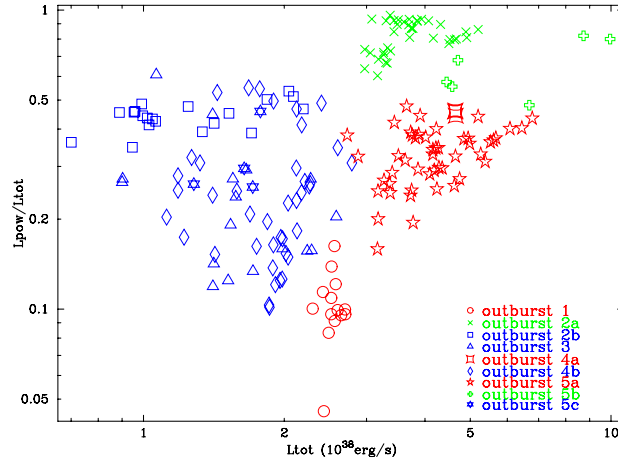


図 5.11: 標準降着円盤モデルで得られた $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関図を示す。青、緑、赤のデータポイントはそれぞれ *standard regime*、*anomalous regime*、*apparently standard regime* を表している。

5.2 XTE J1859+226

5.2.1 全観測について

図 5.12 は RXTE 衛星に搭載された ASM 検出器によって 1999–2000 年に得られた XTE J1859+226 のライトカーブと hardness ratio である。図中の矢印で示している 106 個の PCA データについて解析を行った。また 4U 1630–47 と同様に統計の良い HEXTE データのみ PCA データに加えて解析している。

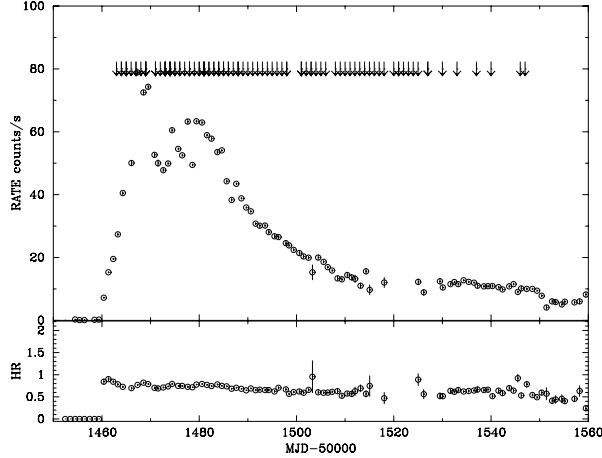


図 5.12: RXTE/ASM による XTE J1859+226 の 1999–2000 のライトカーブと hardness ratio(5–12keV/3–5keV)

5.2.2 標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング

X線スペクトルの時間変動を調べて §5.1.6 の分類法にしたがって 3 状態を区別するために、全データを標準降着円盤モデルでフィッティングを行った。McClintock et al. (2004) から N_H を $0.5 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ に固定し、 $D=11 \text{kpc}$ 、 $\cos \theta=1$ とすると図 5.13 が得られた。この図の値を用いて $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関をプロットしたものを図 5.14 に示す。図 5.14 から $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} > 0.45$ の領域にあるデータは *anomalous regime* の状態にあり、臨界光度は $2.6\text{--}3.5 \times 10^{38} \text{erg s}^{-1}$ になると考えられる。これらのデータは図 5.13 では点線の左側に対応しており、この時期を outburst 1a とする。図 5.13 の点線の右側にあるデータはほとんど $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ であり、臨界光度よりも低いので *standard regime* であると考えられる (outburst 1b とする)。また $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ かつ臨界光度をこえる領域にはデータがないことから、XTE J1859+226 の今回解析を行ったデータには *apparently standard regime* は含まれない。

outburst 1b の典型的なスペクトル (図 5.15(a)) は支配的な soft 成分と弱い power-law

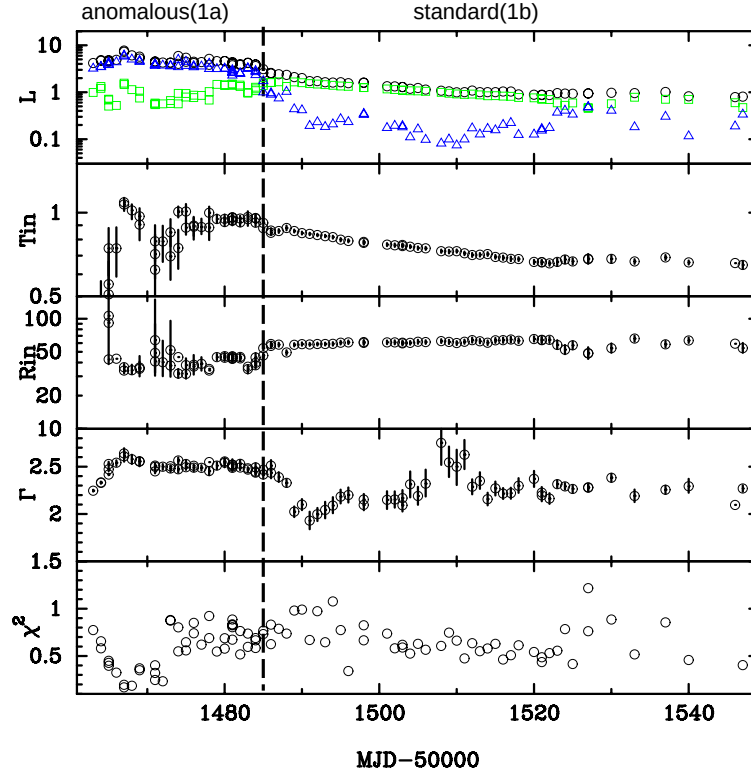


図 5.13: XTE J1859+226 の標準降着円盤モデルによるフィッティング結果。上から X 線光度 (単位: $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 T_{in} (keV)、 R_{in} (km)、power-law のべき Γ 、reduced χ^2 を表し、横軸は MJD-50000 である。X 線光度の図では黒、緑、青はそれぞれ L_{tot} 、 L_{disk} 、 L_{pow} となっている。

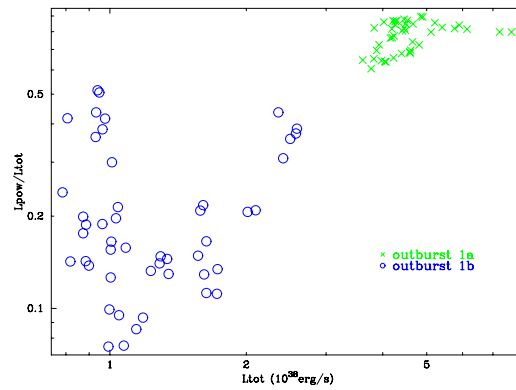


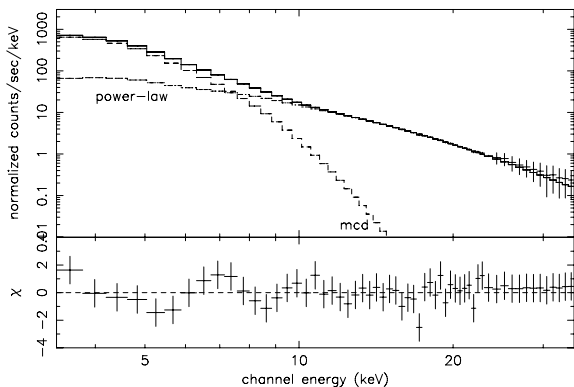
図 5.14: $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関図。

tail から成っている。図 5.13 から reduced $\chi^2 < 1$ と非常に良く、X 線光度が $1.0 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ から $3.0 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ に変化しても $R_{\text{in}}=50\text{--}65\text{km}$ と一定であることが分かる。またこ

これらのデータは $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係があり (図 5.16)、このような特徴からも outburst 1b は *standard regime* であるといえる。

outburst 1a の典型的なスペクトルは図 5.15(b) に示すように、power-law 成分が支配的になっている。このときフィッティングは全体的に良いが *standard regime* の値と比べると、 T_{in} はやや高く R_{in} も小さい (図 5.13)。また power-law モデルのべきも約 2.5 と *standard regime* の平均値 2.2 よりかなり steep になっている。図 5.16 では outburst 1a のデータは $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ からそれており、上記の分類を支持する結果が得られた。

(a)outburst 1b



(b)outburst 1a

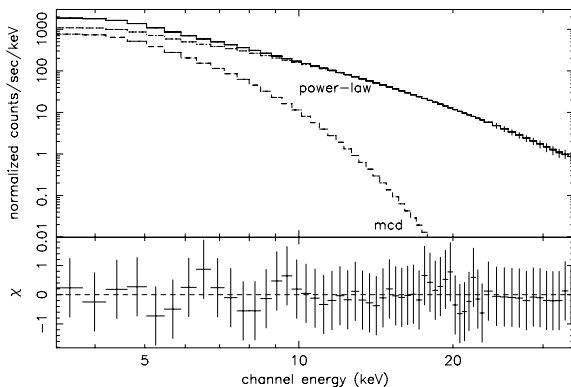


図 5.15: outburst 1a、1b の典型的なスペクトル。

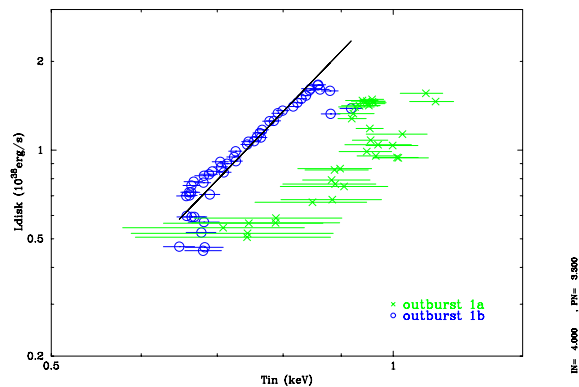


図 5.16: L_{disk} と T_{in} の相関図。直線は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係を表す。

5.2.3 逆コンプトン散乱を考慮したフィッティング

outburst 1a のデータは *anomalous regime* であると考えられるので、4U 1630–47 と同様に逆コンプトン散乱を考慮した3成分モデルでフィットする。ただし、ここからは *thcomp* モデルのかわりに *compbb* モデルを用いている。フィッティング条件はこれまでと同じく seed photon の温度 $=T_{\text{in}}$ 、 $T_e=20\text{keV}$ だが、power-law のべきは *standard regime* データの標準降着円盤モデルによるフィットで得られた平均値 2.2 で固定した。結果を図 5.17 に示す。この図で outburst 1a のデータは §5.1.4 と同じ方法で計算した3成分モデルの結果で、outburst 1b は標準降着円盤モデルの結果を示している。

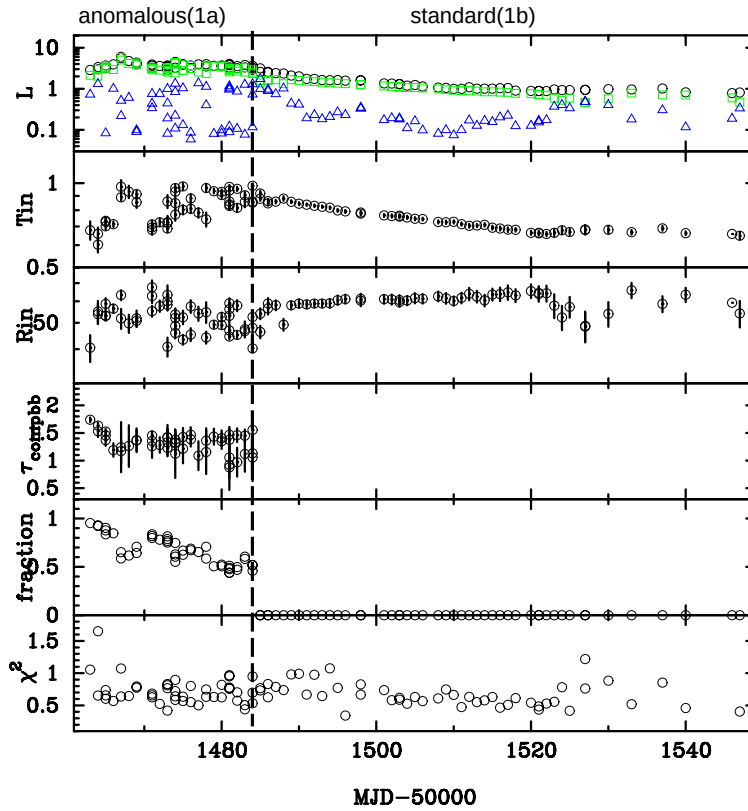


図 5.17: 逆コンプトン散乱を考慮した結果。 *anomalous regime* と *standard regime* はそれぞれは3成分モデルと標準降着円盤モデルのフィッティング結果を示す。上からX線光度(単位は $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 $T_{\text{in}}(\text{keV})$ 、 $R_{\text{in}}(\text{km})$ 、電子雲の光学的な深さ τ_{compbb} 、 $L_{\text{cbb}}/(L_{\text{cbb}} + L_{\text{dbb}})$ 、reduced χ^2 である。

図 5.17 をみると R_{in} の値は増光中を除いて 40–60km となっていて *standard regime* の値とほぼ一致するようになった。 T_{in} は 0.7–1.0keV とやや下がり、reduced χ^2 も 1 以下で良く合っている。この時期のスペクトルの例を図 5.18 に示しており、逆コンプトン散乱成

分が強いことが分かる。また図 5.19(a) で outburst 1a のデータは *standard regime* のデータの右上にあり、 $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ からそれている。そこで $L_{\text{disk}}^{\text{int}}$ を計算すると図 5.19(b) のようになり、*standard regime* のデータとだいたい一致するという結果が得られた。しかし増光中のデータは R_{in} が小さいままであるため、図 5.19(b) の $T_{\text{in}} \sim 0.9\text{keV}$ で L_{disk} の値が小さくなっている。

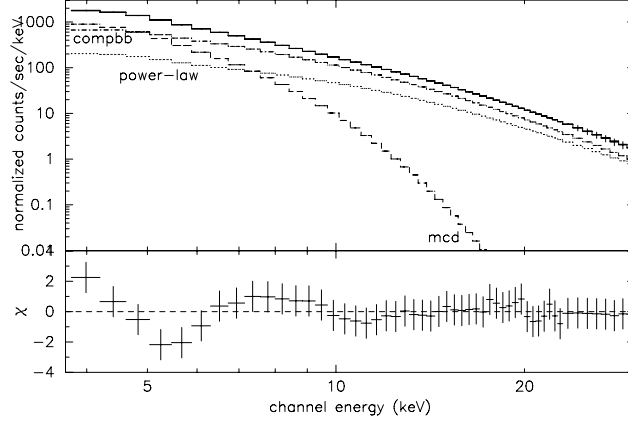


図 5.18: 3 成分モデルでフィットした outburst 1a のスペクトル (図 5.15(b) と同じデータ)

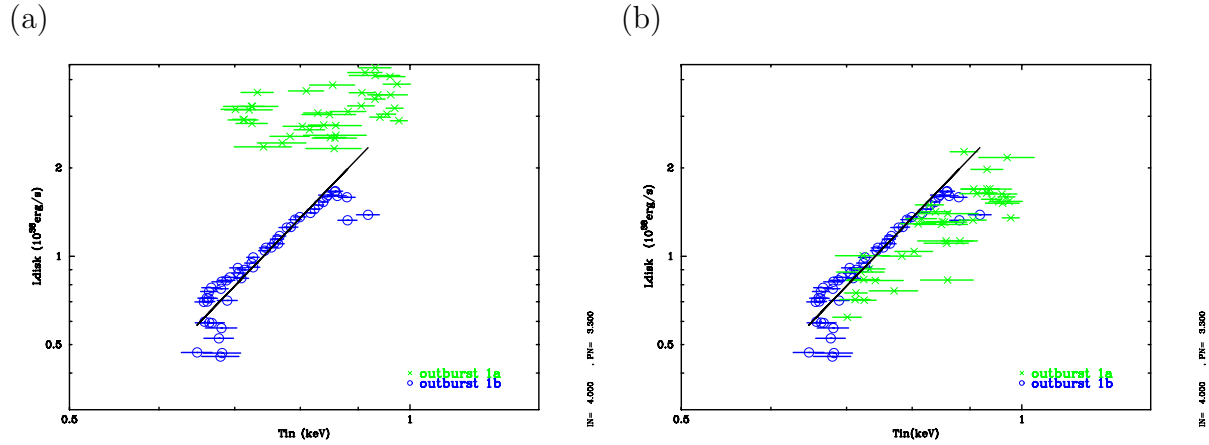


図 5.19: L_{disk} vs. T_{in} の相関図。ただし縦軸は (a) $(L_{\text{disk}} + L_{\text{cbb}})$ 、(b) $L_{\text{disk}}^{\text{int}}$ である。

5.3 GX 339-4

5.3.1 全観測について

RXTE/ASMによって観測されたGX 339-4の1997-2003年のライトカーブと hardness ratio を図 5.20 に示す。GX 339-4 のふるまいを調べるために、図 5.20 に矢印で示した 181 個の PCA データに統計の良い HEXTE データのみを加えて解析を行った。

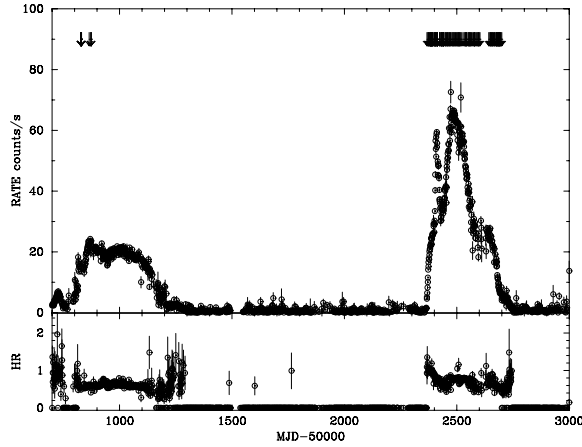


図 5.20: RXTE/ASM による GX 339-4 の 1997-2003 のライトカーブと hardness ratio(5-12keV/3-5keV)

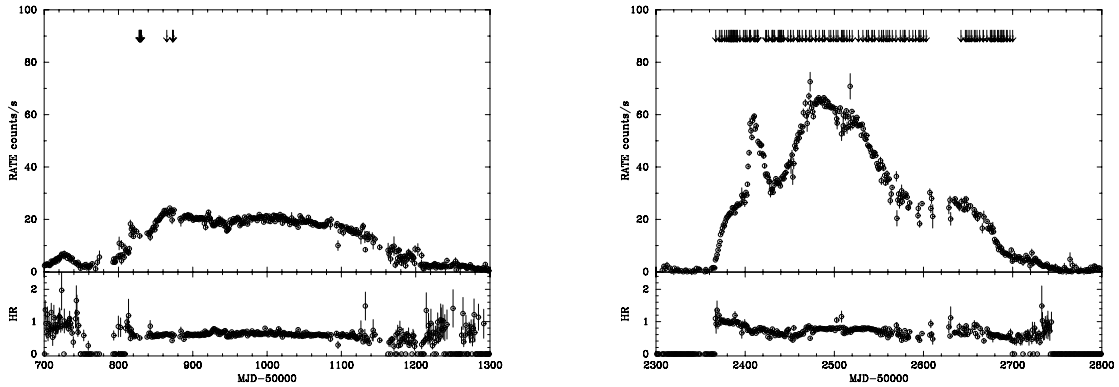


図 5.21: 図 5.20 で示した 2 つのアウトバーストの拡大図

5.3.2 標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング

GX 339-4 についても XTE J1859+226 と同様の手順で解析を進めていく。まず最初に $N_H = 0.2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、 $D = 4 \text{ kpc}$ (McClintock et al. 2004) として標準降着円盤モデルで解析した。

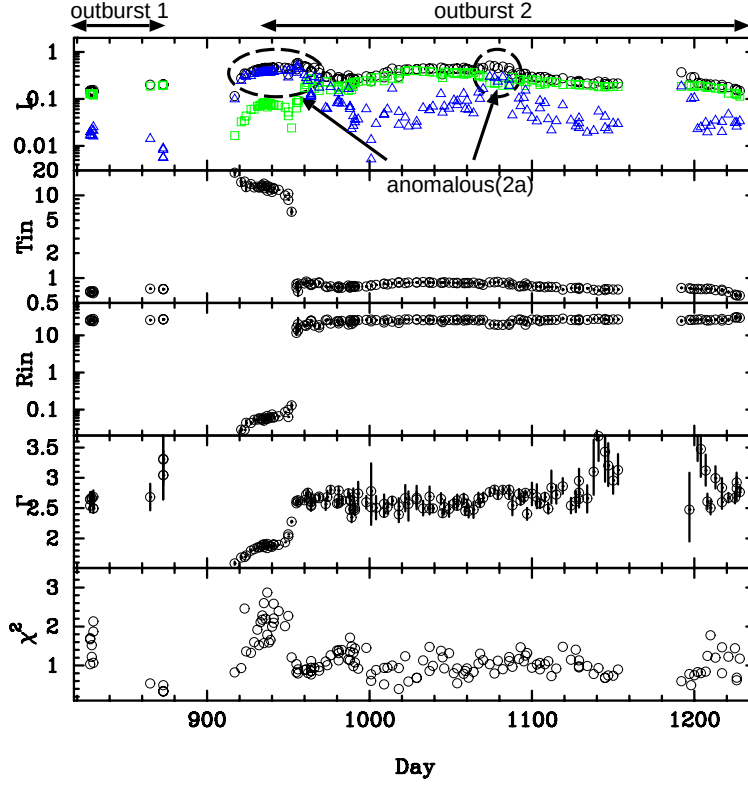


図 5.22: GX 339-4 の標準降着円盤モデルによるフィッティング結果。上から X 線光度 (単位: $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 T_{in} (keV)、 R_{in} (km)、power-law のべき Γ 、reduced χ^2 を表し、横軸は outburst 1 では MJD-50000、outburst 2 では MJD-51450 である。X 線光度の図では黒、緑、青はそれぞれ L_{tot} 、 L_{disk} 、 L_{pow} となっている。

