

超光度 X 線源 NGC6946X-1 はブラックホールなのか？

東京理科大学 理学部物理学科

1210041 桑原 啓介

指導教員：松下 恭子

2014 年 3 月 19 日

第1章 概要

ブラックホール候補天体 LMC X-3 は $\text{diskbb}+\text{powerlaw}$ という標準的な放射モデルによって再現できる。他のブラックホール候補天体の解析結果を LMC X-3 のものと比べることで標準的なモデルとの違いを見付け、対象天体の情報を得る。本研究では超大光度 X 線源である NGC6946 X-1 を対象天体とし、XMM-Newton 衛星の観測データを解析することでその質量や時間変動を算出した。

その結果、NGC6946 X-1 が LMC X-3 と同様に標準的な放射モデルで再現できることを確かめた。さらに、質量は恒星質量ブラックホールのそれを大きく超えるものであることがわかった。

目次

第1章	概要	1
第2章	はじめに	4
第3章	解説	5
3.1	ブラックホールとその分類	5
3.2	放射	6
3.2.1	電磁放射の種類	6
3.2.2	エディントン限界光度	6
3.3	ブラックホール	7
3.3.1	観測によるブラックホールの研究	7
3.3.2	近接連星系	7
3.3.3	内縁半径 R_{in}	8
3.3.4	降着円盤からの放射	8
3.3.5	シュバルツシルト解	9
3.4	エネルギー生成モデル	9
3.5	X線変動	10
3.5.1	長いタイムスケール	10
3.5.2	短いタイムスケール	11
第4章	観測	12
4.1	観測衛星	12
4.2	対象天体	12
4.2.1	LMC X-3	12
4.2.2	NGC6946 X-1	12
第5章	解析	13
5.1	解析手順	13
5.2	イメージ	13
5.3	ライトカーブ	13
5.4	パワースペクトル	14
5.5	スペクトル解析	15
5.5.1	スペクトル解析で使用了モデル	15
第6章	解析結果	16
6.1	LMC X-3	16
6.1.1	イメージ	16
6.1.2	ライトカーブ	16
6.1.3	パイルアップ	17
6.1.4	スペクトル解析	18

6.2	NGC6946 X-1	19
6.2.1	イメージ	19
6.2.2	ライトカーブ	20
6.2.3	スペクトル解析	21
6.2.4	パワースペクトル	22
第7章 まとめ		24
第8章 謝辞		25

第2章 はじめに

ブラックホールとは光さえも脱出できないほど強力な重力を持つ天体である。情報を持ったものが何一つ外に出てこないためブラックホールそのものを観測することは不可能であり、ブラックホール単体では観測できない。しかし、ブラックホール候補天体が多の星と連星系をなしている場合、ブラックホールの重力によって伴星からガスが剥ぎ取られる。このガスが角運動量を持っているためブラックホール周辺に降着物の円盤が形成される。この降着円盤や伴星を観測することでブラックホールの研究が可能となる。本研究では X 線を用いて降着円盤を解析することで降着円盤のパラメータを調べ、そこからブラックホール本体の質量などを計算した。

本研究ではまず、標準的な降着円盤を持つブラックホール候補天体 LMC X-3 の解析を行った。次に、超大光度 X 線源である NGC6946 X-1 の解析を行い、LMC X-3 の結果と比較することで超大光度 X 線源の特徴や NGC6946 X-1 がブラックホールである可能性について調べた。

第3章 解説

3.1 ブラックホールとその分類

ブラックホールの定義は「光速でさえ脱出できない重力を持つ天体」である。質量 M の天体から脱出するのに必要な速度は

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (3.1)$$

となり、天体中心に近づくほど必要な速度は増大する。 $v = c$ (光速) となる半径 R_s をシュバルツシルト半径と呼び、ここより内側へ入ったものは一切外に出ることはない。

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} = 2.96 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) km \quad (3.2)$$

ブラックホールの大きさの目安としてこのシュバルツシルト半径が用いられることが多く、この半径を持つ球面を「事象の地平面」と呼ぶ。また、ブラックホールの中心は理論上は密度と重力が無限大であり、特異点と呼ばれる。つまりブラックホールとは、事象の地平面と中心の特異点からなる概念である。

恒星質量ブラックホール

恒星がその進化を終えて自らの重力でつぶれる時、原子核の密度まで収縮してもなお重力崩壊がとまらないほどの大質量星が無限に収縮することで生まれると考えられるブラックホール。シュバルツシルト半径より内部では光ですら抜け出すことはできず、ブラックホール自体を直接観測することはできないため、降着円盤からの放射を観測する。

恒星質量ブラックホールはその名のとおり元が恒星なので質量は太陽質量の数倍から数十倍程度しかない。エディントン限界光度は $\sim 10^{38} [erg/s]$ 。

大質量ブラックホール

銀河中心部に存在する $10^6 \sim 10^9 M_\odot$ もの質量をもつブラックホール。銀河中心の狭い領域で銀河そのものが持つ明るさよりも明るく輝く活動銀河核はこの大質量ブラックホールによるものと考えられている。形成過程は未だはっきりしていない。

超大光度 X 線源 ULX(Ultra-Luminous X-ray Source)

系外銀河の中心領域から外れた位置に発見される非常に明るい X 線点源。銀河系内で発見される恒星質量ブラックホール連星とよく似た特徴が認められるが、その正体は未だ不明である。通常の恒星質量ブラックホール ($< 10 M_\odot$) のエディントン光度を超える $\sim 10^{39} [erg/s]$ もの光度を持つが、その位置からして系外銀河の核 (大質量ブラックホール) とは考えられない。

3.2 放射

3.2.1 電磁放射の種類

シンクロトロン放射

電子が磁場中を運動することでローレンツ力を受け、円運動 (加速度運動) を行う。光速まで加速された電子が磁場中でらせん運動を行う際に出る放射。

トムソン散乱

光子が静止した電子を振動させ、その振動が元の光子と同じ振動数の電磁波を再放出する。これをトムソン散乱と呼ぶ。

コンプトン効果・逆コンプトン効果

高エネルギーの光子が自由電子に衝突したとき、エネルギーの一部を電子に与えて電磁波が出る散乱をコンプトン散乱と呼ぶ。また、光子が相対論的速度で運動する電子に衝突することで光子がエネルギーを獲得して高エネルギー光子に変わる現象を逆コンプトン効果と呼ぶ。

黒体放射

外部から入射してくるあらゆる波長の電磁波を吸収する物体を「黒体」と呼び、黒体からの放射を黒体放射と呼ぶ。物質の温度と熱放射のピークの波長にはウィーンの変位則と呼ばれる関係があり、宇宙の高エネルギー現象を観測するにはそれに適した波長の電磁波を観測する必要がある。本研究ではブラックホール周辺の降着円盤を対象としており、この円盤の温度が数百～数千万ケルビンをとるため、対応する波長を持つ X 線を用いて観測を行うのが良いことがわかる。

温度 T において波長 λ の電磁波の黒体放射の強度 $R(\lambda)$ はプランクの法則から

$$B(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} \quad (3.3)$$

で表される。

また、ステファン・ボルツマンの法則によると黒体放射のエネルギー流量は温度の 4 乗に比例することがわかっている。

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (3.4)$$

3.2.2 エディントン限界光度

天体が輝ける最大の光度。天体の放射の圧力 (輻射圧) がその重力を超えて輝くと天体のガスが吹き飛ばされてバラバラになってしまう。ブラックホールの場合、降着ガスが吹き飛ばされてしまいブラックホールに物質が落ち込まなくなってしまう。

水素ガスを例にとると、星の質量を M 、陽子の質量を m とすると、天体のガスにかかる重力と輻射圧の釣り合いは

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{\sigma_T}{c} \frac{L}{4\pi r^2} \quad (3.5)$$