傾斜角は不明なので $\cos \theta = 1$ として求めたパラメータを図 5.22 に、 $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ vs. L_{tot} の相関を図 5.23 に示す。図 5.23 で $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} > 0.45$ であるデータは図 5.22 の円で囲まれたデータに対応している。これらは *anomalous regime* と考えられ、outburst 2a とする。outburst 2a を除く 2 つめのアウトバーストの他の部分をデータを outburst 2b とし、これらと outburst 1 のデータは $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ となっている。したがって outburst 1 と 2b は *standard regime* にあると考えられる。また図 5.23 で $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ かつ *anomalous regime* と同程度の光度をもつデータがあるが、図 5.24 で $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係はみられないため *apparently standard regime* ではないと思われる。よって臨界光度は $(0.4-0.5) \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ くらいの幅をもっていると考えられる。次に *standard regime*、*anomalous regime* と考えられる状態のそれぞれの特徴について述べる。

図 5.22 をみると outburst 1 と 2b のデータのほとんどで reduced $\chi^2 \sim 1$ で、また X 線光度に関わらず $R_{\text{in}} = 25-30 \text{ km}$ と一定になっていることが分かる。power-law のべきは ~ 2.5

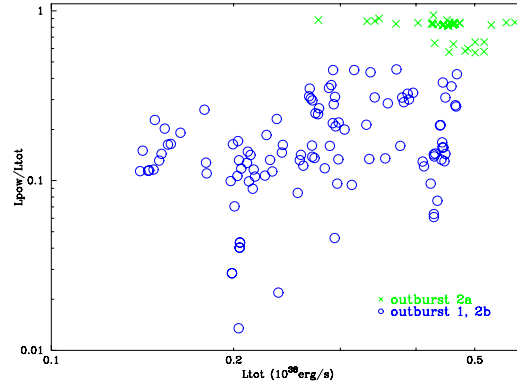


図 5.23: $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関図。

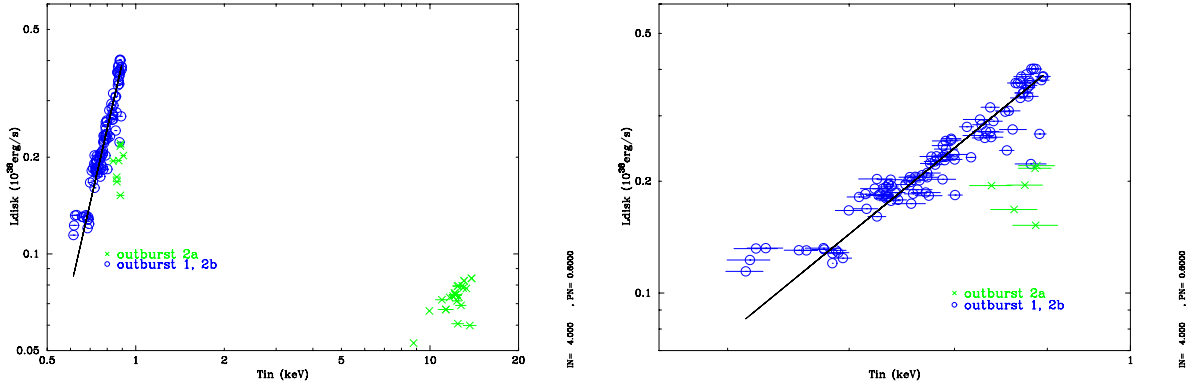
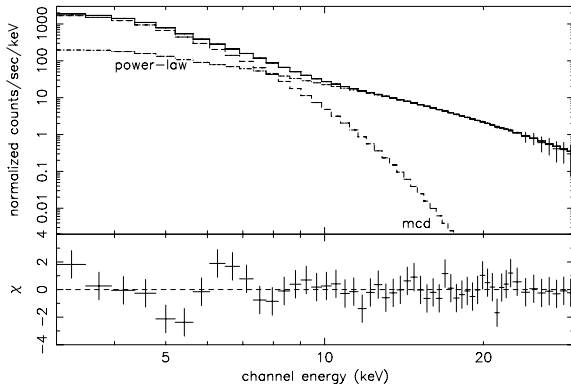


図 5.24: L_{disk} と T_{in} の相関図。左図は $T_{\text{in}}=0.5\text{--}20.0$ keV の領域を表示しており、右図は左図の $T_{\text{in}}=0.5\text{--}1.0$ keV の拡大図である。直線は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係を表す。

(a) outburst 2b



(b) outburst 2a

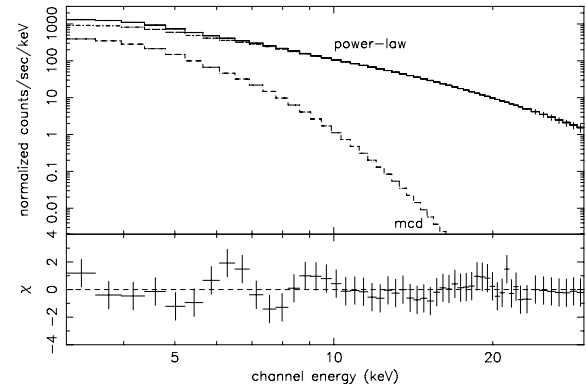


図 5.25: outburst 2a、2b の典型的なスペクトル。

と典型的な high/soft state の値よりやや大きい、 T_{in} は 0.6–0.9 keV の間におさまっていて $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係もみられる (図 5.24)。またこのときのスペクトル (図 5.25(a)) は soft 成分が強くなっている。以上のことから outburst 1 と 2b は *standard regime* の状態であるとし、このとき GX 339–4 の質量は 2.8–3.4 $M_{\odot}$ になる。

outburst 2a では最初のデータを除くと reduced χ^2 は *standard regime* のものと変わらないが、 T_{in} がやや大きく $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係から少しそれている (図 5.24)。このときの R_{in} は ~ 20 km と *standard regime* の値よりやや小さくなっている。outburst 2a の初期のデータは reduced χ^2 が悪く、フィッティングがあまり良くない。これらのデータは T_{in} が 10 keV 以上、 R_{in} が 1 km 以下と異常な値を示し、図 5.24 から *standard regime* から大きくはずれていることが分かる。また図 5.25(b) から、power-law 成分が非常に支配的になっていることがわかり、以上のことから outburst 2a は *anomalous regime* である可能性が高いといえる。

5.3.3 逆コンプトン散乱を考慮したフィッティング

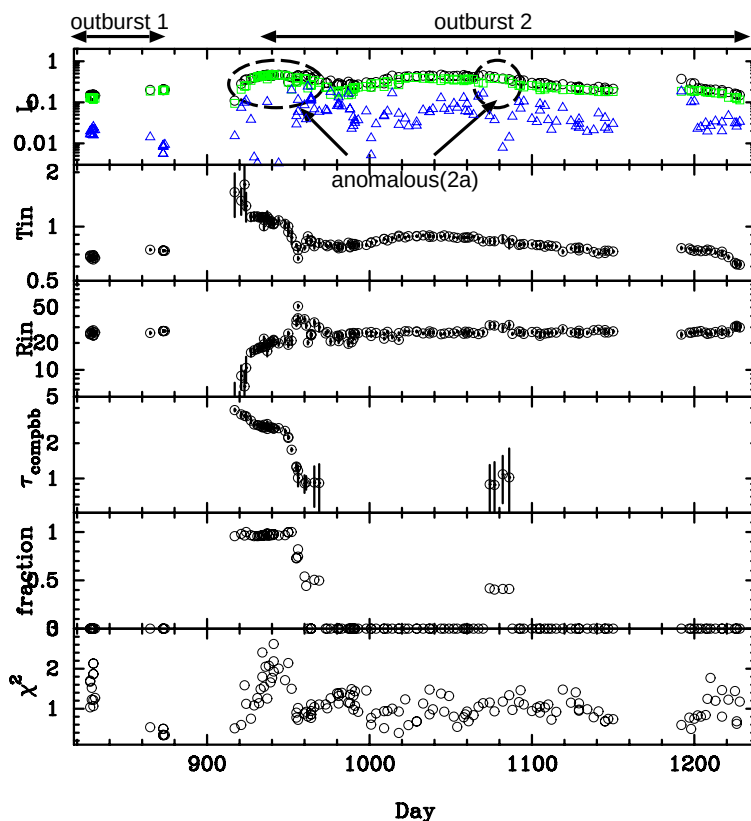


図 5.26: 逆コンプトン散乱を考慮した結果。 *anomalous regime* と *standard regime* はそれぞれ 3 成分モデルと標準降着円盤モデルのフィッティング結果を示す。上から X 線光度 (単位は $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 T_{in} (keV)、 R_{in} (km)、電子雲の光学的な深さ τ_{compbb} 、 $L_{\text{cbb}}/(L_{\text{cbb}} + L_{\text{dbb}})$ 、reduced χ^2 である。横軸は図 5.22 と同じ。

前節で *anomalous regime* と分類した outburst 2a のデータについて3成分モデルでフィッティングを行う。フィッティングの条件は XTE J1859+226 の3成分モデルによるフィットと同じで、結果を図5.26に示す。outburst 2a の最初のデータはアウトバーストの立ちあがりを観測したものである。一般的に立ちあがりの時期は不安定で光度が十分に高くてもふるまいが異なることが多いので、今回は議論から除くことにする。 R_{in} は $>30\text{km}$ と大きくなっている時期があるが、それ以外はほぼ *standard regime* と一致していて全体として $20\text{--}35\text{km}$ である。 $T_{\text{in}}=0.7\text{--}1.0\text{keV}$ になり、 τ_{compbb} は $1.0\text{--}2.0$ と XTE J1859+226 の *anomalous regime* とほぼ同じである。outburst 2a 後半のデータでの reduced χ^2 は ~ 1 と良いが、前半は2以上と悪い。図5.27に outburst 2a の典型的なスペクトルの3成分フィットの結果を示していて、逆コンプトン散乱の成分が非常に支配的になっている。図5.28に L_{disk} と T_{in} の相関を示していて、この図で $T_{\text{in}} > 1\text{keV}$ のデータは outburst 2a の立ちあがりの時期のものである。図5.28(a)では outburst 2a のデータは *standard regime* データより上にあるが、逆コンプトン散乱の影響を除く(図5.28(b))と *standard regime* とほぼ一致するという結果が得られた。

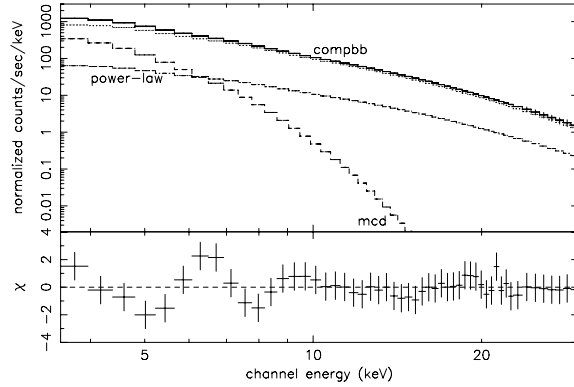


図 5.27: 3成分モデルでフィットした outburst 2a のスペクトル (図 5.25(b) と同じデータ)

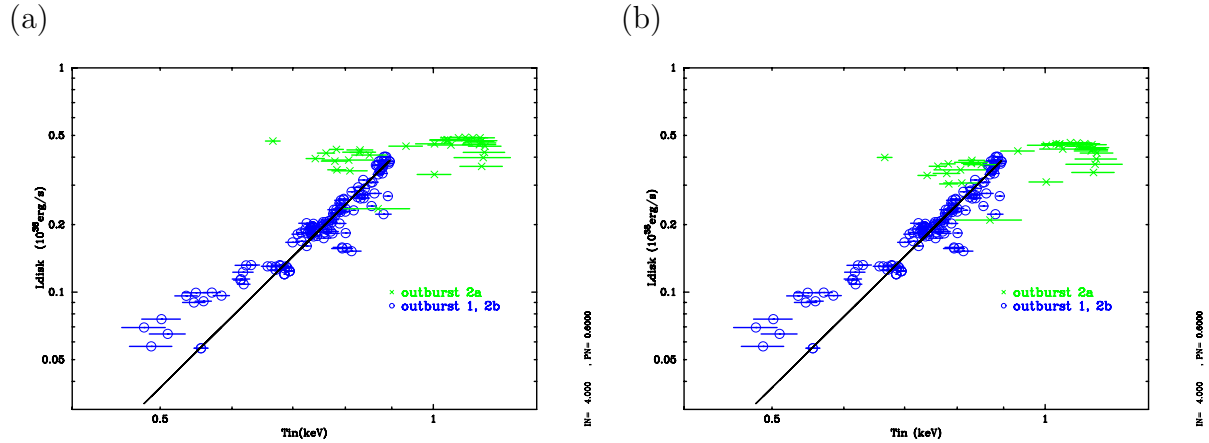


図 5.28: L_{disk} vs. T_{in} の相関図。ただし縦軸は (a) $(L_{\text{disk}} + L_{\text{cbb}})$ 、(b) $L_{\text{disk}}^{\text{int}}$ である。

5.4 XTE J1720–318

5.4.1 全観測について

RXTE/ASM によって観測された XTE J1720–318 の 2002–2003 年のライトカーブと hardness ratio を図 5.29 に示す。図中に矢印で示した 55 個の PCA データについてこれまでと同様に解析した。

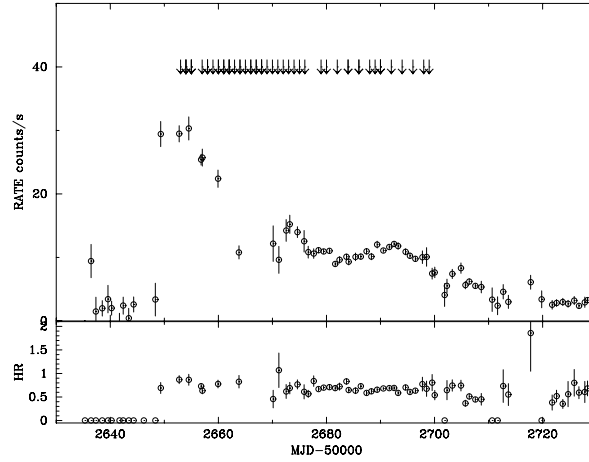


図 5.29: RXTE/ASM による XTE J1720–318 の 2002–2003 のライトカーブと hardness ratio(5–12keV/3–5keV)

5.4.2 標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング

3つの状態に分類するために、まず標準降着円盤モデルでフィッティングを行った。XTE J1720–318 の星間吸収の値はよく分かっていないが、銀河面座標 (354.37, 3.05) より推測して $0.3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ で固定している。図 5.30 にこのモデルで得られたパラメータの時間変化を示す。ただし距離と傾斜角が明らかではないので $D=10\text{kpc}$ 、 $\cos \theta=1$ と仮定している。また図 5.31 に $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関を示す。

図 5.31 から、すべてのデータがほぼ $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.2$ になっていることがわかる。この図では *standard regime* か *apparently standard regime* かは区別ができないが、図 5.32 をみると $L_{\text{disk}} < 1.3 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ のときには $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係にしたがい、 $L_{\text{disk}} > 1.3 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ では $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ に比例している。したがって、XTE J1720–318 は *standard regime* と *apparently standard regime* の2つの状態を示し、臨界光度 $\sim 1.3 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ であると考えられる。*standard regime* と思われるデータは図 5.30 に示された点線の右側のデータに対応しており、これらを outburst 1b とする。 χ^2 が小さく、 $R_{\text{in}}=75\text{--}85\text{km}$ と一定でさ

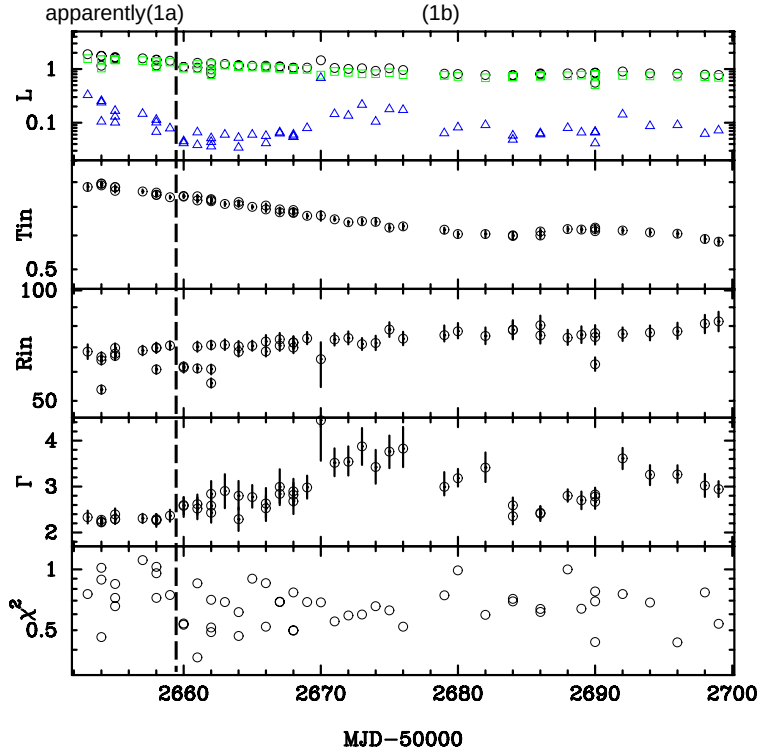


図 5.30: XTE J1720–318 の標準降着円盤モデルによるフィッティング結果。上からX線光度 (単位: $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 T_{in} (keV)、 R_{in} (km)、power-law のべき Γ 、reduced χ^2 を表し、横軸は MJD–50000 である。X線光度の図では黒、緑、青はそれぞれ L_{tot} 、 L_{disk} 、 L_{pow} となっている。

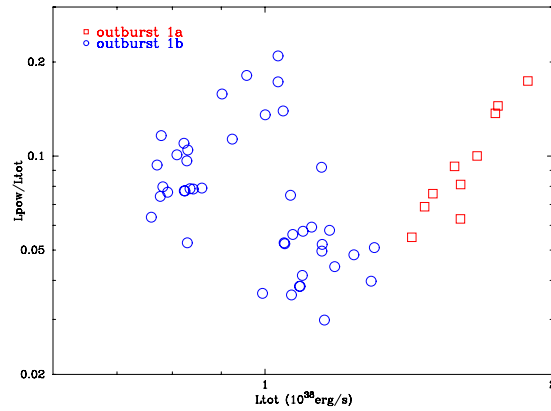


図 5.31: $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関図。

らにスペクトルも soft 成分が支配的 (図 5.33(a)) と *standard regime* の代表的な特徴を示している。この R_{in} の値から見積もられるブラックホールの質量は $8.4\text{--}9.6M_{\odot}$ となる。一方、図 5.30 の点線より左側のデータ (outburst 1a とする) は *apparently standard regime* であると考えられ、*standard regime* と比べると T_{in} が高くて R_{in} が $65\text{--}70\text{km}$ とやや小さい。また図 5.33(b) に示すように、このときのスペクトルは *standard regime* のものと似ているがややソフトになっている。

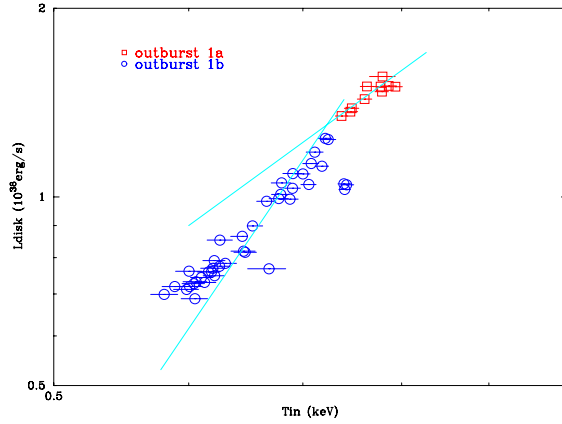


図 5.32: L_{disk} と T_{in} の相関図。傾きの急な直線は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ で、ゆるやかな方は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係を表す。

(a) outburst 1b

(b) outburst 1a

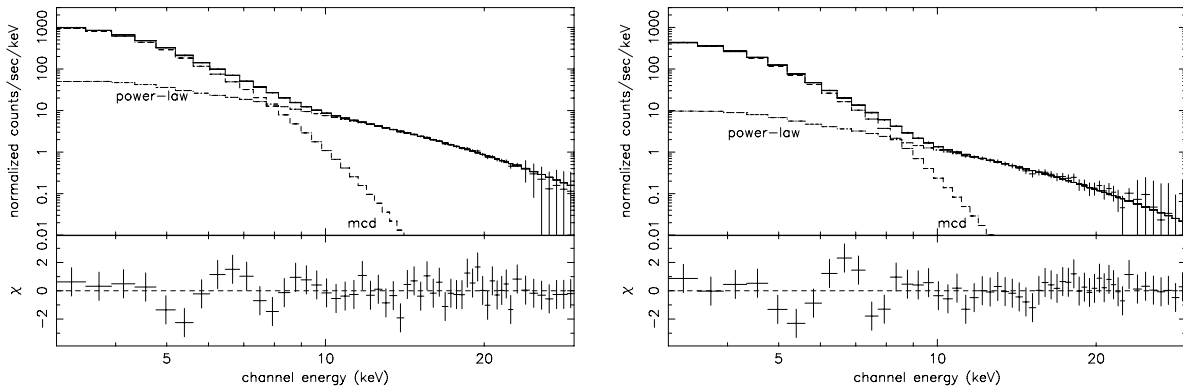


図 5.33: outburst 1a、1b の典型的なスペクトル。

5.4.3 slim disk の証拠

図 5.32 で $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係を示したデータ (outburst 1a) について MCD モデルを p -free モデルで置き換え、power-law モデルのべきを 2.2 に固定したモデルでフィットした。結

果を比較するために、*standard regime* のデータについても同様のフィットを行い、結果を図 5.34 に示す。4U1630–47 と同じように T_{in} と p のカップリングをさけるためにこの図の T_{in} も標準降着円盤モデルで得られた値を使っている。outburst 1a では $p=0.32\text{--}0.36$ で、*standard regime* の状態を示す outburst 1b では $p=0.50\text{--}0.62$ になっている。つまりこの結果は、outburst 1a のデータは *standard regime* のデータより降着円盤の温度勾配がゆるやかで、内側の放射効率が低下しているということを意味する。*standard regime* の p の値が 0.75 よりも小さいのは 3–30keV の PCA データを使っていることが原因の 1 つであると考えられる。3keV 以下のスペクトルがないため $T_{\text{in}} \sim 0.7\text{keV}$ のような放射から p を正確に求めることは難しく、 p の値はあまり信頼できないかもしれない。しかし、 p の値を相対的に比較することは可能であると思われる。したがって、 $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係をもつことと p の値が小さいことから、XTE J1720–318 は *apparently standard regime* を示すといえる。