である。 σ_T はトムソン散乱断面積。これがつり合う時の光度をエディントン限界光度と呼ぶ。

$$L_{edd} = \frac{4\pi cGMm}{\sigma_T} = 1.5 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{erg/s} \quad (3.6)$$

3.3 ブラックホール

3.3.1 観測によるブラックホールの研究

物質がブラックホールに吸い込まれる際、解放される重力エネルギーの一部が X 線などの電磁波として放射される (黒体放射)。この X 線のスペクトルや光度を観測してブラックホール候補天体についての観測を行う。ブラックホールの重力の影響を受ける物体 (伴星・降着円盤) の運動を観測することによっても候補天体の大きさや質量は得られる。

3.3.2 近接連星系

二つの星の間隔が星の半径ほどまで接近し、重力的に束縛されて互いの周りをまわっている系。高密度天体は自身にエネルギー源を持たないため、いったん形成されたら輝くこと無く冷えてゆくのみである。しかし別の星と連星系を成している場合、伴星からの降着物の重力エネルギーを解放させて光らせることが出来る。二つの星の有効ポテンシャルは

$$\psi_{eff} = -\frac{GM}{|r-r_1|} - \frac{GM}{|r-r_2|} - \frac{1}{2}|\omega \times r|^2 \quad (3.7)$$

となる。この有効ポテンシャルが一定となる面を等ポテンシャル面と呼び、これはこの系に注ぎ込まれたガスの圧力・密度一定の面と一致する。

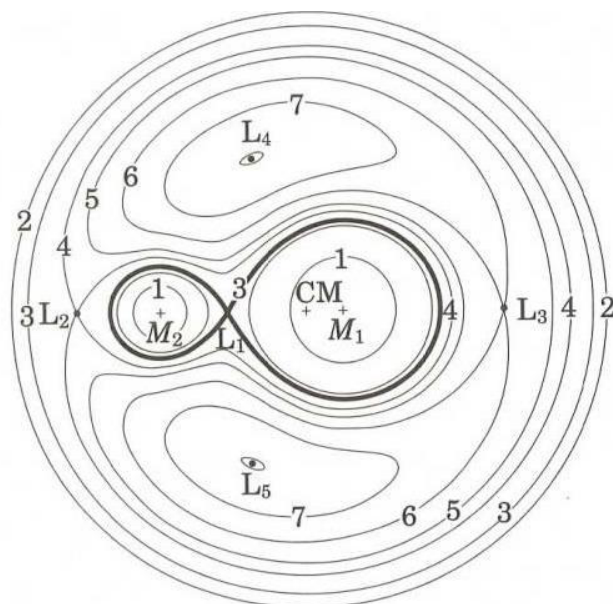


図 3.1: 二つの星 1,2 の質量比が 4:1 の場合の等ポテンシャル面。公転軌道面における断面を示した。太線はロッシュローブ (Frank et al. 2002 より転載)

図 1 はその等ポテンシャル面を図示したものである。ラグランジェ点 L_1 を通るポテンシャル面をロッシュローブと呼び、これを用いて近接連星系をさらに分類できる。二つの星が共にロッシュローブの中

に収まっているものを分離型、どちらか片方の星がロッシュローブを満たしているものを半分離型、両方の星がロッシュローブを満たしているものを接触型と呼ぶ(図2)。高密度天体は非常にコンパクトなため、ロッシュローブを満たすことはない。したがって、高密度天体が主系列星や巨星などのふつうの星と近接連星系をつくる時は分離型か半分離型のどちらかになる。

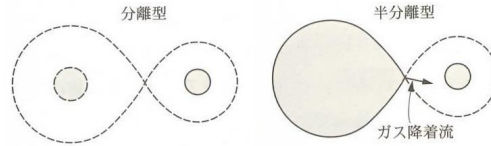


図 3.2: 近接連星系の分類。S 字型の線はロッシュローブを表す。

伴星がロッシュローブを満たしている半分離型においては、 L_1 点では重力・遠心力がつり合っているので伴星のガスは圧力で主星側に押し出される。連星系は公転しているため、ガスは角運動量を持って主星の周りをまわりながら落ちる。こうして降着円盤が形成される。

伴星がロッシュローブを満たしていない分離型の場合でも、半分離型のような質量輸送は起こりうる。伴星が重い星の場合、表面が高温なのでガスの圧力や輻射圧が高く恒星風が強くなる。その放出されたガスの一部が高密度天体に捉えられるとやはり降着円盤ができる。

3.3.3 内縁半径 R_{in}

内縁半径 R_{in} とは、降着円盤が高密度天体に接近できる最内縁の半径のことである。ブラックホールへの降着物が内縁半径まで落ち込むと、ブラックホール周りの強い重力によって力学的に不安定になり、シュヴァルツシルト半径に到達する前に円運動ができなくなる。一般相対性理論によれば、ブラックホールの内縁半径とシュバルツシルト半径には、

$$R_{in} = 3\alpha R_s \quad (3.8)$$

という関係が導かれている。この α はブラックホールの自転を表すパラメータで、自転していなければ $\alpha = 1$ である。この内縁半径での降着円盤の温度を内縁温度 T_{in} と呼ぶ。

3.3.4 降着円盤からの放射

ガスがブラックホールに落ちるとき、角運動量を持たずに球対称になると単純化して考えると解放される重力エネルギーは運動エネルギーへと大部分が転化されるはずである。ガスからの放射効率は密度の 2 乗に比例するので、ガス密度が高ければ高いほど重力エネルギーは放射エネルギーに転化される。

質量 M の点源の周りを円運動する粒子を考えると、

$$\text{回転速度: } v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad , \quad \text{角速度: } \omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \quad , \quad \text{角運動量: } L = \sqrt{GM}r \quad (3.9)$$

というケプラー回転を行う。

角運動量が保存されるため、ガスは内側へ落ちれば落ちるほど速度が上がってゆく。このとき内側と外側の速度差から摩擦熱が生じ、重力エネルギーが熱エネルギーに変換されて円盤の温度が上昇する。また、この摩擦で角運動量が内側から外側へ輸送されることでガスに働く遠心力が減少し、ゆっくりと降着する事になりガス密度が高くなるので放射エネルギーへの変換効率が良くなる。

ガスが円盤内縁に達するまでに解放するポテンシャルエネルギーの半分は放射エネルギーに転換されることがビリアル定理からわかる。

$$\Delta E = \frac{1}{2} \Delta V \quad (3.10)$$

ガス降着率を $\dot{M}$ とすると降着円盤の光度は

$$L_{disk} = \frac{1}{2} \frac{GM\dot{M}}{r_s} \quad (3.11)$$

で表される。

また、内側へ行くほど円盤は高温なので外側と比べて波長の短い光の黒体放射を行う。円盤全体では様々な波長の光の重ね合わせとなるので「多温度黒体放射」と呼ばれる。

3.3.5 シュバルツシルト解

シュバルツシルトが導いたアインシュタイン方程式の一つの解で、「中心にのみ質点がありその周囲の空間は等方的」という条件で解いたもの。それによると位置 r に置いた時計の進む時間の間隔 $d\tau$ と、無限遠方の観測者が計る時間の間隔 dt の間には

$$d\tau = \left(1 - \frac{R_s}{r}\right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3.12)$$

という関係が成り立つ。すなわち、物体がシュバルツシルト半径 R_s に近づくと時間経過が遅く見えるようになることがわかる。また、シュバルツシルト半径より内側では係数が虚数となり物理的意味を失ってしまう。天体がブラックホールになると質量 M ・角運動量 J ・電荷 Q 以外の特徴は消滅する。ここからさらに $Q = 0$ かつ $J = 0$ の時の解がシュバルツシルト解であり「シュバルツシルト・ブラックホール」と呼ばれる。また、 $Q = 0$ だが $J \neq 0$ の時、すなわち回転するブラックホールはカー解を満たす「カー・ブラックホール」と呼ばれる。