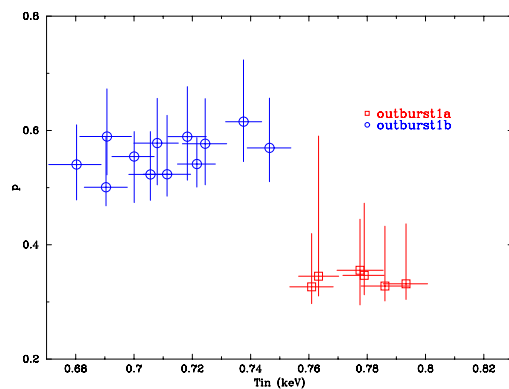


図 5.34: p と T_{in} の相関図を示す。ただし T_{in} は標準降着円盤モデルで得られた値を用いている。

5.5 XTE J2012+381

5.5.1 全観測について

図5.35にRXTE衛星に搭載されたASM検出器で得られた1998年6–9月のXTE J2012+381のライトカーブと hardness ratio を示している。図中に示した20個のPCAデータについて解析を行った。

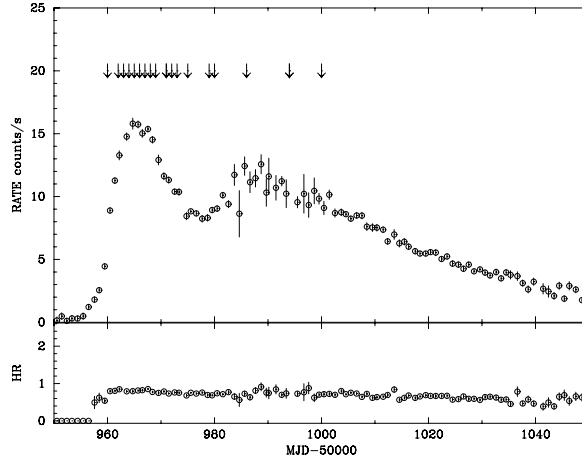


図 5.35: RXTE/ASM による XTE J2012+381 の 1998 年 6 月–9 月のライトカーブと hardness ratio(5–12keV/3–5keV)

5.5.2 標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング

McClintock et al. (2004) から N_{H} を $0.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ に固定して標準降着円盤モデルで解析した。距離と傾斜角は分かっていないのでそれぞれ 10kpc、 $\cos \theta = 1$ と仮定して得られた結果を図 5.36 に示す。図 5.37 に示した $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関をみると、全データが $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.2$ となっている。 R_{in} も 43–47km と一定の値をとっており、 χ^2 も非常に小さい。図 5.38 から soft 成分が支配的で典型的な *standard regime* のスペクトルを示していることがわかる。さらに $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係にしたがっている (図 5.39) ことなどから、今回解析した XTE J2012+381 の全データは *standard regime* にあるといえ、ブラックホールの質量は $4.8\text{--}5.3M_{\odot}$ と見積もることができた。

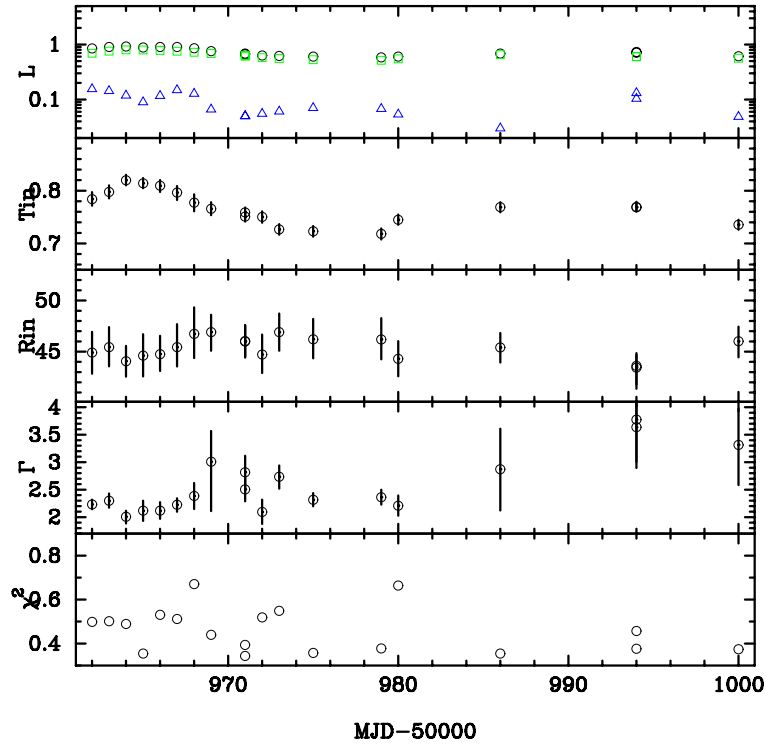


図 5.36: XTE J2012+381 の標準降着円盤モデルによるフィッティング結果。上から X 線光度 (単位: $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 T_{in} (keV)、 R_{in} (km)、power-law のべき Γ 、reduced χ^2 を表し、横軸は MJD-50000 である。X 線光度の図では黒、緑、青はそれぞれ L_{tot} 、 L_{disk} 、 L_{pow} となっている。

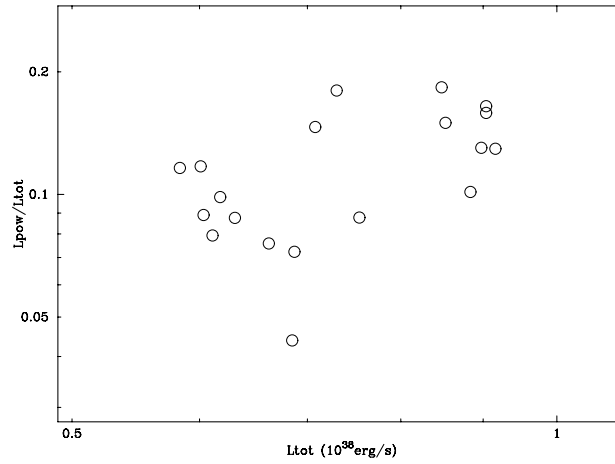


図 5.37: $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関図。

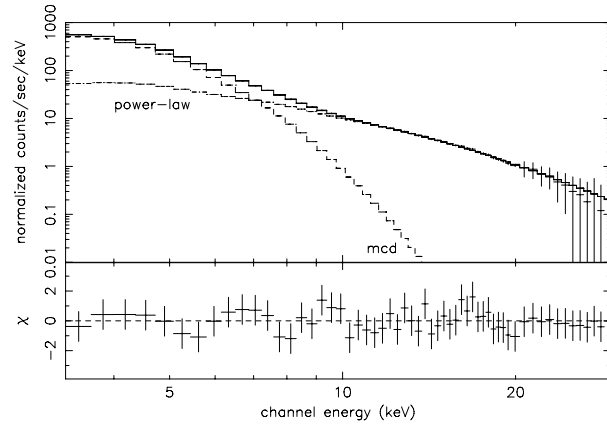


図 5.38: XTE J2012+381 の典型的なスペクトル。

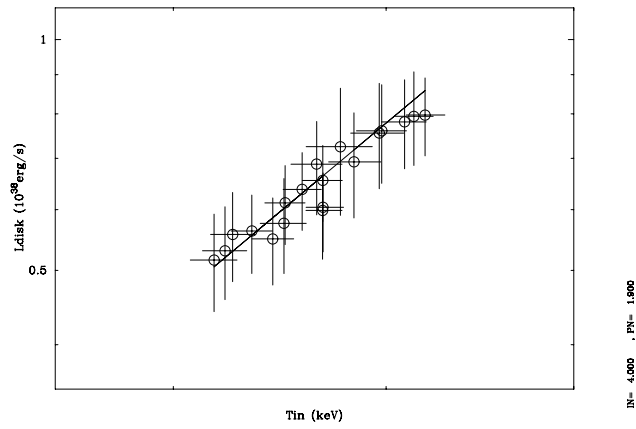


図 5.39: L_{disk} と T_{in} の相関図。直線は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係を表す。(横軸の表示範囲は 0.65–0.9keV)

5.6 H 1743–322

5.6.1 全観測について

図 5.40 に RXTE 衛星の ASM 検出器で観測された 2003 年 3–9 月の H 1743–322 のライトカーブと hardness ratio を示す。図中の矢印で示した 139 個の PCA データについて解析を行った。また統計の良い HEXTE データのみ PCA データに加えて解析している。またこの天体は銀河中心に近いためまわりに多くの天体があるが、PCA の視野内 ($1^\circ \times 2^\circ$) には入らないためこれらの影響はないと考えられる (Parmar et al. 2003)。

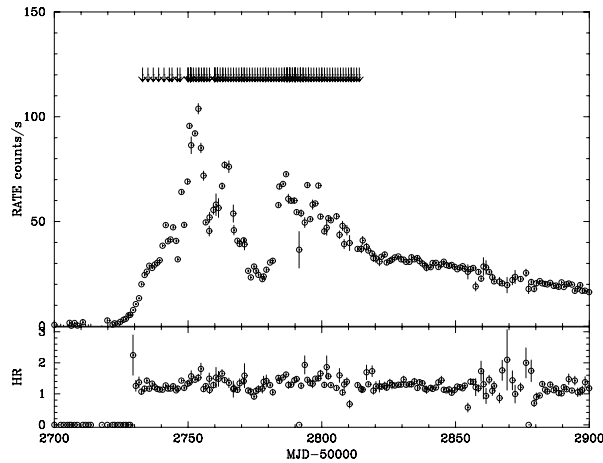


図 5.40: RXTE/ASM による H 1743–322 の 2003 年 3 月–9 月のライトカーブと hardness ratio(5–12keV/3–5keV)

5.6.2 標準降着円盤モデルによるスペクトルフィッティング

観測されたデータを 3 状態に分類するために標準降着円盤モデルで解析を行った。McClintock et al. (2004) より $N_H = 2.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ に固定し、 $D = 10 \text{ kpc}$ 、 $\cos \theta = 1$ と仮定して図 5.41 に示す結果を得た。また図 5.42 には $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関を示す。

図 5.42 で $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} > 0.45$ となるデータは $\text{MJD} - 50000 = 2733\text{--}2756$ と $2763\text{--}2805$ であり、これらを outburst 1a とする (図 5.41)。図 5.43(a) から outburst 1a でのスペクトルは power-law 成分が非常に強くなっている。また R_{in} と T_{in} が大きく変動しており、図 5.44 の L_{disk} と T_{in} の相関図では右下の広範囲に分布していて $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係からはずれている。これらの特徴から outburst 1a は *anomalous regime* ではないかと考えられる。

$L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ の領域にあるデータはスペクトルの形はよく似ているが (図 5.43(b,c))、 $L_{\text{tot}} = 2 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ を境界にして異なる特徴を示す。この値より高い L_{tot} をもつデータは図

5.44で $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係を示す。これらのデータは図5.41の $\text{MJD}-50000 > 2805$ (outburst 1c とする) で、*apparently standard regime* である可能性がある。一方、 $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ かつ $L_{\text{tot}} < 2 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ となるデータは他の天体の結果から *standard regime* の状態であると予想される。これらは図5.41の outburst 1b に対応しており T_{in} と R_{in} に激しい変動はみられないが、図5.44では $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係はなく outburst 1a と同じ *anomalous regime* の領域にある。以上のことから outburst 1b は典型的な *standard regime* ではないと考えられ、次節で outburst 1a とともに逆コンプトン散乱を考慮したフィッティングを行う。

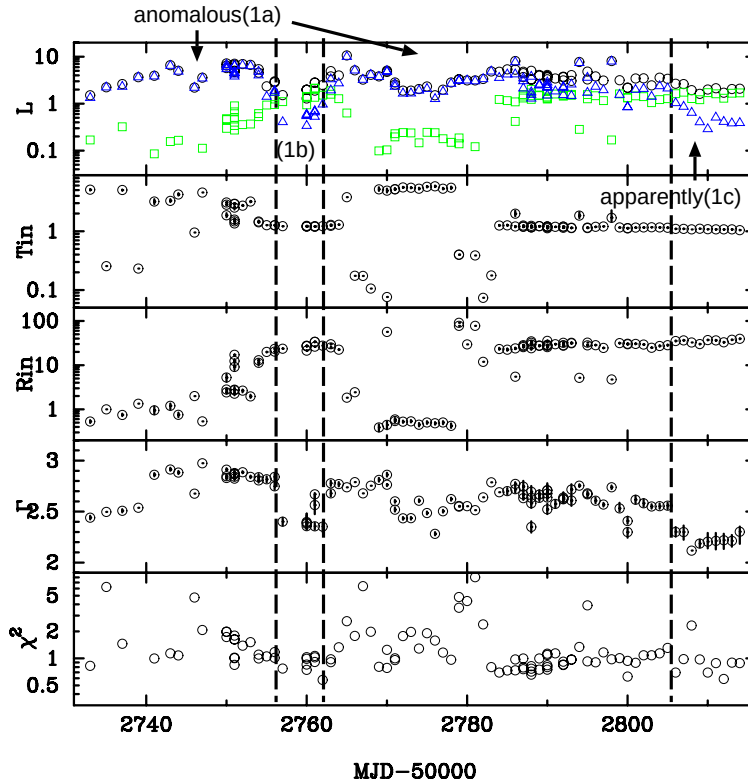


図 5.41: H 1743-322 の標準降着円盤モデルによるフィッティング結果。上から X 線光度 (単位: $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 T_{in} (keV)、 R_{in} (km)、power-law のべき Γ 、reduced χ^2 を表し、横軸は $\text{MJD}-50000$ である。X 線光度の図では黒、緑、青はそれぞれ L_{tot} 、 L_{disk} 、 L_{pow} となっている。

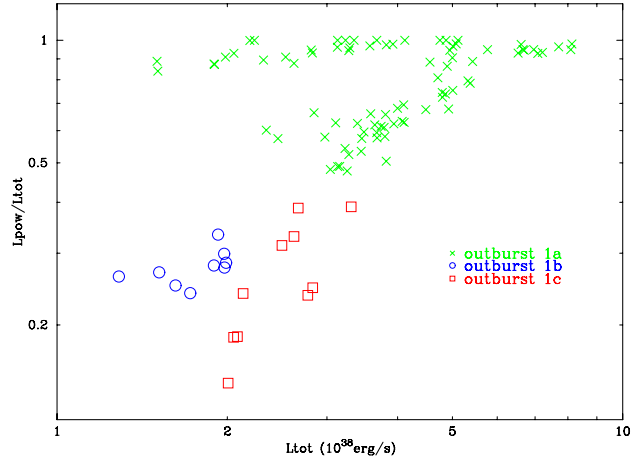
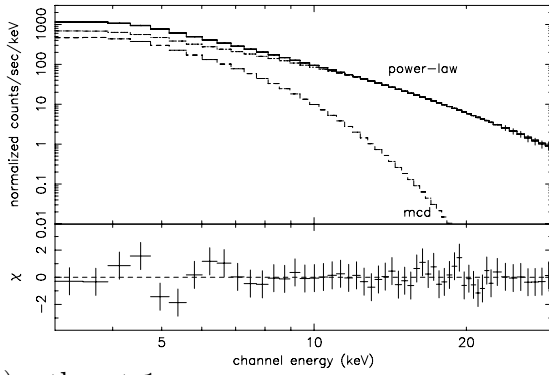
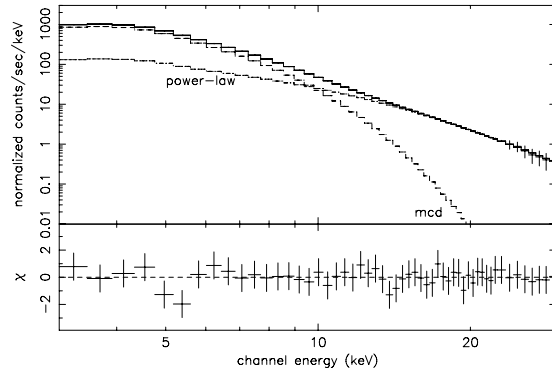


図 5.42: $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関図。

(a) outburst 1a



(b) outburst 1b



(c) outburst 1c

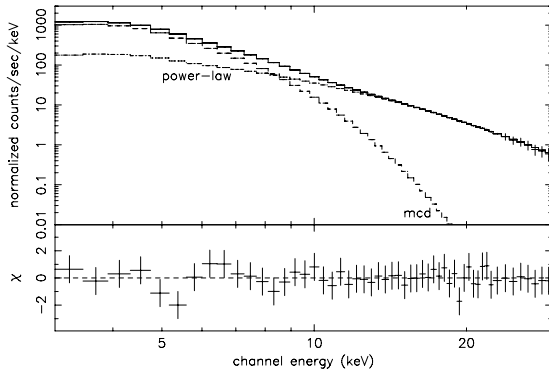


図 5.43: outburst 1a、1b、1c の典型的なスペクトル。

5.6.3 逆コンプトン散乱を考慮したフィッティング

outburst 1a と 1b について 3 成分モデルでフィッティングを行う。 $T_e=20\text{keV}$ で固定して、seed photon の温度は MCD モデルの T_{in} と同じ値になるようにする。 N_{H} は標準降着

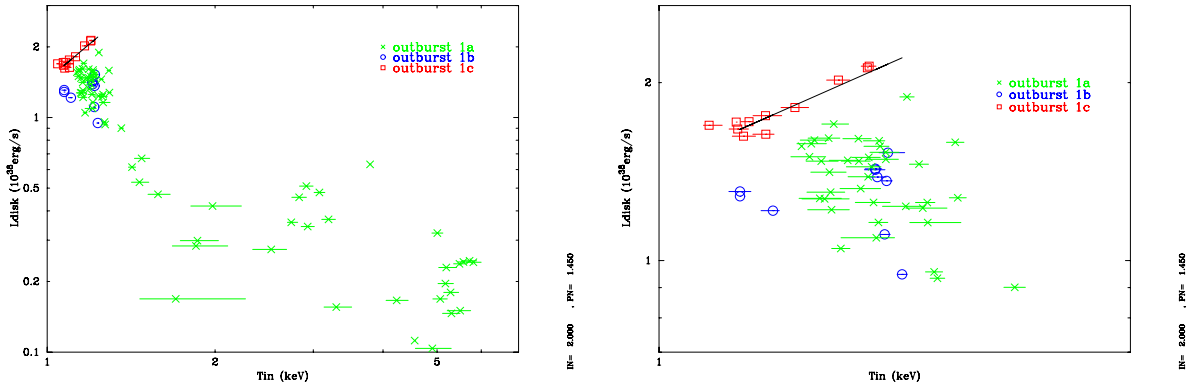


図 5.44: L_{disk} と T_{in} の相関図。直線は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係を表す。右の図は左図の $T_{\text{in}}=1.0$ – 1.5 かつ $L_{\text{disk}}=(0.7\text{--}2.7)\times 10^{38}$ erg s $^{-1}$ の領域を拡大表示したものである。

円盤モデルのときと同様に 2.0×10^{22} cm $^{-2}$ とし、power-law モデルのべきはブラックホール連星の典型的な値である 2.2 に固定する。このような条件のもとで得られたフィッティング結果を図 5.45 に示す。

outburst 1a の MJD–50000 > 2783 のデータは reduced $\chi^2 \sim 1$ とよく合っていて、 R_{in} も 40–50km とほぼ一定の値が得られた。このときのスペクトルは図 5.46(a) に示すように compbb 成分が支配的になっている。MJD–50000 < 2783 のデータは reduced χ^2 が 2 を越えるものが多く、 R_{in} が一定にならずに変動している。図 5.46(b) からこれらのスペクトルは compbb モデルのみでフィッティングされていることが分かる。 L_{disk} と T_{in} の相関図をみると、図 5.47(a) では outburst 1a のデータは $L_{\text{disk}} + L_{\text{cbb}}$ が非常に大きい。電子雲から受け取ったエネルギーの影響を取り除くと (b) のように $T_{\text{in}} \sim 1\text{keV}$ (MJD–50000 > 2783 のデータ) では $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ のライン上にのることが分かる。また outburst 1b では reduced χ^2 は良いが R_{in} が小さいままで、そのスペクトルは図 5.46(c) のように MCD 成分が強くうまく逆コンプトン散乱が考慮されていないようである。そのため図 5.47 でも $L_{\text{disk}} \sim T_{\text{in}}^4$ に従わない。

この天体では、outburst 1a の一部と outburst 1b では逆コンプトン散乱を入れても R_{in} が一定にならずうまく説明することができなかった。これは電子雲の温度 T_e を 20keV に固定していることが原因の 1 つではないかと考えられる。この 20keV という値は 4U 1630–47 の解析から得られたものであるので H 1743–322 には適当ではないかもしれない、また電子温度が常に一定に保たれているとも限らない。そこで図 5.45 の R_{in} のパネルに示した A、B、C の 3 つのデータについて T_e を変えて T_{in} と R_{in} の変化をみた。その結果を図 5.48 に示す。

A は outburst 1b のデータである。 $T_e=20\text{keV}$ に固定していると逆コンプトン散乱成分があまり入らず R_{in} は小さいままであった。 T_e を高くしても逆コンプトン散乱成分は増えず R_{in} 、 T_{in} ともに変化はほとんどない。 T_e を下げると 7keV まではあまり変わらないが、

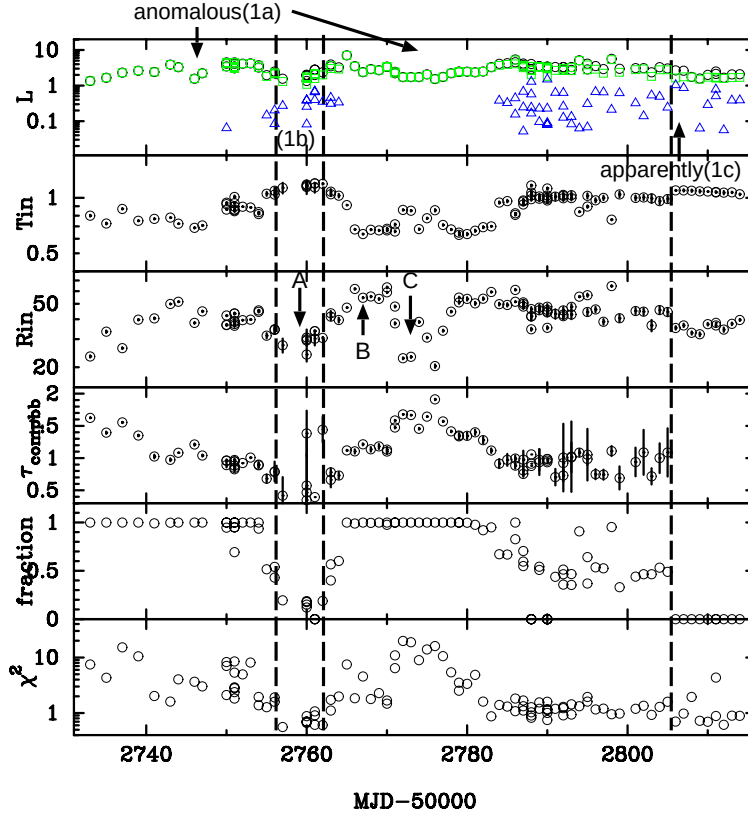
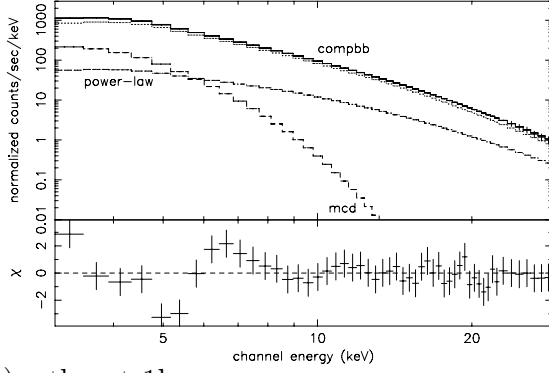


図 5.45: 逆コンプトン散乱を考慮した結果。 *anomalous regime*、(1b) と *apparently standard regime* はそれぞれは 3 成分モデルと標準降着円盤モデルのフィッティング結果を示す。上から X 線光度 (単位は $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 T_{in} (keV)、 R_{in} (km)、電子雲の光学的な深さ τ_{compbb} 、 $L_{\text{cbb}} / (L_{\text{cbb}} + L_{\text{dbb}})$ 、reduced χ^2 である。

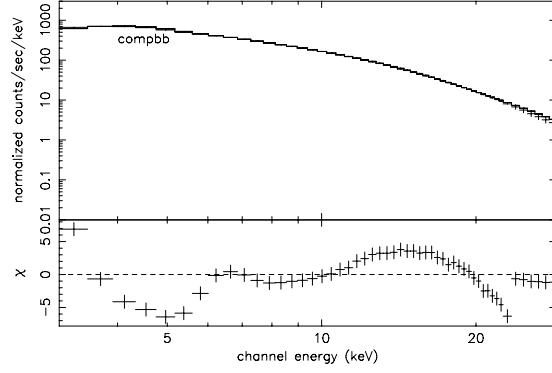
7keV より小さくなると逆コンプトン散乱成分が強くなり R_{in} が大きくなる。これまでのように、 R_{in} の変動を逆コンプトン散乱成分で説明しようとするならば、 $T_e \sim 5\text{keV}$ が適当であるという結果が得られた。

B と C はどちらも outburst 1a のデータだが、 $T_e=20\text{keV}$ のとき B は R_{in} がやや大きく、C はやや小さい。 T_e を高くすると、どちらも T_{in} が大きくなり R_{in} は小さくなる。反対に T_e を低くすると、 T_{in} は小さくなり R_{in} は大きくなる傾向がみられた。A と同様に考えると B では $T_e=20\text{--}30\text{keV}$ 、C では $\sim 10\text{keV}$ となる。したがって T_e は常に 20keV に保たれてはおらず、さらに変動している可能性が示された。

(a) outburst 1a (MJD-50000=2786)



(b) outburst 1a (MJD-50000=2773)



(c) outburst 1b

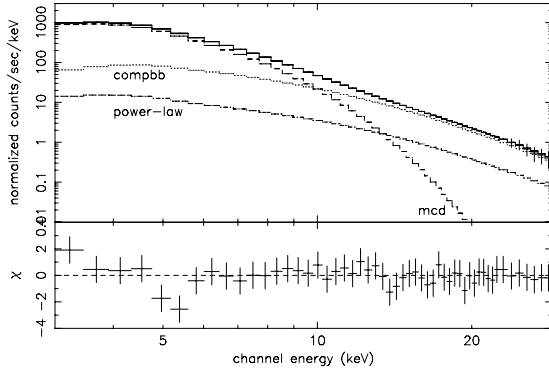
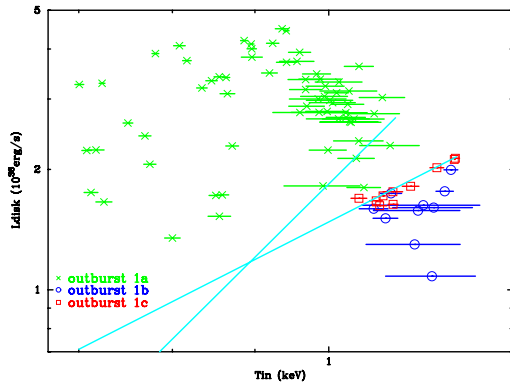


図 5.46: 3 成分モデルでフィットした outburst 1a と 1b のスペクトルを示す ((a) と (c) はそれぞれ図 5.43(a)(b) と同じデータである)。

(a)



(b)

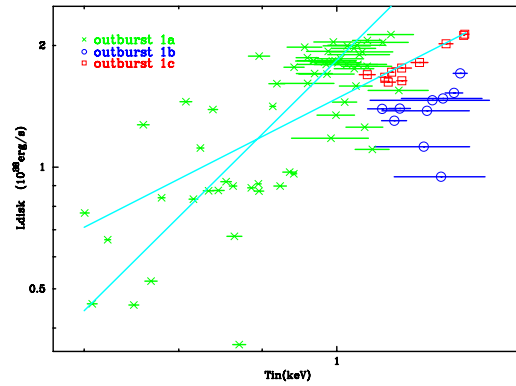
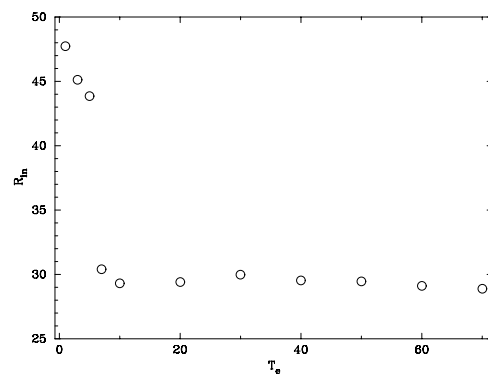
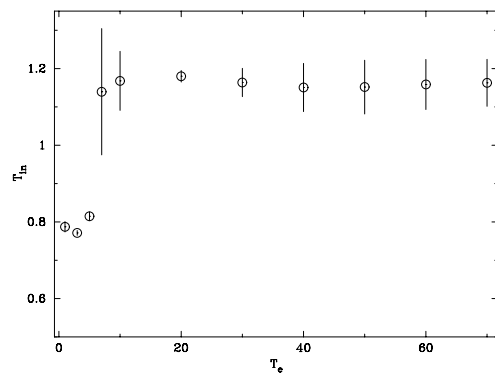
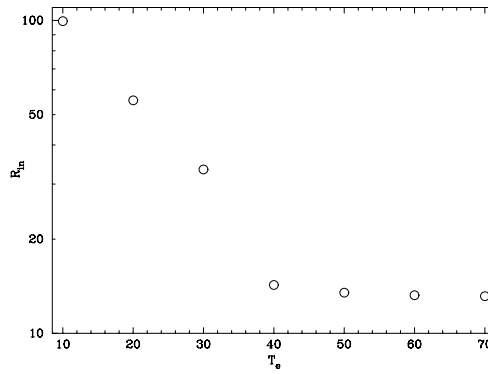
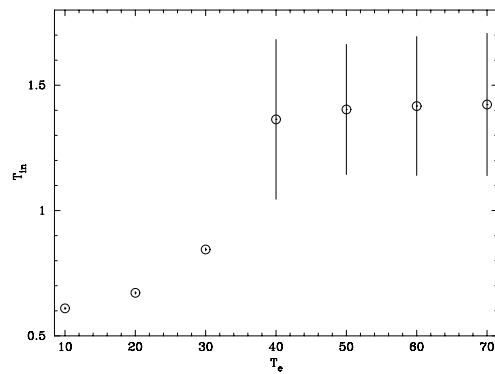


図 5.47: L_{disk} vs. T_{in} の相関図。傾きの急な直線は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ で、ゆるやかな直線は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係を表す。ただし縦軸は (a) $(L_{\text{disk}} + L_{\text{cbb}})$ 、(b) $L_{\text{disk}}^{\text{int}}$ である。

A (outburst 1b)



B (outburst 1a)



C (outburst 1a)

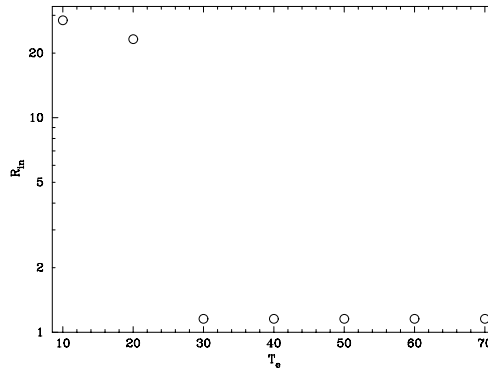
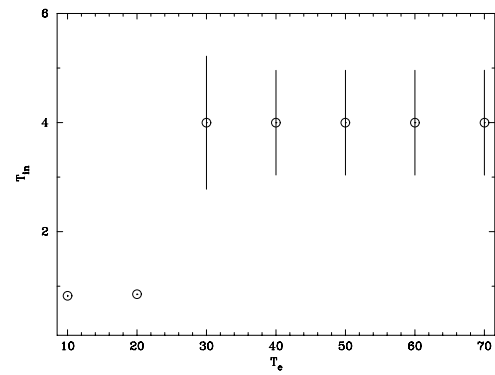


図 5.48: T_e を変化させたときの T_{in} と R_{in} の変動

5.6.4 slim disk の証拠

ここでは outburst 1c のデータについて行った p -free モデルでの解析結果について述べる。これまでと同じく $N_{\text{H}}=2.0\times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、power-law のべきを 2.2 に固定してフィッティングを行い、結果を図 5.49 に示す。この図の横軸は標準降着円盤モデルで得られた T_{in} の値である。今回の解析では *standard regime* の状態にあるデータがなかったため相対的な比較はできない。しかし p の値は 0.5–0.7 と 0.75 より小さく、図 5.44 で $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ を示すことなどから、outburst 1c は *apparently standard regime* の状態にある可能性が高いといえる。

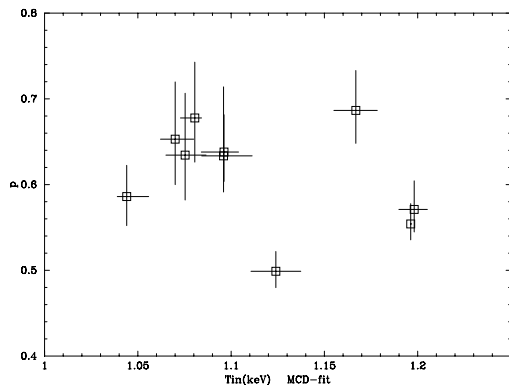


図 5.49: p と T_{in} の相関図を示す。 T_{in} は標準降着円盤モデルによるフィッティングで得られた値を使っている。

5.7 時系列解析

ここからは時系列解析の結果について述べていく。まず最初に very high state のときによく見つかっている QPO が 4U 1630–47 でも現れるかどうかを確認するためにパワースペクトルの解析を行った。次に、MCD 成分と逆コンプトン散乱成分の変動の違いを利用して *standard regime* と *anomalous regime* の時期が区別できないかについて調べた。

5.7.1 QPO

§2.4.5 で述べたように、very high state では 0.1–30 Hz の周波数の低い QPO がしばしば現れる。そこで 4U 1630–47 の 5 つのアウトバーストについて時系列解析を行った。0.1–100 Hz のパワースペクトルを power-law + Lorentzian モデルでフィットしたところいくつかのデータで QPO が現れることがわかり、図 5.50 に示している。

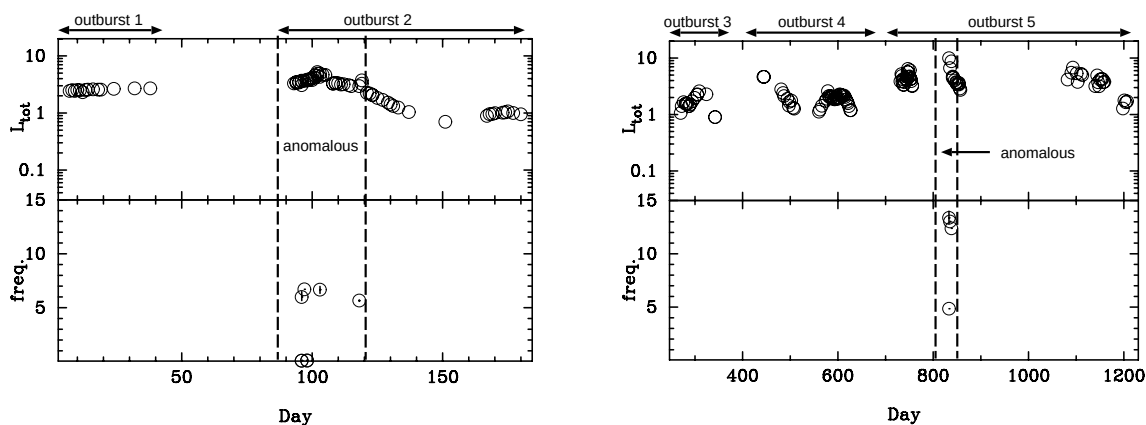


図 5.50: 上が §5.1.1 で求めた X 線光度 (単位は $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$) で、下が QPO の周波数 (Hz) である。横軸は図 5.4 と同様で outburst 1~5 のそれぞれに対して MJD–50200、MJD–50762、MJD–51038、MJD–51420、MJD–51798 である。

outburst 2a では Tomsick et al. (2000) によってすでに QPO の存在が報告されていたが、本研究から outburst 5b でも QPO が現れることが分かった。したがって、4U 1630–47 の QPO は *anomalous regime* のすべての観測データで見られるわけではないが、*anomalous regime* でのみ現れる。また Sobczak et al. (2000) で報告されているのと同様に、4U 1630–47 でも QPO 周波数とフラックスに正相関が確認できた (図 5.51)。

今回このような解析は 4U 1630–47 についてのみ行ったが、4 章で述べたように XTE J1859+226 や GX 339–4 の *anomalous regime* でも QPO がみられることがすでに報告されている。

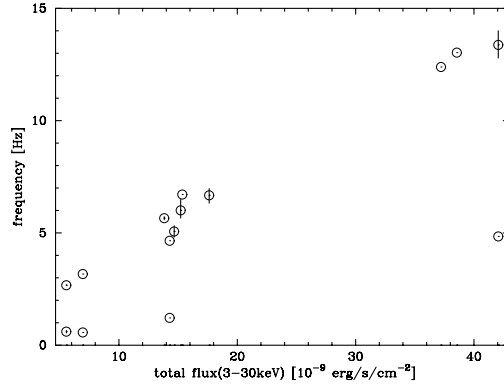


図 5.51: 4U 1630-47 についての QPO 周波数と 3-30keV のフラックスの間の相関

5.7.2 短時間の時間変動

短時間の時間変動をみると MCD 成分は比較的安定していて変動が小さいが、逆コンプトン散乱成分は不安定で大きく変動することが分かっている。したがって、この変動をみることで *standard regime* と *anomalous regime* の時期がはっきりと区別できると予想される。*standard regime* のときに MCD 成分が支配的になる 3-7keV と *anomalous regime* で逆コンプトン散乱成分が支配的な 7-15keV のエネルギーバンドで bin size が 16s のライトカーブを作り、次の式で rms を計算する。

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=-1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\bar{x}^2}}$$

N はライトカーブの bin 数、 x_i は i 番目のカウント数、 $\bar{x}$ はライトカーブの平均カウント数である。それぞれの天体について求めた rms を図 5.52～図 5.57 に示す。

6つの天体でほぼ同じ傾向がみられ、*standard regime* では rms の値は 0.05 以下で変動が小さいことが分かる。3-7keV より 7-15keV の方が rms がやや大きい、これは *standard regime* の高エネルギー側では変動の激しい power-law が支配的になっているためである。*anomalous regime* の rms は 0.1 より大きいものもあり、*standard regime* に比べて変動が大きい。また *apparently standard regime* では *standard regime* より変動が大きく、*anomalous regime* よりは変動が小さいという傾向がみられた。しかし 4U 1630-47 の outburst 4 と 5 の *apparently standard regime* は大きな変動を示している。この時期の *apparently standard regime* は他のものより power-law 成分が強くなっているために rms も大きくなっているのではないと思われる。また H 1743-322 は観測された全データで rms が大きく激しい変動を示していて、このことから *standard regime* である時期は H 1743-322 のデータ中には見られないということが分かる。

今回の解析から 3つの状態で変動の大きさに違いがあることが確認できた。しかし *apparently standard regime* と他の 2つとの違いはややあいまいなため、rms のみで区別する

のは難しいかもしれない。そのため、より正確に3つの状態を区別するにはスペクトル解析と時系列解析の両方を行うことが望ましいといえる。

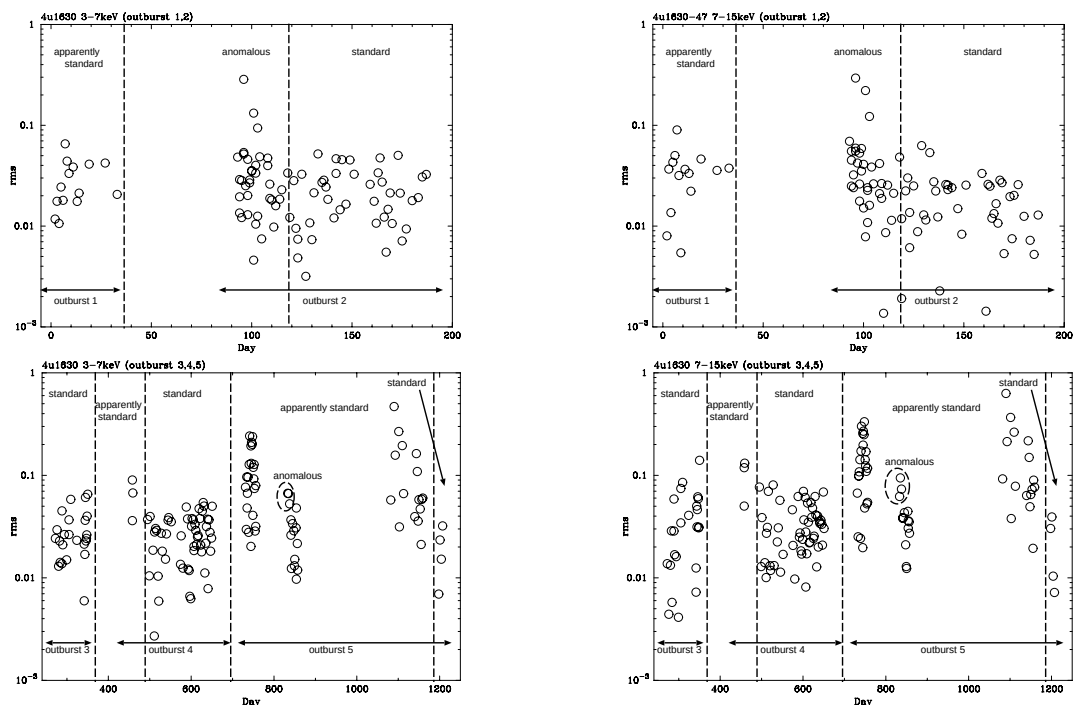


図 5.52: 4U 1630-47 の rms を示す。上の2つの図は outburst 1 と 2 で、下の2つが outburst 3、4、5 である。上下ともに右が 3-7keV、左が 7-15keV のエネルギーバンドで計算した rms を示している。(横軸は図 5.4 と同じ)

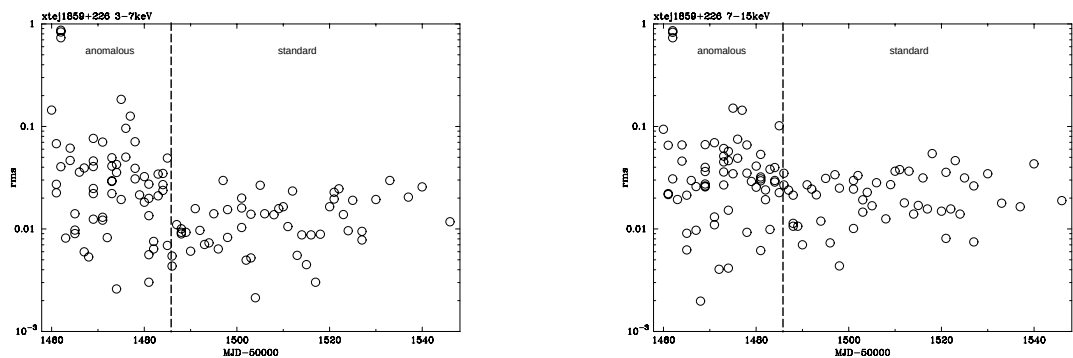


図 5.53: XTE J1859+226 の rms を示す。右図が 3-7keV で、左図が 7-15keV である。

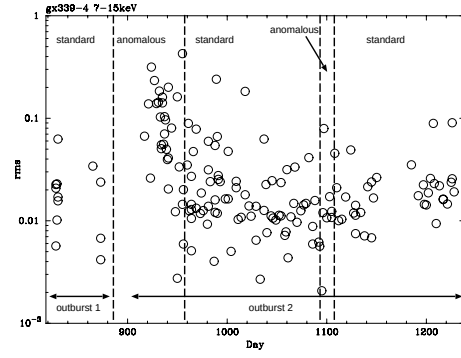
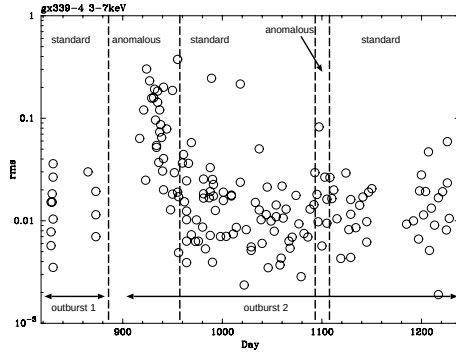