3.4 エネルギー生成モデル

標準円盤モデル

重力エネルギーが効率よく放射エネルギーに転化されるモデル。粘性項を含んだ流体のナビエ・ストークス方程式を基にした基本方程式を解くことで得られる。円盤はケプラー回転をし、黒体放射を行う。放射によってガスが冷えて圧力が下がり、円盤は幾何学的に薄くなる。内側で熱的に不安定になってしまうことが問題点。

円盤表面からの単位面積あたりのエネルギーフラックスは

$$F = \sigma T_s^4 = \frac{3}{8\pi} \frac{GM\dot{M}}{r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_s}{r}}\right) \quad (3.13)$$

で与えられる。ここで、 σ , T_s , r_s はそれぞれステファン・ボルツマン定数、円盤表面温度、円盤内縁の半径であり、トルクはゼロという境界条件を用いている。この式の左辺は単位面積からの放射量、右辺は重力エネルギーの開放率を示してあり、重力エネルギーが効率よく放射エネルギーに転化されることを示している。

円盤の表面温度が与えられ、円盤の各部分が黒体放射をすると仮定すると円盤全体からのスペクトルが計算できる。標準円盤スペクトルは様々な温度の黒体放射スペクトルの重ね合わせとなる。

高温降着流モデル

標準円盤モデルではカバーできない高エネルギー放射現象を説明するためのモデル。放射において非効率的な降着の流れを仮定したもの。標準円盤モデルのように電磁放射でエネルギーを逃がすのではなく、解放された熱エネルギーは円盤内部のガスを暖めるために使われる。ガスが高温になると粘性が高まり、降着速度が大きくなるので中心天体へと熱エネルギーが運ばれる。円盤はシンクロトロン放射や逆コンプトン効果など様々な放射過程で光るが、標準円盤モデルよりは暗い。また、降着速度が回転速度に比べて速いため、円盤にガスがたまりにくくなり、光学的に薄くなる。これは高温降着流モデルの原型といわれる移流優勢流モデルの特徴で、様々な問題点が見つかって現在は現実的な解ではないとされている。

超臨界降着流モデル

球対称降着の場合の限界光度であるエディントン光度を超えるほどの明るさを持つ降着円盤についてのモデル。大きな光学的厚みを持つ流れではその中で作られた光子は何度も吸収・散乱が繰り返され、なかなか表面に出られないうちに降着ガスもろともブラックホールに捕捉される。

3.5 X線変動

高密度天体のX線放射が時間変動する場合がある。周期的な変動はそのタイムスケールで分類される。

3.5.1 長いタイムスケール

数年単位の周期で起きるX線変動。伴星からの質量降着率が変動することで生じる降着円盤の形状や状態が原因と考えられている。ライトカーブでも確認することができる。恒星質量ブラックホールは以下のvery high, high/soft, intermediate, low/hardの状態(state)をとる。

ULXは恒星質量ブラックホールと比べて系が大きいいため降着円盤の形状変化にも時間がかかり、タイムスケールも比較的長くなり、あまり状態遷移をしないように見える。high state, low stateの状態をとる。

very high state

非常に明るい状態。diskbb+powerlawで再現できる。円盤からの放射が電子雲での逆コンプトン散乱によって高エネルギーに叩き上げられていると考えられるため、powerlaw成分が優勢になる。

high/soft state

質量降着率が高く円盤が幾何学的に薄く光学的に厚い状態。放射効率が良く明るい。diskbb+powerlawで再現できる。

intermediate state

状態遷移中の状態として分類されているstate。

low/hard state

質量降着率が低くて円盤が幾何学的に厚く光学的に薄い状態。soft state に比べて放射メカニズムがはっきりとわかっていない。スペクトルは powerlaw モデルで再現できる。光学的に薄いため黒体放射が起こらないと思われる。