図 5.54: GX 339-4 の rms を示す。右図が 3-7keV で、左図が 7-15keV である。

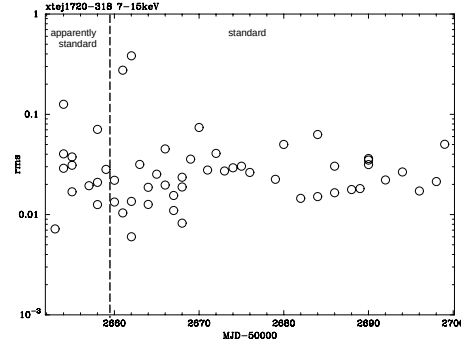
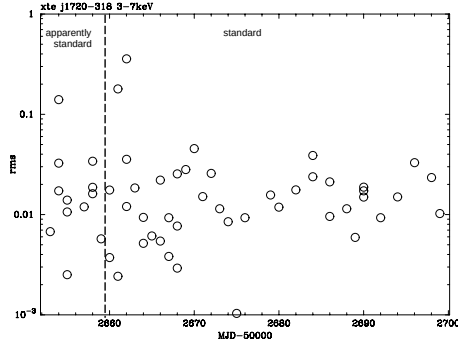


図 5.55: XTE J1720-318 の rms を示す。右図が 3-7keV で、左図が 7-15keV である。

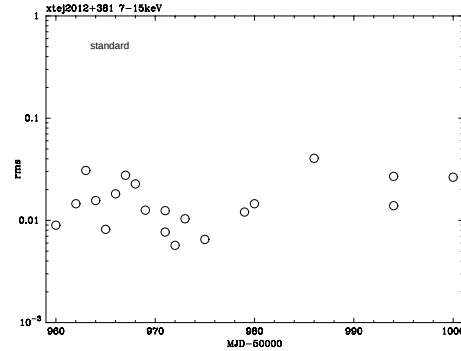
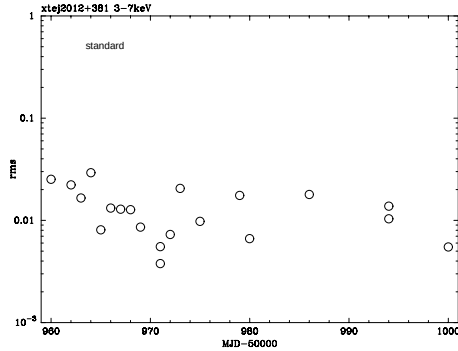


図 5.56: XTE J2012+381 の rms を示す。右図が 3-7keV で、左図が 7-15keV である。

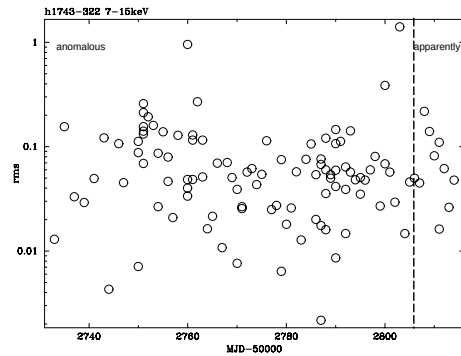
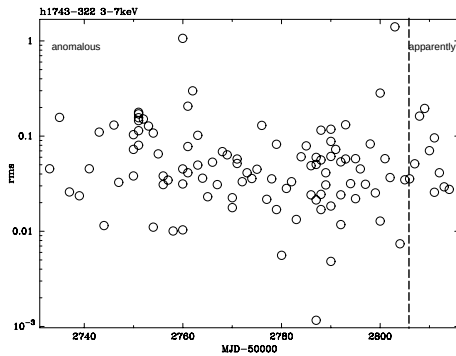


図 5.57: H 1743-322 の rms を示す。右図が 3-7keV で、左図が 7-15keV である。

5.8 個々の天体の結果とまとめ

今回我々は Kubota et al. (2001, 2004) による「質量降着率の高いブラックホール連星は *standard regime*、*anomalous regime*、*apparently standard regime* の3つの状態に分類できる」という描像が一般的に成り立つのかを調べるために、RXTE 衛星で観測された6つのブラックホール連星候補について解析を行った。それぞれの天体について得られた結果を以下に示す。

4U 1630–47

1996–2004 年に観測された5つのアウトバーストについて詳しく調べたところ、上記の3状態が確認できた。X線光度が $2.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ を下回っているときは *standard regime* の状態にあり、この値を越えると *anomalous regime* か *apparently standard regime* に遷移することがわかった。これら2つの状態は $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ の値で区別できる。 $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} > 0.45$ のときは *anomalous regime* を示し、0.45 以下のときは *apparently standard regime* を示す(図 5.11)。さらに *anomalous regime* のデータに逆コンプトン散乱を考慮すると *standard regime* で得られた R_{in} と一致し、30–50km となる ($D=10\text{kpc}$ 、 $\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{3}}$ と仮定)。しかしいくつかのデータでは逆コンプトン散乱を考慮すると *standard regime* で得られた R_{in} よりも大きくなり、コンプトン雲の下にある降着円盤が標準的な描像から少しずれているのではないかと考えられる状態もみられた。

XTE J1859+226

1999 年に起こったアウトバーストで *standard regime* と *anomalous regime* の2つがみつかった。*standard regime* は $L_{\text{tot}} < 2.6 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ のときにみられ、 $L_{\text{tot}} > 3.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ かつ $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} > 0.45$ では *anomalous regime* の状態になることがわかった(図 5.14)。したがって臨界光度は $2.6\text{--}3.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ の範囲内にあると考えられる。今回の解析によって得られた R_{in} は $D=11\text{kpc}$ 、 $\cos \theta=1$ とすると 40–60km になった。

GX 339–4

1997 年と 2003 年のアウトバーストについて解析を行った。1997 年のアウトバーストは観測データが少なく *standard regime* しか確認できなかったが、2003 年に起こったアウトバーストは 1997 年のものに比べてカウントレートが高く観測データも多い。このアウトバーストでは $L_{\text{tot}} > 0.3 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ かつ $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} > 0.45$ のときに *anomalous regime* が確認できた(図 5.23)。一方、 $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ のデータは臨界光度と考えられる $0.3 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ を越えているものもすべて $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係に従っていて、*standard regime* であると考えられる。 $D=4\text{kpc}$ 、 $\cos \theta=1$ とすると、GX 339–4 の R_{in} は 20–35km という結果

が得られた。

XTE J1720–318

この天体のアウトバーストは 2002 年に観測された。アウトバースト初期には *apparently standard regime* がみられ、その後 *standard regime* へと変化した。すべてのデータで $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ の値は 0.45 を大きく下回っていて、臨界光度は $\sim 1.3 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ である (図 5.31)。また *standard regime* のデータから得られた R_{in} は 75–85km である (ただし $D=10\text{kpc}$ 、 $\cos \theta=1$ と仮定)。

XTE J2012+381

1998 年に起こったアウトバーストを調べたところ、*standard regime* のみが確認された。 $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ は常に 0.2 より小さく (図 5.37)、 $R_{\text{in}}=43\text{--}47\text{km}$ と一定になっている ($D=10\text{kpc}$ 、 $\cos \theta=1$ と仮定)。

H 1743–322

2003 年のアウトバーストでは *standard regime* は見つからず、*anomalous regime* と *apparently standard regime* の 2 つが確認できた。この天体では $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ かつ臨界光度より低いデータが *standard regime* ではなく *anomalous regime* であると考えられ (図 5.42)、 $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ vs. L_{tot} を用いた分類が成り立たない。また逆コンプトン散乱をおこす電子雲の温度も一定ではなく変動している可能性がある。 $T_e=20\text{keV}$ でうまく説明できた *anomalous regime* の R_{in} は $D=10\text{kpc}$ 、 $\cos \theta=1$ と仮定すると 40–50km になった。

上記のスペクトル解析の結果から、質量降着率の高いブラックホール連星は *standard regime*、*anomalous regime*、*apparently standard regime* でほぼ説明できることがわかった。時系列解析では、すでに *anomalous regime* で QPO が報告されている XTE J1859+226 と GX 339–4 に続いて、4U 1630–47 の *anomalous regime* でも QPO の存在が確認できた。また MCD 成分と逆コンプトン散乱成分の短時間変動の大きさが異なることから予想されたように、3つの状態は rms の値に違いがあり、*standard regime*、*apparently standard regime*、*anomalous regime* の順に変動が大きくなっていく。

第6章 まとめと考察

6.1 まとめ

RXTE 衛星で観測された6つのブラックホール連星候補の解析を行った結果、これらの天体からの明るい状態のスペクトルは Kubota et al. (2001、2004) で報告された次の3つの異なるスペクトル状態のいずれかでほとんど説明できることが分かった。

- 標準的な降着円盤によってうまく説明され、X線光度が臨界光度よりも低いときに見られる

この *standard regime* では $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係を満たし、温度によらず降着円盤の内縁の半径は一定となる。また明るさの rms は 0.05 以下となっていて変動は小さい。

一方、臨界光度を越えると *anomalous regime* と *apparently standard regime* という2つの状態が現れる。

- *anomalous regime* は標準降着円盤モデルによるフィッティングを行うと power-law 成分が非常に強く、 R_{in} と T_{in} がブラックホール連星としては異常な値をとる

この支配的な power-law 成分は降着円盤からの放射の一部が逆コンプトン散乱を受けて高エネルギー側にたたき上げられた結果と考えられており、本研究でもこの考えを支持する結果が得られた。逆コンプトン散乱の影響を考慮すると R_{in} は *standard regime* での値と一致し、降着円盤のもっとも内側の半径は一定に保たれている。*anomalous regime* では QPO がしばしば現れ、また明るさの rms の値も大きく激しい変動を示している。

- *apparently standard regime* では *standard regime* とよく似たスペクトルが見られるが、降着円盤からの放射光度は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ に従う

これは降着円盤の内側の放射効率が低いことを示していて、slim disk のような状態にあると考えられる。今回は 4U 1630–47、XTE J1720–318、H 1743–322 で *apparently standard regime* が確認できた。

これまで very high state という現象論的な分類しかできていなかったものが標準降着円盤から物理的に予想されるズレで諸々の観測物理量がうまく説明できることが分かった。そして R_{in} = 一定からブラックホールの質量が求められるという手法がより広く適用されることになる。

このような描像はこれまで GRO J1655–40 と XTE J1550–564 の 2 つにしか適用されていなかったが、今回の解析からこの描像がブラックホール連星で一般的に成り立つことが確認された。しかし、H 1743–322 ではあまりうまく適用できず、また天体によってはある非常に明るい時期だけは上の 3 つのスペクトル状態でうまく説明できない場合があった。次節からは本研究で得られた 3 状態の分類法やブラックホールの質量、臨界光度、今後の課題について議論を進めていく。

6.2 統一的な分類法

今回の解析では 3 状態を区別するために 3 つの分類法を用いた。まず 1 つ目は標準降着円盤モデルでスペクトルをフィットしたときに得られる L_{disk} と T_{in} の相関図である。図 6.1 に示すように、X 線光度が臨界光度より低いときは $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の直線上にのっていて、これが *standard regime* である。これよりも X 線光度が高くなると次の 2 つの状態のどちらかに遷移する。*apparently standard regime* は 4U 1630–47 や XTE J1720–318、H 1743–322 で確認されたように $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係を示す。このとき T_{in} の値が同じでも $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の場合の L_{disk} より小さくなり、放射効率が低くなっていることが表れている。また *anomalous regime* のデータはどちらの関係からもそれていて図の右下に分布する。これは標準降着円盤モデルでは T_{in} が異常に大きくなり、power-law 成分が卓越するために L_{disk} が小さく見積もられるためである。この相関図を用いた方法は多くの天体では 3 つの状態をうまく分類することができた。ただし H 1743–322 のような *standard regime* が見られない、あるいはデータが少ないターゲットでは上記のような比例関係を見つけるのは困難であるため、基準となるものが得られずこの図だけでは判断が難しい場合がある。

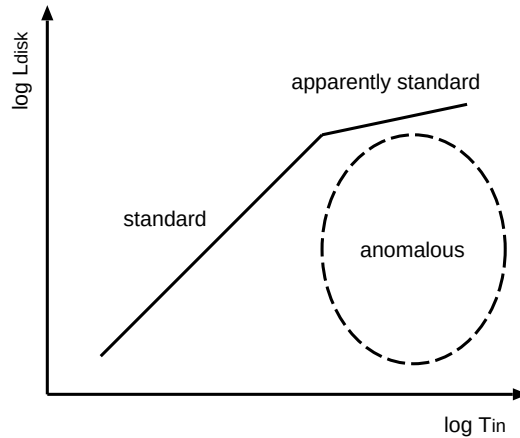


図 6.1: 標準降着円盤モデルで得られる L_{disk} vs. T_{in} の概略図。図中の直線は傾きが急なものが $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ 、ゆるやかなものが $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^2$ の関係を表す。

次に、今回我々は §5.1.6 で述べたように 4U 1630–47 の結果から標準降着円盤モデルに

天体名	臨界光度	$L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$	スペクトル状態
4U 1630-47	2.5	0.45	<i>standard</i> 、 <i>anomalous</i> 、 <i>apparently standard</i>
XTE J1859+226	2.6-3.5	0.45	<i>standard</i> 、 <i>anomalous</i>
GX 339-4	0.4-0.5	0.45	<i>standard</i> 、 <i>anomalous</i>
XTE J1720-318	1.3	>0.2	<i>standard</i> 、 <i>apparently standard</i>
XTE J2012+381	>0.95	>0.2	<i>standard</i>
H 1743-322	1.5	0.45	<i>anomalous</i> 、 <i>apparently standard</i>

表 6.1: 今回の解析で得られた臨界光度（単位は $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ ）、*anomalous regime* が現れる $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ の値と確認されたスペクトルの状態を示す。

よるフィットで得られる $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot} の相関図による3つの状態の分類法を見出した。これはX線光度がある臨界光度 L_c よりも低いときは *standard regime* を示し、臨界光度以上かつ $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} > 0.45$ のときは *anomalous regime*、臨界光度以上かつ $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ のときは *apparently standard regime* の状態にあるというものである。表 6.1 に今回用いたターゲットの臨界光度と $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ を示す。また図 6.2 には全てのターゲットの $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ と L_{tot}/L_c の相関をまとめてプロットしている。天体ごとに L_{tot} の範囲が異なるため横軸は L_{tot} をそれぞれの天体の臨界光度で割った値を用いている。この図を見ると、黒と赤でプロットしたものが 4U 1630-47、XTE J1859+226、XTE J1720-318、XTE J2012+381、GX 339-4 の5つの天体のデータであるが、ほぼきれいに分類されていることが分かる。なお、赤で示した GX 339-4 では §5.3.3 で述べたように立ち上がりのデータは不安定であることが多く、挙動が異なるため除いている。緑で示した H 1743-322 では $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ のデータが *anomalous regime* の状態にあるなど、天体の一部では上記の分類が成り立っていない。H 1743-322 はデータの大部分が今回調べた3状態のいずれでもうまく説明されなかったことと関係すると思われる。

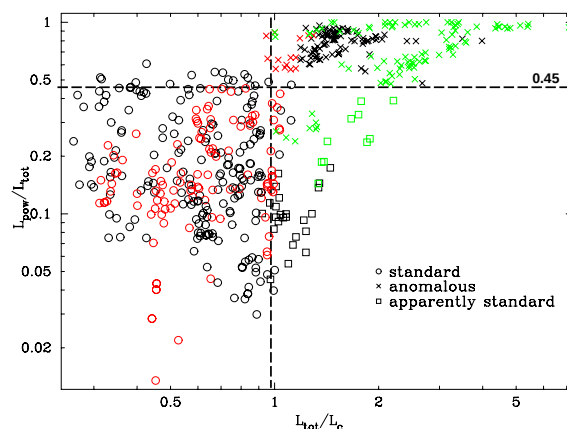


図 6.2: すべてのターゲットの $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ vs. L_{tot}/L_c 。赤は GX 339-4、緑は H 1743-322、黒はそれ以外の4つの天体のデータである。

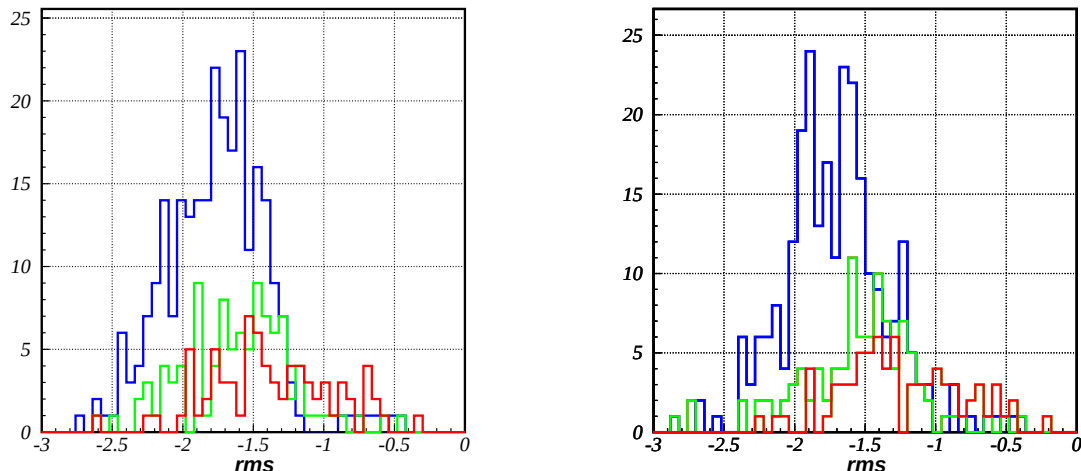


図 6.3: ライトカーブから求めた rms の頻度分布 (横軸は $\log_{10}$ をとっている)。左が 3–7keV で、右が 7–15keV の結果を示す。全天体の結果をまとめていて、青が *standard regime*、緑が *anomalous regime*、赤が *apparently standard regime* である。

最後に §5.7 で述べた時系列解析から分類する方法がある。*anomalous regime* ではときどき QPO が現れるが他の 2 つの状態ではほとんど確認されていない。今回 4U 1630–47 でも 3 状態のうち *anomalous regime* でのみ QPO が現れることが示され、さらに XTE J1859+226 と GX 339–4 の *anomalous regime* でも QPO が見られる (Nowak et al. 2000、Cui et al. 2000)。しかし XTE J1748–288 の high/soft state(=*standard regime*) では QPO がみられたり (Revnivtsev et al. 2000)、*anomalous regime* でも常に現れるというわけではないので注意が必要である。また 3 つの状態では明るさの rms の大きさにも違いが見られる。今回用いたターゲットについての rms の頻度分布を図 6.3 に示す。すでに述べたように GX 339–4 の立ち上がりと H 1743–322 は 3 つの状態であまりうまく説明できないためこの図から除いている。この図のうち、7–15keV のハードバンドでは *standard regime* の rms は 3 つの状態の中で最も小さく、*anomalous regime* と *apparently standard regime* は rms が大きくて変動が激しいという傾向が見られる。*anomalous regime* と *apparently standard regime* のピークはほとんど同じであるため、これら 2 つの状態を区別するのはやや難しい。このハードバンドでは *standard regime* の場合は power-law 成分、*anomalous regime* では逆コンプトン散乱成分が支配的であるので、大きな rms は逆コンプトン散乱をおこす電子雲の物理状態の激しい変動を示す。また、*apparently standard regime* の場合は *standard regime* と同じ power-law で記述されるため、*standard regime* と *apparently standard regime* では power-law の起源が異なることを意味する。3–7keV では *standard regime* の rms が最も小さく、他の 2 つの状態のピークは *standard regime* のものよりやや大きくなっている。一方、3–7keV のソフトバンドは *standard regime* では降着円盤からの放射成分(=MCD 成分)が支配的であり、変動が小さい。*anomalous regime* ではこの MCD 成分に加えて逆コンプトン散乱成分含まれるため変動が大きいものもある。*apparently standard regime* で

は *standard regime* と同じく MCD 成分が支配的だが、rms が大きく降着円盤の内側部分が不安定になっていることを示す。

これらの分類法のどれか1つだけではすべてのブラックホール連星のスペクトル状態を完全に分類することは難しいが、複数の分類法を組み合わせることによってほとんどのブラックホール連星のスペクトル状態を分類できると考えられる。よってこれまで全体に対する power-law 成分の割合と QPO の有無で分類されていたものが、本研究によって L_{disk} と T_{in} の関係、 $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ の値、rms の大きさなど視覚的、数値的に分類することができることが分かった。

6.3 Very High Stateなどのこれまでの分類との関係

これまで明るい時期のブラックホール連星の状態はスペクトル解析とタイミング解析により、現象論的に high state/very high state/intermediate state などと分類されている。very high state は非常に光度が高いときに 2.4 以上のべきをもつ power-law 成分と QPO の出現によって特徴づけられる状態である。このような特徴をもつスペクトルは光度が低いときにも観測されることがあるので光度に関係なくべきが急な power-law をもつ状態は steep power-law state とも呼ばれており、very high state と完全に一致しているわけではない。また very high state では逆コンプトン散乱の X 線が現れているということが示唆されていたが、それをスペクトル解析で定量的に示したのは Kubota et al. (2001, 2004) が初めてである。very high state/intermediate state の分類は非常にあいまいで人によって定義が異なることがあるが、ここでは特に very high state との関連について述べていく。

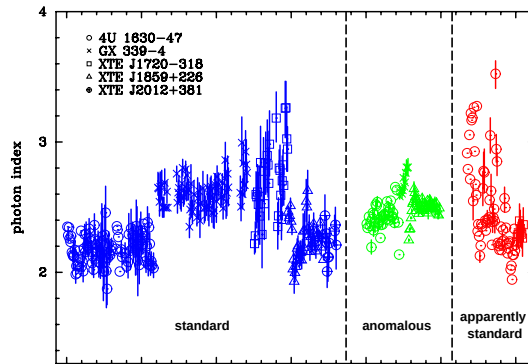


図 6.4: 標準降着円盤モデルで得られた power-law モデルのべき

図 6.4 に GX 339-4 の立ち上がりと H 1743-322 のデータを除いた全データの標準降着円盤モデルで得られた power-law モデルのべきを示す。anomalous regime のデータではべきがだいたい 2.3-2.8 になっていて上で述べた very high state の定義を満たしているといえる。一方、standard regime では 4U 1630-47、XTE J1859+226、XTE J2021+381 では 2.0-2.3 だが、GX 339-4 と XTE J1720-318 では 2.4 より大きい。GX 339-4 の MJD=52419

ではQPOも確認されているため McClintock et al. (2004) では very high state に分類されている。しかし本研究ではこのデータを含めた GX 339-4 の大部分は $L_{\text{disk}} \propto T_{\text{in}}^4$ の関係に従い、 $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}} < 0.45$ となるため *standard regime* に分類している。また、明るさの rms も他の天体の *standard regime* に似ていて小さい。本研究では3状態の分類でQPO解析をあまり行っていないため GX 339-4 のQPOが観測データ中で一般的に見られるのかめったに見られないのかは不明であり、今後の課題の一つである。今回 *anomalous regime* として分類したものは基本的に very high state と同じであるが完全に一致しているわけではなく、very high state の中でも power-law 成分が弱い傾向にあるときに相当する。power-law 成分が非常に強い very high state はアウトバーストの立ち上がり時期や low/hard state の直後などにあらわれ、このとき降着円盤は最も内側の安定軌道まで形成されていないと考えられている (Kubota and Done 2004)。また *apparently standard regime* はスペクトルの形からこれまで high/soft state に分類されていた。したがって、これまで現象論的に high/soft state や very high state に分類されていたものの大部分が物理的な描像がはっきりした3状態で分類できることが確認できた。しかし GX 339-4 の立ち上がりや H 1743-322 など物理的な描像がはっきりしない時期があり、今後の課題である。

6.4 ブラックホールの質量

anomalous regime でみられた R_{in} の変動は逆コンプトン散乱を考慮することで *standard regime* のものと一致することが分かった。したがって、*standard regime* の R_{in} と補正後の *anomalous regime* の R_{in} がもっとも内側の安定軌道を表しているとみなす。§2.4.2 で述べたように R_{in} とブラックホールの質量 M_{BH} には $R_{\text{in}} = 6GM_{\text{BH}}/c^2$ の関係があり、それぞれの天体についてこの式を用いて計算した結果を表 6.2 に示す。ただし D と $\cos \theta$ がはっきり求まっていないため表に示すような不確かさがある。

XTE J1859+226 と GX 339-4 では相手の星の観測などによって D が推定されているが、他の天体では明らかにされていない。McClintock et al. (2004) によると XTE J1859+226 は $D=11\text{kpc}$ 、 $M_{\text{BH}}=7.6\text{--}12M_{\odot}$ である。今回の結果がこの値と一致するには $\cos^{-\frac{1}{2}} \theta \sim 1.7$ 、つまり $\theta \sim 70^\circ$ であることが要求される。また GX 339-4 の質量は $2.3\text{--}3.9 \left(\frac{D}{4\text{kpc}}\right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta M_{\odot}$ であり、ブラックホールである有力条件 $M_{\text{BH}} > 3M_{\odot}$ を満たすには $\left(\frac{D}{4\text{kpc}}\right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta > 1.3$ が条件になる。この値の上限はエディントン光度を用いることで制限できる。エディントン光度とは天体が安定して放射できるX線光度の限界で、放射圧と重力のつりあいにより、 $L_{\text{edd}} \sim 2 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \text{erg s}^{-1}$ である。よって GX 339-4 のエディントン光度は $4.6 \times 10^{38} \text{erg s}^{-1}$ となる。また最大X線光度 L_{max} は $6 \times 10^{37} \left(\frac{D}{4\text{kpc}}\right)^2 \cos^{-1} \theta$ なので $L_{\text{max}} < L_{\text{edd}}$ より、 $\left(\frac{D}{4\text{kpc}}\right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta < 7.7$ となる。

他の4天体についても同様に $M_{\text{BH}} > 3M_{\odot}$ 、 $L_{\text{max}} < L_{\text{edd}}$ から D と θ の不定性を制限してみる。4U 1630-47 では $0.7 < \left(\frac{D}{10\text{kpc}}\right) \left(\frac{\cos \theta}{1/\sqrt{3}}\right)^{-\frac{1}{2}} < 0.9$ になる。Galactic N_{H} は 2.0 でフィッ

表 6.2: R_{in} 、ブラックホールの質量、フィッティングによって得た水素柱密度 $N_{\text{H}}(\text{fit})$ 、銀河を見通したときに予想される Galactic N_{H} (単位はどちらも 10^{22} cm^{-2})

天体名	R_{in} (km)	M_{BH} ($M_{\odot}$)	$N_{\text{H}}(\text{fit})$	Galactic N_{H}
4U 1630–47	$30\text{--}50 \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \left(\frac{\cos \theta}{1/\sqrt{3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$	$3.4\text{--}5.6 \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \left(\frac{\cos \theta}{1/\sqrt{3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$	9.5	2.0
XTE J1859+226	$40\text{--}60 \left(\frac{D}{11\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	$4.5\text{--}6.8 \left(\frac{D}{11\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	0.5	0.22
GX 339–4	$20\text{--}35 \left(\frac{D}{4\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	$2.3\text{--}3.9 \left(\frac{D}{4\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	0.2	0.5
XTE J1720–318	$75\text{--}85 \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	$8.4\text{--}9.6 \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	0.3	0.7
XTE J2012+381	$43\text{--}47 \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	$4.8\text{--}5.3 \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	0.8	1.2
H 1743–322	$50\text{--}60 \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	$5.6\text{--}6.8 \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta$	2.0	0.6

トして得られた値 9.5 よりかなり小さくなっている。Galactic N_{H} は $D=10\text{kpc}$ としているため 4U 1630–47 の D が 10kpc 以上である可能性があるが、分子雲の存在によっても N_{H} は大きくなるため断定はできない。XTE J1720–318 では $0.34 < \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta < 9.0$ となりほとんど制限できない。この天体の Galactic N_{H} は 0.7 であるがフィッティングでは 0.3 になるため 10kpc より近くにあると考えられる。XTE J2012+381 は $0.6 < \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta < 10.1$ となり、また XTE J1720–318 と同様に N_{H} の値から距離は 10kpc より小さいと予想される。H 1743–322 では $0.5 < \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \cos^{-\frac{1}{2}} \theta < 1.6$ となる。 N_{H} の値をみると、Galactic N_{H} が 0.6 でフィッティングによる値が 2.0 であるので 4U 1630–47 と同じように 10kpc より遠方にあるか、地球とこの天体との間に分子雲が存在すると考えられる。

よってどのブラックホールも 3–10 $M_{\odot}$ 程度のブラックホールと考えられ、重い星が超新星爆発を起こした後にできたと予想される。

6.5 臨界光度

standard regime と *anomalous regime*、*apparently standard regime* を分ける臨界光度 L_{c} は表 6.3 に示すように天体に固有の値である。また 4U 1630–47 や GX 339–4 のように複数のアウトバーストが観測されている場合も L_{c} はアウトバーストごとに異なるのではなく 1 つの天体で共通している。このことは L_{c} がなんらかの物理メカニズムによって決まっていることを意味する。この表には §6.3 で求めたブラックホールの質量から計算したエディントン光度 L_{edd} 、臨界光度とエディントン光度の比 $L_{\text{c}}/L_{\text{edd}}$ 、臨界光度のときの T_{in} の値も示している。

$L_{\text{c}}/L_{\text{edd}}$ はこれら 9 つの天体でばらばらの値を示している。しかし真の距離と傾斜角を D と θ とし今回仮定したものを D と θ とすると L_{c} には $\left(\frac{D}{D} \right)^2 \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta} \right)^{-1}$ 、 L_{edd} には $\left(\frac{D}{D} \right) \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta} \right)^{-\frac{1}{2}}$

天体名	L_c	L_{edd}	L_c/L_{edd}	T_{in}	相手の星
4U 1630-47	2.5	6.8-11.2	0.22-0.37(0.15-0.33)	1.2	—
XTE J1859+226	2.6-3.5	9.0-13.6	0.22-0.33(0.12-0.46)	0.9	G
GX 339-4	0.4-0.5	4.6-7.8	0.064-0.11(0.08-0.85)	0.9	—
XTE J1720-318	1.3	16.8-19.2	0.068-0.077(0.023-0.69)	0.7	—
XTE J2012+381	>0.95	9.6-10.6	>0.09(>0.05)	>0.8	—
H 1743-322	1.5	11.2-13.6	0.11-0.13(0.06-0.21)	1.1	—
GRO J1655-40	1.9	1.1	0.17	1.2	F
XTE J1550-564	6	15	0.40	1.0	G-K
LMC X-3	>9.3	10	>0.9	>1.3	B

表 6.3: 臨界光度 L_c とエディントン光度 L_{edd} (単位はどちらも $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$)、 L_c/L_{edd} 、臨界光度になるときの T_{in} (keV)。上の 6 つは今回の解析で用いた天体で、下の 3 天体は Kubota et al. (2001、2004) を参照している。

の不定性があるため、 L_c/L_{edd} には $(\frac{D}{D}) (\frac{\cos \theta}{\cos \theta})^{-\frac{1}{2}}$ の不定性が残る。そこで表中のかっこの中にはこの不定性を考慮した L_c/L_{edd} の値を示している。GRO J1655-40、XTE J1550-564、LMC X-3 は D と θ が精度良く求まっているためあまり不定性はないと考えられる。したがって、不定性を考慮した L_c/L_{edd} の値をみると XTE J2012+381 と LMC X-3 を除く 7 つの天体でエディントン光度の数 10% に達したときに遷移が起こっている。LMC X-3 だけはエディントン光度近くになっても *standard regime* を示しているため L_c/L_{edd} の値のみが条件とは言えないかもしれない。 T_{in} についても同様に天体ごとに異なる値を示していて、 T_{in} の値のみで状態が決まるわけではないことが分かる。

ここで連星系の相手の星について考えてみる。恒星のスペクトル型には O - B - A - F - G - K - M があり、O 型がもっとも質量が重く M 型へいくにつれて軽くなる。エディントン光度に近づいても *standard regime* を示す LMC X-3 の相手の星は B 型と重く、他の天体の場合は F-K となっていて比較的軽い。よって 1 つの可能性として、相手の星の質量が重い場合は *anomalous regime* や *apparently standard regime* が現れにくいのかもしれない。重い星では星風によって放出された物質がブラックホールに降着し、軽い星では自己重力の及ぶ限界であるロッシュローブを越えた物質が降着するので、このような違いが影響しているのかもしれない。

6.6 今後の課題

今回の解析では、6 つのブラックホール連星候補のほとんどのデータが §6.1 の描像でうまく説明できたが、よく理解できなかったものとして次の 3 つが上げられる。

- 天体で最も明るい時期

4U 1630–47 の最も明るい時期のデータに逆コンプトン散乱を考慮すると *standard regime* で得られた R_{in} より大きくなる。これは非常に光度が高いためコンプトン雲の下にある降着円盤自体が放射圧によって吹きとばされ、 R_{in} が大きくなっているのかもしれない。

- low/hard state から high/soft state になった直後

一般的にアウトバーストの立ち上がりは不安定な状態にある。GX 339–4 ではこの立ち上がりのデータを除くと $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ vs. L_{tot} の分類でうまく説明できる。また XTE J1550–564 について Kubota and Done (2004) で報告されているように、降着円盤が最も内側までできていない状態であるかもしれない。

- H 1743–322

outburst 1b では $L_{\text{pow}}/L_{\text{tot}}$ が 0.45 を大きく下回っているため一般的な *anomalous regime* に比べて、 L_{disk} が強い、または L_{pow} が弱くなっていると考えられる。この時期ではX線光度が急激に下がっているため、§5.6.3 で述べたようにコンプトン雲の電子温度 T_e が 20keV から ~5keV へ変化しているのかもしれない。 $T_e \sim 5\text{keV}$ であるため逆コンプトン散乱を受けてもあまり高エネルギー側までたたき上げられず、power-law 成分が他の *anomalous regime* より弱い可能性がある。また、もしブラックホールが回転していれば、降着円盤は回転していない場合よりも内側まで形成されるために大きな L_{disk} が観測される。

今回用いた分類ではQPOなどの時系列の情報をあまり参考にしておらず、また *anomalous regime* や *apparently standard regime* に遷移する条件についても不確かであるのでさらに詳しい解析が必要である。

付 録 A RXTEの観測ログ

表 A.1: 4U 1630-47 の全データリスト 1

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
10411-01-01-00	1996-05-08	50211	2976.0	30172-01-09-00	1998-04-01	50904	9296.0
10411-01-02-00	1996-05-03	50206	2976.0	30172-01-10-00	1998-04-03	50906	6784.0
10411-01-03-00	1996-05-04	50207	2976.0	30172-01-11-00	1998-04-04	50907	9408.0
10411-01-04-00	1996-05-06	50209	64.0	30172-01-12-00	1998-04-06	50909	4800.0
10411-01-05-00	1996-05-07	50210	3360.0	30172-01-13-00	1998-04-08	50911	9312.0
10411-01-06-00	1996-05-05	50208	2032.0	30172-01-14-00	1998-04-10	50913	8928.0
10411-01-07-00	1996-05-09	50212	3360.0	30172-01-15-00	1998-04-20	50923	9728.0
10411-01-08-00	1996-05-10	50213	3344.0	30172-01-16-00	1998-04-21	50924	9504.0
10411-01-09-00	1996-05-11	50214	2784.0	30172-01-17-00	1998-04-22	50925	1536.0
10411-01-11-00	1996-05-13	50216	3760.0	30172-01-17-01	1998-04-23	50926	224.0
10411-01-13-00	1996-05-15	50218	2864.0	30172-01-17-02	1998-04-24	50927	368.0
10411-01-14-00	1996-05-16	50219	2720.0	30172-01-17-03	1998-04-25	50928	368.0
10411-01-15-00	1996-05-21	50224	1824.0	30172-01-17-04	1998-04-26	50929	416.0
10411-01-16-00	1996-05-29	50232	3808.0	30172-01-17-05	1998-04-27	50930	464.0
10411-01-17-00	1996-06-04	50238	3728.0	30172-01-17-06	1998-04-28	50931	464.0
10411-01-18-00	1996-05-03	50206	1456.0	30172-01-17-07	1998-04-29	50932	752.0
30172-01-01-00	1998-03-11	50883	6912.0	30172-01-18-00	1998-05-02	50935	1104.0
30172-01-01-01	1998-03-04	50876	1824.0	30172-01-18-01	1998-05-03	50936	960.0
30172-01-01-02	1998-03-05	50877	1712.0	30172-01-18-02	1998-05-04	50937	512.0
30172-01-01-03	1998-03-08	50880	1136.0	30172-01-18-03	1998-05-06	50939	736.0
30172-01-01-04	1998-03-09	50881	1152.0	30172-01-18-04	1998-05-09	50942	672.0
30172-01-02-00	1998-03-13	50885	6192.0	30172-01-18-05	1998-05-12	50945	352.0
30172-01-02-01	1998-03-13	50885	2800.0	30172-01-18-06	1998-05-14	50947	976.0
30172-01-03-00	1998-03-15	50887	9584.0	30172-01-18-07	1998-05-16	50949	864.0
30172-01-04-00	1998-03-20	50892	4736.0	30172-01-18-08	1998-05-18	50951	1344.0
30172-01-05-00	1998-03-19	50891	9152.0	30172-01-18-09	1998-05-19	50952	880.0
30172-01-06-00	1998-03-21	50893	9456.0	30172-01-18-10	1998-05-20	50953	1328.0
30172-01-07-00	1998-03-23	50895	9072.0	30172-01-18-11	1998-05-23	50956	1344.0
30172-01-08-00	1998-03-27	50899	1200.0	30172-01-18-12	1998-05-25	50958	1216.0
30172-01-08-01	1998-03-26	50898	128.0	30172-01-18-13	1998-05-28	50961	912.0
30172-01-08-02	1998-03-28	50900	832.0	30172-01-18-14	1998-05-29	50962	1328.0
30172-01-08-03	1998-04-01	50904	896.0	30172-01-18-15	1998-06-01	50965	1472.0
30172-01-08-04	1998-04-18	50921	480.0	30172-01-18-16	1998-06-04	50968	624.0

表 A.2: 4U 1630–47 の全データリスト 2

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
30172-01-18-17	1998-06-06	50970	496.0	30188-02-22-00	1998-02-28	50872	6048.0
30172-01-18-18	1998-03-11	50883	880.0	30188-02-23-00	1998-03-01	50873	1744.0
30178-01-01-00	1998-02-09	50853	1056.0	40112-01-01-00	1999-12-25	51537	928.0
30178-01-02-00	1998-02-09	50853	1168.0	40112-01-03-00	1999-12-26	51538	976.0
30178-01-03-00	1998-02-11	50855	1488.0	40112-01-05-00	1999-12-27	51539	912.0
30178-01-04-00	1998-02-12	50856	1728.0	40112-01-06-00	1999-12-28	51540	896.0
30178-01-05-00	1998-02-13	50857	1488.0	40112-01-07-00	1999-12-28	51540	832.0
30178-01-06-00	1998-02-14	50858	1520.0	40112-01-09-00	1999-12-29	51541	896.0
30178-01-07-00	1998-02-15	50859	1424.0	40112-01-10-00	1999-12-30	51542	1664.0
30178-01-08-00	1998-02-16	50860	1232.0	40112-01-11-00	1999-12-30	51542	880.0
30178-01-09-00	1998-02-17	50861	1376.0	40112-01-12-00	1999-12-31	51543	848.0
30178-01-10-00	1998-02-18	50862	1712.0	40112-01-13-00	1999-12-31	51543	864.0
30178-01-11-00	1998-02-19	50863	1296.0	40112-01-14-00	2000-01-01	51544	848.0
30178-01-12-00	1998-02-20	50864	1648.0	40112-01-15-00	2000-01-01	51544	672.0
30178-01-13-00	1998-02-23	50867	1584.0	40112-01-16-00	2000-01-02	51545	752.0
30178-01-14-00	1998-02-26	50870	1952.0	40112-01-17-00	2000-01-02	51545	816.0
30178-01-15-00	1998-03-02	50874	1456.0	40112-01-18-00	2000-01-03	51546	1424.0
30178-01-16-00	1998-03-09	50881	1936.0	40112-01-19-00	2000-01-03	51546	976.0
30178-01-17-00	1998-03-12	50884	1632.0	40112-01-20-00	2000-01-04	51547	656.0
30178-01-18-00	1998-03-17	50889	1456.0	40112-01-21-00	2000-01-04	51547	928.0
30178-01-19-00	1998-03-25	50897	1600.0	40112-01-22-00	2000-01-04	51547	752.0
30178-01-20-00	1998-03-31	50903	1280.0	40112-01-23-00	2000-01-05	51548	800.0
30178-02-02-00	1998-02-13	50857	464.0	40112-01-24-00	2000-01-06	51549	832.0
30188-02-02-00	1998-02-12	50856	2064.0	40112-01-26-00	2000-01-07	51550	944.0
30188-02-03-00	1998-02-12	50856	1728.0	40112-01-27-00	2000-01-08	51551	816.0
30188-02-05-00	1998-02-13	50857	2528.0	40112-01-30-00	2000-01-11	51554	880.0
30188-02-06-00	1998-02-14	50858	2416.0	40112-01-31-00	2000-01-11	51554	864.0
30188-02-07-00	1998-02-14	50858	2448.0	40112-01-33-00	2000-01-12	51555	704.0
30188-02-08-00	1998-02-16	50860	2064.0	40112-01-34-00	2000-01-13	51556	960.0
30188-02-09-00	1998-02-16	50860	1840.0	40112-01-35-00	2000-01-13	51556	928.0
30188-02-10-00	1998-02-17	50861	1984.0	40112-01-36-00	2000-01-14	51557	1776.0
30188-02-11-00	1998-02-18	50862	3200.0	40418-01-01-00	1999-05-08	51306	1600.0
30188-02-12-00	1998-02-19	50863	2624.0	40418-01-02-00	1999-05-10	51308	3456.0
30188-02-13-00	1998-02-20	50864	1280.0	40418-01-03-00	1999-05-12	51310	896.0
30188-02-14-00	1998-02-20	50864	1120.0	40418-01-06-00	1999-05-16	51314	784.0
30188-02-15-00	1998-02-21	50865	1568.0	40418-01-08-00	1999-05-20	51318	1904.0
30188-02-16-00	1998-02-21	50865	944.0	40418-01-09-00	1999-05-22	51320	1520.0
30188-02-17-00	1998-02-22	50866	1472.0	40418-01-10-00	1999-05-24	51322	1280.0
30188-02-21-00	1998-02-27	50871	2240.0	40418-01-12-00	1999-05-28	51326	688.0
30188-02-21-01	1998-02-27	50871	1440.0	40418-01-12-01	1999-05-28	51326	800.0