3.5.2 短いタイムスケール

数秒、数分単位にもなる周期で起きる X 線変動。ブラックホール連星では hard state か intermediate state で見られやすい。ライトカーブでは確認し辛いのでパワースペクトルを用いて確認するのが良い。パワースペクトルはライトカーブで表される時間変化を一度フーリエ変換してその強度を計算したものである。そのため、どのタイムスケールの変動がどれくらいの強度で含まれているかを示している。以下の図に見られるような傾きの急激な変化を「break」、幅を持ったピークを「準周期的振動 (QPO)」と呼ぶ。

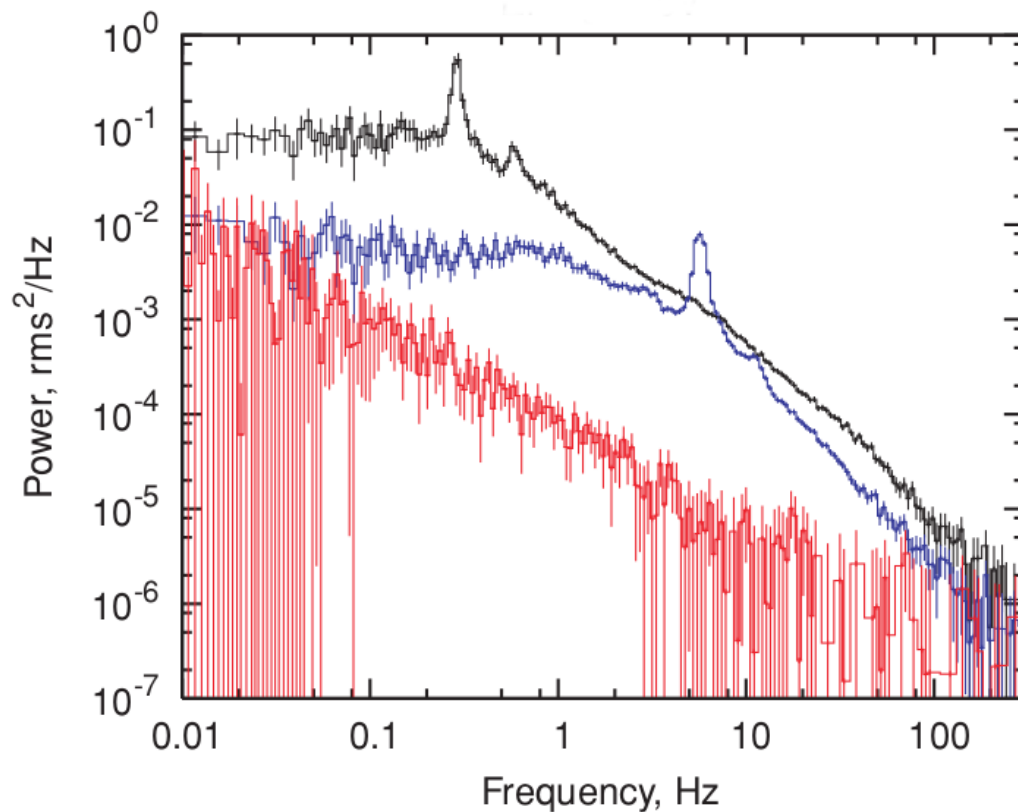


図 3.3: 恒星質量ブラックホール XTE J1550-564 のパワースペクトル (Shaposhnikov et al. 2009)

準周期的振動 (Quasi-periodic Oscillation)

パワースペクトルでピークが幅を持つということは、振動の周期が変化しているか、わずかな回数しか繰り返えされていないことが考えられる。こういった短いタイムスケールの X 線変動を準周期的振動 (QPO) と呼ぶ。ブラックホール候補天体はミリ秒から数十年といった様々なタイムスケールでランダムに起こる準周期的振動 (QPO) をもつことがあり、その振動数から天体の質量が求まることが経験的にわかっている。発生原因はまだはっきりとはわかっていない。Lorentzian モデルで再現できる。