表 A.3: 4U 1630-47 の全データリスト 3

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
40418-01-13-00	1999-05-30	51328	2464.0	50135-02-06-00	2001-01-17	51926	2368.0
40418-01-15-00	1999-06-03	51332	3152.0	50135-02-07-00	2001-01-19	51928	1968.0
40418-01-16-00	1999-06-08	51337	1232.0	50135-02-10-00	2001-01-25	51934	1792.0
40418-01-17-00	1999-06-14	51343	1152.0	50135-02-11-00	2001-01-27	51936	1904.0
40418-01-17-01	1999-06-14	51343	400.0	50135-02-15-00	2001-02-04	51944	912.0
40418-01-18-03	1999-06-18	51347	1344.0	50135-02-16-00	2001-02-06	51946	896.0
40418-01-19-00	1999-07-03	51362	768.0	50135-02-18-00	2001-02-10	51950	1984.0
40418-01-22-00	1999-07-21	51380	1280.0	50135-02-19-00	2001-02-12	51952	1952.0
40418-01-22-01	1999-07-21	51380	1120.0	50135-02-22-00	2001-02-18	51958	1904.0
40418-01-23-00	1999-07-22	51381	1792.0	50135-02-24-00	2001-02-22	51962	1904.0
40418-01-24-00	1999-07-23	51382	1776.0	50135-02-25-00	2001-02-24	51964	1920.0
40418-01-25-00	1999-07-24	51383	1664.0	50135-02-26-00	2001-02-26	51966	816.0
40418-01-26-00	1999-07-25	51384	1712.0	50135-02-26-01	2001-02-26	51966	896.0
40418-01-27-00	1999-07-26	51385	944.0	50135-02-27-00	2001-02-28	51968	1904.0
40418-01-28-00	1999-07-27	51386	1072.0	50135-02-28-00	2001-03-02	51970	1904.0
40418-01-29-00	1999-07-28	51387	1136.0	60118-01-01-00	2001-03-12	51980	1888.0
40418-01-30-00	1999-07-29	51388	1232.0	60118-01-02-00	2001-03-14	51982	1360.0
40418-01-31-00	1999-07-30	51389	1472.0	60118-01-03-00	2001-03-18	51986	1584.0
40418-01-32-00	1999-07-31	51390	1424.0	60118-01-04-00	2001-03-26	51994	1744.0
40418-01-33-00	1999-08-01	51391	1424.0	60118-01-05-00	2001-03-29	51997	1920.0
40418-01-34-00	1999-08-03	51393	2384.0	60118-01-06-00	2001-03-31	51999	896.0
40418-01-35-00	1999-08-04	51394	1776.0	60118-01-07-00	2001-04-02	52001	1568.0
40418-01-36-00	1999-08-05	51395	1008.0	60118-01-08-00	2001-04-04	52003	2016.0
40418-01-37-00	1999-08-07	51397	832.0	60118-01-09-00	2001-04-06	52005	1872.0
40418-01-37-01	1999-08-07	51397	544.0	60118-01-10-00	2001-04-08	52007	1392.0
40418-01-38-00	1999-08-08	51398	784.0	60118-01-11-00	2001-04-09	52008	1792.0
40418-01-40-00	1999-08-10	51400	896.0	60118-01-12-00	2001-04-12	52011	1152.0
40418-01-41-00	1999-08-12	51402	1104.0	60118-01-13-00	2001-04-14	52013	848.0
40418-01-45-00	1999-09-15	51436	2240.0	60118-01-13-01	2001-04-14	52013	832.0
50120-01-01-00	2000-11-16	51864	1808.0	60118-01-14-00	2001-04-16	52015	1312.0
50120-01-02-00	2000-11-16	51864	3280.0	60118-01-15-00	2001-04-18	52017	2256.0
50120-01-02-01	2000-11-17	51865	704.0	60118-01-16-00	2001-04-20	52019	1600.0
50120-01-05-00	2000-12-23	51901	1456.0	60118-01-17-00	2001-04-22	52021	1728.0
50120-01-06-00	2000-12-27	51905	1952.0	60118-01-18-00	2001-04-24	52023	2000.0
50120-01-07-00	2000-12-29	51907	1648.0	60118-01-19-00	2001-04-26	52025	2112.0
50120-01-09-00	2001-01-05	51914	1328.0	60118-01-20-00	2001-04-28	52027	2080.0
50135-02-01-00	2001-01-08	51917	1984.0	60118-01-21-00	2001-04-30	52029	1840.0
50135-02-02-00	2001-01-09	51918	1968.0	60118-01-22-00	2001-05-02	52031	2144.0
50135-02-03-00	2001-01-11	51920	1824.0	60118-01-23-00	2001-05-04	52033	2304.0
50135-02-04-00	2001-01-13	51922	1984.0	60118-01-24-00	2001-05-06	52035	1488.0

表 A.4: 4U 1630-47 の全データリスト 4

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
60118-01-25-00	2001-05-08	52037	1504.0	70417-01-04-05	2002-09-25	52542	1184.0
60118-01-26-00	2001-05-10	52039	1776.0	70417-01-04-06	2002-09-26	52543	1408.0
60118-01-27-00	2001-05-12	52041	1856.0	70417-01-05-00	2002-10-04	52551	1392.0
60118-01-28-00	2001-05-14	52043	1376.0	70417-01-05-01	2002-10-05	52552	816.0
60118-01-29-00	2001-05-17	52046	1120.0	70417-01-05-02	2002-10-07	52554	1792.0
60118-01-30-00	2001-05-18	52047	1200.0	70417-01-05-03	2002-10-07	52554	864.0
60118-01-31-00	2001-05-20	52049	1376.0	70417-01-05-04	2002-10-08	52555	1376.0
60118-01-32-00	2001-05-22	52051	1408.0	70417-01-05-05	2002-10-09	52556	880.0
60118-01-33-00	2001-05-24	52053	1904.0	70417-01-05-06	2002-10-10	52557	848.0
60118-01-34-00	2001-05-26	52055	1024.0	70417-01-06-00	2002-10-11	52558	2592.0
60118-01-35-00	2001-05-28	52057	1072.0	70417-01-06-01	2002-10-12	52559	2768.0
60118-01-36-00	2001-05-30	52059	1024.0	70417-01-06-02	2002-10-13	52560	3328.0
60118-01-37-00	2001-06-01	52061	1840.0	70417-01-06-03	2002-10-14	52561	2736.0
60118-01-38-00	2001-06-03	52063	1744.0	70417-01-07-00	2002-11-19	52597	1152.0
60118-01-39-00	2001-06-05	52065	1360.0	70417-01-07-01	2002-11-19	52597	1152.0
60118-01-40-00	2001-06-07	52067	1184.0	70417-01-07-02	2002-11-16	52594	3440.0
60118-01-41-00	2001-06-09	52069	896.0	70417-01-07-03	2002-11-17	52595	3248.0
60118-01-41-01	2001-06-09	52069	896.0	70417-01-08-00	2002-12-23	52631	944.0
60118-01-42-00	2001-06-10	52070	1664.0	70417-01-08-01	2002-12-25	52633	1072.0
60118-01-43-00	2001-06-13	52073	1952.0	70417-01-09-00	2002-12-28	52636	6864.0
60118-01-44-00	2001-06-15	52075	1888.0	70417-01-09-01	2002-12-31	52639	2176.0
60118-01-45-00	2001-06-17	52077	2144.0	70417-01-09-02	2002-12-31	52639	720.0
70417-01-01-00	2002-09-12	52529	880.0	70417-01-09-03	2003-01-01	52640	944.0
70417-01-02-00	2002-09-14	52531	2448.0	70417-01-10-00	2003-01-04	52643	2656.0
70417-01-02-01	2002-09-15	52532	1296.0	70417-01-10-01	2003-01-08	52647	1696.0
70417-01-02-02	2002-09-16	52533	1104.0	70417-01-10-02	2003-01-07	52646	992.0
70417-01-02-03	2002-09-17	52534	816.0	70417-01-10-03	2003-01-09	52648	1744.0
70417-01-02-04	2002-09-18	52535	800.0	70417-01-10-04	2003-01-04	52643	1776.0
70417-01-02-05	2002-09-19	52536	3072.0	70417-01-11-00	2003-01-10	52649	3664.0
70417-01-03-00	2002-09-27	52544	816.0	70417-01-11-01	2003-01-12	52651	3840.0
70417-01-03-01	2002-09-28	52545	1488.0	70417-01-11-02	2003-01-12	52651	1088.0
70417-01-03-02	2002-09-29	52546	1488.0	70417-01-11-03	2003-01-12	52651	1072.0
70417-01-03-03	2002-09-30	52547	2400.0	70417-01-11-04	2003-01-13	52652	1456.0
70417-01-03-04	2002-10-01	52548	2224.0	70417-01-11-05	2003-01-13	52652	2576.0
70417-01-03-05	2002-10-02	52549	1248.0	70417-01-11-06	2003-01-14	52653	1760.0
70417-01-03-06	2002-10-03	52550	1120.0	70417-01-11-07	2003-01-16	52655	1904.0
70417-01-04-00	2002-09-20	52537	896.0	70417-01-11-08	2003-01-15	52654	1056.0
70417-01-04-01	2002-09-21	52538	1200.0	80417-01-01-00	2003-06-04	52794	1792.0
70417-01-04-02	2002-09-22	52539	1504.0	80420-01-01-00	2003-08-23	52874	1616.0
70417-01-04-04	2002-09-25	52542	544.0	80420-01-02-00	2003-08-29	52880	1312.0

表 A.5: 4U 1630-47 の全データリスト 5

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
80420-01-02-01	2003-09-01	52883	800.0	80420-01-12-00	2003-11-08	52951	1792.0
80420-01-02-02	2003-09-03	52885	1040.0	80420-01-12-01	2003-11-10	52953	1888.0
80420-01-02-03	2003-09-03	52885	1488.0	80420-01-12-02	2003-11-12	52955	1840.0
80420-01-02-04	2003-09-04	52886	1328.0	80420-01-13-00	2003-11-14	52957	1776.0
80420-01-03-00	2003-09-06	52888	944.0	80420-01-13-01	2003-11-18	52961	1856.0
80420-01-03-01	2003-09-09	52891	1136.0	80420-01-14-00	2003-12-23	52996	2320.0
80420-01-04-01	2003-09-17	52899	896.0	80420-01-15-00	2003-12-26	52999	1136.0
80420-01-05-00	2003-09-19	52901	1024.0	80420-01-15-01	2003-12-29	53002	2016.0
80420-01-06-00	2003-09-26	52908	928.0	80420-01-15-02	2004-01-01	53005	2400.0
80420-01-06-01	2003-09-29	52911	1184.0	80420-01-16-00	2004-01-04	53008	576.0
80420-01-06-02	2003-10-02	52914	1664.0	80420-01-16-01	2004-01-08	53012	864.0
80420-01-07-00	2003-10-05	52917	1248.0	80420-01-16-02	2004-01-04	53008	640.0
80420-01-07-01	2003-10-08	52920	1216.0	80420-01-16-03	2004-01-04	53008	640.0
80420-01-08-00	2003-10-11	52923	848.0	80420-01-16-04	2004-01-08	53012	832.0
80420-01-08-01	2003-10-15	52927	2288.0	80420-01-17-00	2004-01-11	53015	1824.0
80420-01-09-00	2003-10-17	52929	1520.0	80420-01-17-01	2004-01-14	53018	2000.0
80420-01-09-01	2003-10-20	52932	1600.0	80420-01-18-00	2004-01-17	53021	2032.0
80420-01-10-00	2003-10-24	52936	1504.0	80420-01-18-01	2004-01-20	53024	1408.0
80420-01-10-01	2003-10-30	52942	848.0	80420-01-18-02	2004-01-22	53026	1632.0
80420-01-10-02	2003-10-26	52938	1392.0	80420-01-19-00	2004-01-29	53033	1696.0
80420-01-11-00	2003-11-01	52944	1104.0	80420-01-19-01	2004-01-25	53029	992.0
80420-01-11-01	2003-11-06	52949	544.0	80420-01-19-02	2004-01-25	53029	736.0
80420-01-11-02	2003-11-03	52946	1120.0	80420-01-20-00	2004-02-01	53036	1536.0
80420-01-11-03	2003-11-05	52948	624.0				

表 A.6: XTE J1859+226 の全データリスト 1

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
40122-01-01-00	1999-10-18	51469	6944.0	40124-01-31-00	1999-10-27	51478	1056.0
40122-01-01-01	1999-10-18	51469	3344.0	40124-01-32-00	1999-10-28	51479	1648.0
40122-01-01-02	1999-10-18	51469	2240.0	40124-01-33-00	1999-10-29	51480	1408.0
40122-01-01-03	1999-10-18	51469	2496.0	40124-01-33-01	1999-10-29	51480	848.0
40122-01-02-00	1999-10-27	51478	688.0	40124-01-34-00	1999-10-30	51481	6736.0
40122-01-03-00	1999-11-06	51488	752.0	40124-01-34-01	1999-10-30	51481	2368.0
40122-01-03-01	1999-11-06	51488	1472.0	40124-01-34-02	1999-10-30	51481	2336.0
40122-01-04-00	1999-11-19	51501	2848.0	40124-01-35-00	1999-10-31	51482	6336.0
40122-01-04-01	1999-11-19	51501	2800.0	40124-01-35-01	1999-10-30	51481	2656.0
40124-01-05-00	1999-10-12	51463	912.0	40124-01-35-02	1999-10-30	51481	480.0
40124-01-06-00	1999-10-13	51464	1776.0	40124-01-36-00	1999-11-01	51483	7520.0
40124-01-07-00	1999-10-13	51464	816.0	40124-01-36-01	1999-10-31	51482	1424.0
40124-01-08-00	1999-10-14	51465	2832.0	40124-01-37-00	1999-11-01	51483	2704.0
40124-01-09-00	1999-10-14	51465	3200.0	40124-01-37-01	1999-11-02	51484	2080.0
40124-01-10-00	1999-10-14	51465	992.0	40124-01-37-02	1999-11-02	51484	6288.0
40124-01-11-00	1999-10-15	51466	1392.0	40124-01-38-00	1999-11-02	51484	5824.0
40124-01-12-00	1999-10-16	51467	1808.0	40124-01-38-01	1999-11-03	51485	2768.0
40124-01-13-00	1999-10-16	51467	1760.0	40124-01-39-00	1999-11-03	51485	5840.0
40124-01-14-00	1999-10-17	51468	3056.0	40124-01-40-00	1999-11-04	51486	1392.0
40124-01-15-00	1999-10-22	51473	688.0	40124-01-40-01	1999-11-04	51486	1152.0
40124-01-15-01	1999-10-22	51473	496.0	40124-01-41-00	1999-11-05	51487	2912.0
40124-01-15-02	1999-10-23	51474	832.0	40124-01-42-00	1999-11-06	51488	5072.0
40124-01-15-03	1999-10-23	51474	848.0	40124-01-43-00	1999-11-07	51489	4528.0
40124-01-16-00	1999-10-18	51469	1520.0	40124-01-44-00	1999-11-08	51490	4592.0
40124-01-17-00	1999-10-18	51469	1296.0	40124-01-45-00	1999-11-09	51491	2640.0
40124-01-18-00	1999-10-20	51471	2064.0	40124-01-46-00	1999-11-10	51492	5120.0
40124-01-19-00	1999-10-20	51471	3184.0	40124-01-47-00	1999-11-11	51493	4768.0
40124-01-20-00	1999-10-20	51471	1232.0	40124-01-48-00	1999-11-12	51494	2752.0
40124-01-21-00	1999-10-21	51472	2192.0	40124-01-48-01	1999-11-13	51495	2112.0
40124-01-22-00	1999-10-22	51473	2000.0	40124-01-49-00	1999-11-14	51496	2480.0
40124-01-23-00	1999-10-22	51473	816.0	40124-01-49-01	1999-11-15	51497	1920.0
40124-01-23-01	1999-10-22	51473	1040.0	40124-01-50-00	1999-11-16	51498	2160.0
40124-01-24-00	1999-10-23	51474	2032.0	40124-01-50-01	1999-11-16	51498	2304.0
40124-01-25-00	1999-10-23	51474	768.0	40124-01-51-00	1999-11-19	51501	2480.0
40124-01-26-00	1999-10-24	51475	6912.0	40124-01-51-01	1999-11-20	51502	1984.0
40124-01-27-00	1999-10-24	51475	1184.0	40124-01-51-02	1999-11-21	51503	5280.0
40124-01-28-00	1999-10-25	51476	2672.0	40124-01-51-03	1999-11-21	51503	2352.0
40124-01-28-01	1999-10-25	51476	1248.0	40124-01-52-00	1999-11-22	51504	2368.0
40124-01-29-00	1999-10-26	51477	3424.0	40124-01-52-01	1999-11-23	51505	2064.0
40124-01-30-00	1999-10-27	51478	2624.0	40124-01-52-02	1999-11-24	51506	2112.0

表 A.7: XTE J1859+226 の全データリスト 2

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
40124-01-53-00	1999-11-26	51508	2112.0	40124-01-56-02	1999-12-09	51521	2464.0
40124-01-53-01	1999-11-27	51509	2400.0	40124-01-57-00	1999-12-10	51522	2384.0
40124-01-53-02	1999-11-28	51510	2496.0	40124-01-57-01	1999-12-11	51523	2416.0
40124-01-53-03	1999-11-30	51512	2208.0	40124-01-57-02	1999-12-12	51524	2400.0
40124-01-54-00	1999-11-29	51511	2176.0	40124-01-58-00	1999-12-13	51525	1936.0
40124-01-54-01	1999-12-01	51513	3024.0	40124-01-58-01	1999-12-15	51527	2320.0
40124-01-54-02	1999-12-02	51514	2336.0	40124-01-58-03	1999-12-15	51527	1120.0
40124-01-55-00	1999-12-03	51515	2256.0	40124-01-59-00	1999-12-18	51530	2464.0
40124-01-55-01	1999-12-04	51516	2576.0	40124-01-59-01	1999-12-21	51533	2256.0
40124-01-55-02	1999-12-05	51517	1584.0	40124-01-60-00	1999-12-25	51537	3328.0
40124-01-55-03	1999-12-08	51520	1888.0	40124-01-60-01	1999-12-28	51540	3248.0
40124-01-56-00	1999-12-09	51521	2784.0	40124-01-61-00	2000-01-03	51546	3232.0
40124-01-56-01	1999-12-06	51518	3008.0	40124-01-61-01	2000-01-04	51547	3152.0

表 A.8: GX 339-4 の全データリスト 1

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
30165-01-01-00	1998-01-15	50828	2288.0	70109-01-10-00	2002-06-13	52438	2688.0
30165-01-02-00	1998-01-15	50828	2176.0	70109-01-10-01	2002-06-13	52438	1040.0
30165-01-03-00	1998-01-15	50828	2800.0	70109-01-10-02	2002-06-13	52438	1216.0
30165-01-04-00	1998-01-16	50829	2976.0	70109-01-11-00	2002-09-30	52547	96.0
30165-01-05-00	1998-01-16	50829	2784.0	70109-01-11-02	2002-11-01	52579	1360.0
30165-01-07-00	1998-01-17	50830	1168.0	70109-01-12-00	2002-06-26	52451	3152.0
30165-01-08-00	1998-01-17	50830	13360.0	70109-01-13-00	2002-07-04	52459	8704.0
30165-02-01-00	1998-02-21	50865	1568.0	70109-01-14-00	2002-10-08	52555	1680.0
30168-01-01-00	1998-03-02	50874	5712.0	70109-01-15-00	2002-07-13	52468	10576.0
30168-01-01-00	1998-03-01	50873	6432.0	70109-01-16-00	2002-07-24	52479	3376.0
30168-01-01-00	1998-03-01	50873	13232.0	70109-01-17-00	2002-08-01	52487	2400.0
30168-01-01-00	1998-03-01	50873	19536.0	70109-01-18-00	2002-08-03	52489	7600.0
40031-03-01-00	2002-04-18	52382	1600.0	70109-01-19-00	2002-08-09	52495	7216.0
40031-03-02-00	2002-04-19	52383	1776.0	70109-01-20-00	2002-08-18	52504	3296.0
40031-03-02-01	2002-04-20	52384	2528.0	70109-01-20-01	2002-08-18	52504	976.0
40031-03-02-02	2002-04-20	52384	4576.0	70109-01-21-00	2002-08-23	52509	3312.0
40031-03-02-03	2002-04-21	52385	5600.0	70109-01-22-00	2002-09-01	52518	3120.0
40031-03-02-04	2002-04-22	52386	2912.0	70109-01-23-00	2002-09-12	52529	1664.0
40031-03-02-05	2002-04-24	52388	1136.0	70109-01-24-00	2002-09-19	52536	2640.0
40031-03-02-06	2002-04-25	52389	128.0	70109-01-25-00	2002-09-26	52543	4704.0
40031-03-03-00	2002-05-20	52414	928.0	70109-01-26-00	2002-10-13	52560	3152.0
40031-03-03-01	2002-05-20	52414	544.0	70109-01-27-00	2002-11-01	52579	1600.0
40031-03-03-02	2002-05-20	52414	304.0	70109-01-28-00	2002-11-17	52595	3424.0
40031-03-03-03	2002-05-20	52414	1344.0	70109-01-29-00	2002-12-28	52636	2592.0
40031-03-03-04	2002-05-20	52414	1696.0	70109-01-30-00	2003-01-08	52647	3808.0
70108-03-01-00	2002-05-06	52400	8384.0	70109-01-31-00	2003-01-13	52652	3680.0
70108-03-02-00	2002-05-25	52419	6592.0	70109-01-32-00	2003-01-19	52658	2880.0
70108-03-03-00	2002-06-14	52439	10928.0	70109-01-33-00	2003-01-28	52667	3280.0
70109-01-01-00	2002-04-07	52371	1264.0	70109-01-34-00	2003-02-06	52676	288.0
70109-01-02-00	2002-04-03	52367	7024.0	70109-01-34-01	2003-02-06	52676	192.0
70109-01-03-00	2002-04-13	52377	1392.0	70109-01-35-00	2003-02-10	52680	2848.0
70109-01-04-00	2002-04-23	52387	11040.0	70109-01-35-01	2003-02-10	52680	1456.0
70109-01-05-00	2002-04-27	52391	2624.0	70109-01-36-00	2003-02-17	52687	2464.0
70109-01-05-01	2002-04-27	52391	2560.0	70109-01-36-01	2003-02-14	52684	1024.0
70109-01-05-02	2002-04-27	52391	2704.0	70109-01-36-02	2003-02-18	52688	1264.0
70109-01-06-00	2002-05-06	52400	1840.0	70109-01-37-00	2003-02-24	52694	3264.0
70109-01-07-00	2002-05-17	52411	5120.0	70109-03-01-00	2002-06-15	52440	12544.0
70109-01-08-00	2002-05-30	52424	544.0	70109-03-01-01	2002-06-16	52441	4464.0
70109-01-09-00	2002-06-06	52431	2064.0	70109-03-01-02	2002-06-16	52441	4560.0
70109-01-09-01	2002-06-06	52431	832.0	70109-04-01-00	2002-05-11	52405	6080.0
70109-01-09-02	2002-06-06	52431	1616.0	70109-04-01-01	2002-05-11	52405	9984.0

表 A.9: GX 339-4 の全データリスト 2

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
70109-04-01-02	2002-05-12	52406	1008.0	70110-01-34-00	2002-08-01	52487	832.0
70110-01-01-10	2003-04-11	52740	640.0	70110-01-35-00	2002-08-04	52490	784.0
70110-01-02-10	2003-04-14	52743	816.0	70110-01-36-00	2002-08-08	52494	944.0
70110-01-03-10	2003-04-18	52747	704.0	70110-01-37-00	2002-08-10	52496	928.0
70110-01-04-10	2003-04-22	52751	784.0	70110-01-38-00	2002-08-13	52499	1440.0
70110-01-05-10	2003-04-27	52756	752.0	70110-01-39-00	2002-08-16	52502	1216.0
70110-01-06-10	2003-05-01	52760	624.0	70110-01-40-00	2002-08-22	52508	896.0
70110-01-01-00	2002-04-09	52373	704.0	70110-01-41-00	2002-08-25	52511	912.0
70110-01-02-00	2002-04-10	52374	528.0	70110-01-42-00	2002-08-28	52514	896.0
70110-01-03-00	2002-04-15	52379	1360.0	70110-01-43-00	2002-08-31	52517	576.0
70110-01-04-00	2002-04-17	52381	1520.0	70110-01-44-00	2002-09-03	52520	688.0
70110-01-05-00	2002-04-21	52385	880.0	70110-01-45-00	2002-09-07	52524	1376.0
70110-01-06-00	2002-04-23	52387	384.0	70110-01-46-00	2002-09-10	52527	960.0
70110-01-07-00	2002-04-26	52390	352.0	70110-01-47-00	2002-09-15	52532	1200.0
70110-01-08-00	2002-04-30	52394	1616.0	70110-01-48-00	2002-09-19	52536	704.0
70110-01-09-00	2002-05-04	52398	1072.0	70110-01-49-00	2002-09-21	52538	624.0
70110-01-10-00	2002-05-08	52402	1040.0	70110-01-50-00	2002-09-25	52542	896.0
70110-01-11-00	2002-05-12	52406	832.0	70110-01-51-00	2002-09-28	52545	656.0
70110-01-12-00	2002-05-16	52410	1216.0	70110-01-52-00	2002-10-03	52550	896.0
70110-01-13-00	2002-05-18	52412	784.0	70110-01-53-00	2002-10-06	52553	864.0
70110-01-14-00	2002-05-22	52416	880.0	70110-01-54-00	2002-10-08	52555	1072.0
70110-01-15-00	2002-05-25	52419	880.0	70110-01-55-00	2002-10-11	52558	960.0
70110-01-16-00	2002-05-29	52423	672.0	70110-01-56-00	2002-10-15	52562	960.0
70110-01-17-00	2002-06-01	52426	976.0	70110-01-57-00	2002-10-18	52565	944.0
70110-01-18-00	2002-06-05	52430	928.0	70110-01-58-00	2002-10-22	52569	592.0
70110-01-19-00	2002-06-08	52433	1280.0	70110-01-59-00	2002-10-27	52574	896.0
70110-01-20-00	2002-06-12	52437	544.0	70110-01-60-00	2002-10-30	52577	864.0
70110-01-21-00	2002-06-15	52440	592.0	70110-01-61-00	2002-11-01	52579	864.0
70110-01-22-00	2002-06-18	52443	560.0	70110-01-62-00	2002-11-06	52584	864.0
70110-01-23-00	2002-06-23	52448	864.0	70110-01-63-00	2002-11-10	52588	560.0
70110-01-24-00	2002-06-26	52451	848.0	70110-01-64-00	2002-11-13	52591	640.0
70110-01-25-00	2002-06-29	52454	624.0	70110-01-65-00	2002-11-17	52595	912.0
70110-01-26-00	2002-07-04	52459	704.0	70110-01-66-00	2002-11-19	52597	1056.0
70110-01-27-00	2002-07-06	52461	784.0	70110-01-67-00	2002-11-22	52600	608.0
70110-01-28-00	2002-07-09	52464	736.0	70110-01-68-00	2002-11-25	52603	848.0
70110-01-29-00	2002-07-13	52468	832.0	70110-01-69-00	2002-12-27	52635	944.0
70110-01-30-00	2002-07-17	52472	816.0	70110-01-70-00	2003-01-01	52640	944.0
70110-01-31-00	2002-07-19	52474	656.0	70110-01-71-00	2003-01-03	52642	944.0
70110-01-32-00	2002-07-24	52479	624.0	70110-01-72-00	2003-01-09	52648	880.0
70110-01-33-00	2002-07-28	52483	928.0	70110-01-73-00	2003-01-11	52650	864.0

表 A.10: GX 339-4 の全データリスト 3

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
70110-01-74-00	2003-01-15	52654	800.0	70110-01-83-00	2003-02-16	52686	1040.0
70110-01-75-00	2003-01-18	52657	720.0	70110-01-84-00	2003-02-18	52688	704.0
70110-01-76-00	2003-01-21	52660	896.0	70110-01-85-00	2003-02-27	52697	1088.0
70110-01-77-00	2003-01-24	52663	768.0	70110-01-86-00	2003-02-23	52693	928.0
70110-01-78-00	2003-01-28	52667	528.0	70110-01-87-00	2003-03-02	52700	1184.0
70110-01-79-00	2003-02-01	52671	896.0	70111-01-01-00	2003-02-20	52690	3104.0
70110-01-80-00	2003-02-05	52675	896.0	70111-01-01-00	2003-02-20	52690	16032.0
70110-01-81-00	2003-02-08	52678	784.0	70130-01-01-00	2002-08-24	52510	3296.0
70110-01-82-00	2003-02-13	52683	784.0	70130-01-02-00	2002-09-29	52546	8432.0

表 A.11: H 1743–322 の全データリスト 1

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
80135-02-01-01	2003-05-01	52760	20016.0	80146-01-13-00	2003-04-23	52752	6800.0
80135-02-01-10	2003-05-02	52761	704.0	80146-01-14-00	2003-04-24	52753	2944.0
80135-02-01-11	2003-05-02	52761	3280.0	80146-01-15-00	2003-04-25	52754	1696.0
80135-02-02-00	2003-05-28	52787	2624.0	80146-01-15-01	2003-04-25	52754	1760.0
80135-02-02-00	2003-05-28	52787	6608.0	80146-01-16-00	2003-04-26	52755	7248.0
80135-02-02-01	2003-05-28	52787	1344.0	80146-01-17-00	2003-04-27	52756	3328.0
80135-02-03-00	2003-06-23	52813	12864.0	80146-01-18-00	2003-04-27	52756	3056.0
80135-02-04-00	2003-07-29	52849	2960.0	80146-01-19-00	2003-04-28	52757	7040.0
80135-02-04-01	2003-07-29	52849	1632.0	80146-01-20-00	2003-04-29	52758	7008.0
80138-01-01-00	2003-03-28	52726	3200.0	80146-01-21-00	2003-05-01	52760	3264.0
80138-01-03-00	2003-04-04	52733	3280.0	80146-01-22-00	2003-05-01	52760	2048.0
80138-01-04-00	2003-04-06	52735	3312.0	80146-01-22-01	2003-05-01	52760	1616.0
80138-01-05-00	2003-04-08	52737	3328.0	80146-01-23-00	2003-05-02	52761	6320.0
80138-01-06-00	2003-04-10	52739	3376.0	80146-01-24-00	2003-05-03	52762	6576.0
80138-01-07-00	2003-04-12	52741	2832.0	80146-01-25-00	2003-05-04	52763	3232.0
80144-01-01-00	2003-05-27	52786	2080.0	80146-01-26-00	2003-05-04	52763	2640.0
80144-01-01-01	2003-05-28	52787	1376.0	80146-01-27-00	2003-05-05	52764	6784.0
80144-01-01-02	2003-05-29	52788	1584.0	80146-01-28-00	2003-05-06	52765	3248.0
80144-01-01-03	2003-05-29	52788	2064.0	80146-01-29-00	2003-05-07	52766	2464.0
80144-01-02-00	2003-05-30	52789	1952.0	80146-01-30-00	2003-05-08	52767	6880.0
80144-01-02-01	2003-05-31	52790	1408.0	80146-01-31-00	2003-05-09	52768	2336.0
80144-01-03-00	2003-05-31	52790	2048.0	80146-01-32-00	2003-05-10	52769	2656.0
80144-01-03-01	2003-05-31	52790	1488.0	80146-01-33-00	2003-05-11	52770	2320.0
80144-01-04-00	2003-06-02	52792	1760.0	80146-01-33-01	2003-05-11	52770	1552.0
80144-01-04-01	2003-06-03	52793	1680.0	80146-01-34-00	2003-05-12	52771	6464.0
80146-01-01-00	2003-04-14	52743	2496.0	80146-01-35-00	2003-05-12	52771	1440.0
80146-01-01-10	2003-07-26	52846	2912.0	80146-01-36-00	2003-05-13	52772	6736.0
80146-01-01-11	2003-07-26	52846	1792.0	80146-01-37-00	2003-05-14	52773	6816.0
80146-01-02-00	2003-04-15	52744	2816.0	80146-01-38-00	2003-05-15	52774	6752.0
80146-01-03-00	2003-04-17	52746	2688.0	80146-01-39-00	2003-05-16	52775	3232.0
80146-01-03-01	2003-04-18	52747	3040.0	80146-01-40-00	2003-05-17	52776	3120.0
80146-01-04-00	2003-04-21	52750	1904.0	80146-01-41-00	2003-05-18	52777	6848.0
80146-01-05-00	2003-04-21	52750	3488.0	80146-01-42-00	2003-05-19	52778	3216.0
80146-01-06-00	2003-04-21	52750	3408.0	80146-01-43-00	2003-05-20	52779	3248.0
80146-01-07-00	2003-04-22	52751	3440.0	80146-01-43-01	2003-05-20	52779	1472.0
80146-01-08-00	2003-04-22	52751	2992.0	80146-01-44-00	2003-05-21	52780	3248.0
80146-01-09-00	2003-04-22	52751	6080.0	80146-01-45-00	2003-05-22	52781	6496.0
80146-01-10-00	2003-04-22	52751	2016.0	80146-01-46-00	2003-05-23	52782	3120.0
80146-01-11-00	2003-04-22	52751	3120.0	80146-01-47-00	2003-05-24	52783	3264.0
80146-01-12-00	2003-04-22	52751	3408.0	80146-01-48-00	2003-05-25	52784	6544.0

表 A.12: H 1743-322 の全データリスト 2

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
80146-01-49-00	2003-05-26	52785	3280.0	80146-01-75-00	2003-06-21	52811	1632.0
80146-01-50-00	2003-05-27	52786	2848.0	80146-01-75-01	2003-06-21	52811	2544.0
80146-01-51-00	2003-05-29	52788	3328.0	80146-01-76-00	2003-06-22	52812	4944.0
80146-01-51-01	2003-05-29	52788	3328.0	80146-01-77-00	2003-06-24	52814	3840.0
80146-01-52-00	2003-05-30	52789	3344.0	80146-01-78-00	2003-06-25	52815	3152.0
80146-01-52-01	2003-06-02	52792	3424.0	80146-01-79-00	2003-06-26	52816	4848.0
80146-01-53-00	2003-05-31	52790	2464.0	80146-01-80-00	2003-06-27	52817	7744.0
80146-01-53-01	2003-05-31	52790	1296.0	80146-01-81-00	2003-06-28	52818	4960.0
80146-01-54-00	2003-06-01	52791	5440.0	80146-01-82-00	2003-06-29	52819	1760.0
80146-01-55-00	2003-06-02	52792	3104.0	80146-01-82-01	2003-06-29	52819	912.0
80146-01-56-00	2003-06-03	52793	2912.0	80146-01-83-00	2003-06-30	52820	2384.0
80146-01-57-00	2003-06-04	52794	6880.0	80146-01-84-00	2003-07-01	52821	2288.0
80146-01-57-01	2003-06-05	52795	2400.0	80146-01-85-00	2003-07-02	52822	3232.0
80146-01-58-00	2003-06-05	52795	3392.0	80146-01-86-00	2003-07-03	52823	4592.0
80146-01-59-00	2003-06-06	52796	6560.0	80146-01-87-00	2003-07-04	52824	3200.0
80146-01-60-00	2003-06-07	52797	7184.0	80146-01-88-00	2003-07-05	52825	2480.0
80146-01-61-00	2003-06-08	52798	3200.0	80146-01-89-00	2003-07-06	52826	3200.0
80146-01-62-00	2003-06-09	52799	2912.0	80146-01-90-00	2003-07-07	52827	3232.0
80146-01-63-00	2003-06-10	52800	6448.0	80146-01-91-00	2003-07-08	52828	3152.0
80146-01-64-00	2003-06-10	52800	5312.0	80146-01-92-00	2003-07-09	52829	1600.0
80146-01-65-00	2003-06-11	52801	4496.0	80146-01-92-01	2003-07-09	52829	3200.0
80146-01-66-00	2003-06-12	52802	3440.0	80146-01-93-00	2003-07-10	52830	1200.0
80146-01-67-00	2003-06-13	52803	6832.0	80146-01-93-01	2003-07-10	52830	1424.0
80146-01-68-00	2003-06-14	52804	3392.0	80146-01-94-00	2003-07-11	52831	3232.0
80146-01-69-00	2003-06-15	52805	2272.0	80146-01-95-00	2003-07-14	52834	3248.0
80146-01-70-00	2003-06-16	52806	3328.0	80146-01-95-01	2003-07-14	52834	1088.0
80146-01-71-00	2003-06-17	52807	2432.0	80146-01-96-00	2003-07-17	52837	3280.0
80146-01-72-00	2003-06-18	52808	7040.0	80146-01-97-00	2003-07-20	52840	2016.0
80146-01-73-00	2003-06-19	52809	7440.0	80146-01-98-00	2003-07-23	52843	3008.0
80146-01-74-00	2003-06-20	52810	3088.0				

表 A.13: XTE J2012+381 の全データリスト

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
30188-04-01-04	1998-05-27	50960	48.0	30188-04-11-00	1998-06-07	50971	3088.0
30188-04-02-00	1998-05-29	50962	3280.0	30188-04-12-00	1998-06-08	50972	784.0
30188-04-03-00	1998-05-30	50963	1328.0	30188-04-13-00	1998-06-09	50973	3008.0
30188-04-04-00	1998-05-31	50964	2784.0	30188-04-14-00	1998-06-11	50975	2832.0
30188-04-05-00	1998-06-01	50965	6160.0	30188-04-15-00	1998-06-15	50979	2464.0
30188-04-06-00	1998-06-02	50966	800.0	30188-04-16-00	1998-06-16	50980	1568.0
30188-04-07-00	1998-06-03	50967	800.0	30188-04-17-00	1998-06-22	50986	1584.0
30188-04-08-00	1998-06-04	50968	224.0	30188-04-18-00	1998-06-30	50994	896.0
30188-04-09-00	1998-06-05	50969	864.0	30188-04-19-00	1998-06-30	50994	720.0
30188-04-10-00	1998-06-07	50971	2976.0	30188-04-20-00	1998-07-06	51000	1344.0

表 A.14: XTE J1720-318 の全データリスト

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
70116-03-01-05	2003-01-15	52654	13408.0	70116-03-05-10	2003-01-29	52668	2048.0
70116-03-02-00	2003-01-15	52654	3216.0	70116-03-05-11	2003-01-29	52668	992.0
70116-03-02-01	2003-01-15	52654	16496.0	70116-03-05-12	2003-01-30	52669	1664.0
70116-03-02-02	2003-01-16	52655	3328.0	70116-03-06-00	2003-01-31	52670	80.0
70116-03-02-03	2003-01-16	52655	5024.0	70116-03-06-01	2003-02-01	52671	1936.0
70116-03-02-04	2003-01-16	52655	3296.0	70123-01-01-00	2003-02-05	52675	1280.0
70116-03-03-00	2003-01-14	52653	224.0	70123-01-01-01	2003-02-06	52676	720.0
70116-03-04-00	2003-01-18	52657	2464.0	70123-01-01-02	2003-02-02	52672	1552.0
70116-03-04-01	2003-01-19	52658	3280.0	70123-01-01-03	2003-02-03	52673	1392.0
70116-03-04-02	2003-01-19	52658	7024.0	70123-01-01-04	2003-02-04	52674	1456.0
70116-03-04-03	2003-01-19	52658	1680.0	70123-01-02-00	2003-02-09	52679	2016.0
70116-03-04-04	2003-01-20	52659	5760.0	70123-01-02-01	2003-02-10	52680	3264.0
70116-03-04-05	2003-01-21	52660	9568.0	70123-01-02-02	2003-02-12	52682	1456.0
70116-03-04-06	2003-01-21	52660	8192.0	70123-01-03-00	2003-02-14	52684	1616.0
70116-03-04-07	2003-01-22	52661	6528.0	70123-01-03-01	2003-02-16	52686	1280.0
70116-03-04-08	2003-01-22	52661	1520.0	70123-01-03-02	2003-02-18	52688	2880.0
70116-03-04-09	2003-01-23	52662	3232.0	70123-01-03-03	2003-02-20	52690	1728.0
70116-03-04-10	2003-01-23	52662	6928.0	70123-01-03-04	2003-02-14	52684	1136.0
70116-03-04-11	2003-01-23	52662	6496.0	70123-01-03-05	2003-02-16	52686	1088.0
70116-03-05-00	2003-01-24	52663	1520.0	70123-01-03-06	2003-02-19	52689	1088.0
70116-03-05-01	2003-01-25	52664	3248.0	70123-01-03-07	2003-02-20	52690	9744.0
70116-03-05-02	2003-01-25	52664	1968.0	70123-01-03-08	2003-02-20	52690	1696.0
70116-03-05-04	2003-01-26	52665	2976.0	70123-01-04-00	2003-02-22	52692	3344.0
70116-03-05-05	2003-01-27	52666	3232.0	70123-01-04-01	2003-02-24	52694	3136.0
70116-03-05-06	2003-01-27	52666	704.0	70123-01-04-02	2003-02-26	52696	2880.0
70116-03-05-07	2003-01-28	52667	3232.0	70125-01-01-00	2003-02-28	52698	720.0
70116-03-05-08	2003-01-28	52667	944.0	70125-01-02-00	2003-03-01	52699	944.0
70116-03-05-09	2003-01-29	52668	3232.0				

謝辞

本研究を行うにあたり、基礎から御指導をしてくださった大杉先生と深沢先生に感謝いたします。特に指導教官の深沢先生は研究室に配属されてからの3年間、解析の基礎から論文にいたるまで丁寧に指導していただきありがとうございました。助手の水野さんには発表の際に大変お世話になりました。また理化学研究所の久保田さんにはお忙しいなか、解析方法などをとても丁寧に教えていただきました。また質問にも詳しく答えていただき研究をすすめるうえで非常に役立ちました。ありがとうございました。

どんなささいな質問や疑問にも快く応じてくれた先輩の川埜さん、大野さんに深く感謝します。後輩の永江くんとは研究についていろいろ相談し合うことができ、心強い存在でした。また同期の河嶋くん、河本くん、木原くん、夫くん、右田くんのおかげで毎日楽しく過ごすことができ、みなさんと同じ研究室になれてよかったと心から感じています。後輩の戸塚さん、平澤さん、山本くんにも大変お世話になりました。たった一年間しか一緒に過ごせなかったことが非常に残念です。その他の研究室のみなさまにもいろいろお世話になり、ありがとうございました。事務の石井さん、上原さんにもお世話になりました。また今回だけでなく大学生活を通して常に遠くから見守ってくれた家族に深く感謝します。

みなさまのおかげで修士論文を完成させることができましたと思います。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 久保田 あや 博士論文 (東京大学) 2001
- [2] 滝沢 守 修士論文 (東京大学) 1991
- [3] 阿部 由紀子 卒業論文 (広島大学) 2003
- [4] 佐藤 桂子 卒業論文 (広島大学) 2002
- [5] 永江 修 卒業論文 (広島大学) 2004
- [6] Abramowicz, M. A., Czerny, B., Lasota, J. P., & Szuszkiewicz, E. 1988, ApJ, 332, 646
- [7] Cui, W., Shrader, C. R., Haswell, C. A., & Hynes, R. I. 2000, ApJ, 535, L123
- [8] Dieters, S. W., et al. 2000, ApJ, 538, 307
- [9] Ebisawa, K., et al. 1994, PASJ, 46, 375
- [10] Hynes, R. I., Roche, P., Charles, P. A., & Coe, M. J. 1999, MNRAS, 305, L49
- [11] Kobayashi, Y., Kubota, A., Nakazawa, K., Takahashi, T., & Makishima, K. 2003, PASJ, 55, 273
- [12] Kubota, A., Tanaka, Y., Makishima, K., Ueda, Y., Dotani, T., Inoue, H., & Yamaoka, K. 1998, PASJ, 50, 667
- [13] Kubota, A., Makishima, K., & Ebisawa, K. 2001, ApJL, 560, 147
- [14] Kubota, A., & Done, C. 2004, MNRAS, 354, 980
- [15] Kubota, A., & Makishima, K. 2004, ApJ, 601, 428
- [16] Lutovinov, A., Revnivtsev, M., Molkov, S., & Sunyaev, R. 2004, astro-ph/0407342
- [17] Makishima, K., Maejima, Y., Mitsuda, K., Bradt, H. V., Remillard, R. A., Tuohy, I. R., Hoshi, R., Nakagawa, M. 1986, ApJ, 308, 635

- [18] McClintock, J. E., & Remillard, A. A. 2003, astro-ph/0306213
- [19] Mitsuda, K., et al. 1984, PASJ, 36, 741
- [20] Nishimura, J., Mitsuda, K., & Itoh, M. 1986, PASJ, 38, 819
- [21] Nowak, M. A. 2000, MNRAS, 318, 361
- [22] Oosterbroek, T., Parmar, A. N., Kuulkers, E., Belloni, T., van der Klis, M., Frontera, F., & Santangelo, A. 1998, A&A, 340, 431
- [23] Parmar, A.N., et al. 2003, A&A, 411, L421
- [24] ReRemillard, R. A., Sobczak, G. J., Munro, M. P., & McClintock, J. E. 2002, ApJ, 564, 962
- [25] Revnivstev, M. G., Trudolyubov, S. P., & Borozdin, K. N. 2000, MNRAS, 312, 151
- [26] Sobczak, G. J., McClintock, J. E., & Remillard, R. A. 2000, ApJ, 531, 537
- [27] Tomsick, J. A., & Kaaret, P. 2000, ApJ, 537, 448
- [28] Watarai, K., Fukue, J., Takeuchi, M., & Mineshige, S. 2000, PASJ, 52, 133
- [29] Zycki, P. T., Done, C. & Smith, D. A. 1999, MNRAS, 309, 561