第4章 観測

4.1 観測衛星

今回の観測に用いた X 線観測衛星

XMM-Newton 衛星

欧州宇宙機関 (ESA) の X 線観測衛星。1999 年に打ち上げられ、計画では使用するのとは 2 年ほどのはずであったが 2014 年現在も運用されている。カメラの感度は 0.2KeV から 12KeV。

4.2 対象天体

4.2.1 LMC X-3

当面の解析練習の対象として大マゼラン雲の X 線源 (LMC X-3) を用いる。地球からの距離は約 17 万光年 (約 52 kpc) で、質量は $7 \sim 9 M_{\odot}$ とされている。今回、標準的な降着円盤モデルで表せることを確認した。

Obs.ID	date	exposure[s]
0116900501	2000/02/07	15548

4.2.2 NGC6946 X-1

渦巻銀河 NGC6946 の X 線源。地球からの距離は約 6 Mpc で準周期的振動 (QPO) が観測される超大光度 X 線源 (ULX) である。以下の観測データを用いた。

Obs ID.	date	exposure[s]
0691570101	2012/10/21	119301
0500730201	2007/11/02	37300
0500730101	2007/11/08	31925

第5章 解析

5.1 解析手順

天体のデータは NASA や ESA の web で公開されている。解析ソフトには XSPEC(13.0.0) を用いた。

XMM-Newton 衛星のデータは2種類あり、ODF(Observation Data Files) と PPS(Pipeline Processing) の両方をダウンロードした。ODF には観測する上での必要なデータが、PPS には観測されたフォトンイベントと光源のリストなどのデータが入っている。

5.2 イメージ

PPS ファイル内にあるイベントファイルをイメージ化する。そのイメージを元に光源の位置や解析する領域を決定する。

観測天体が非常に明るい場合、検出器が一つのイベントを処理している間に別のイベントが入ってしまうことがある。このような複数のイベントが高エネルギーのイベント一つ分として処理されてしまう現象を「パイルアップ」と呼ぶ。パイルアップの影響を減らすため解析する領域を円環状にして特に明るい部分を除く必要がある。

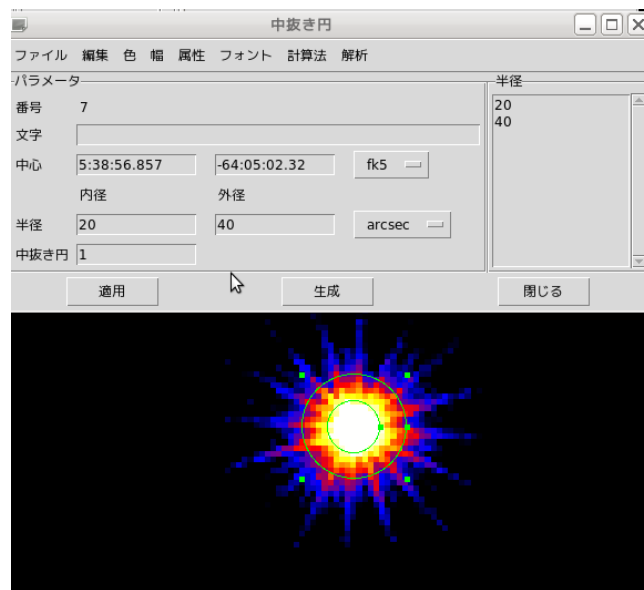


図 5.1: パイルアップ除去のための領域の取り方の例

5.3 ライトカーブ

横軸に時間、縦軸に光子の数をプロットしたグラフ。天体の自転による明るさの変化を見たり、検出器と対象天体の間に異物が入っていないかの確認に用いる。

通常ならライトカーブに変動がある時間帯はカットして解析を行うべきだが、ブラックホール候補天体の解析を行う場合は必ずしもそうとは言えない。ブラックホールなど高密度天体からの X 線放射は様々なタイムスケールで変動するので、カットする時間帯をライトカーブだけから決めてしまうと天体の変動も省いてしまう可能性がある。

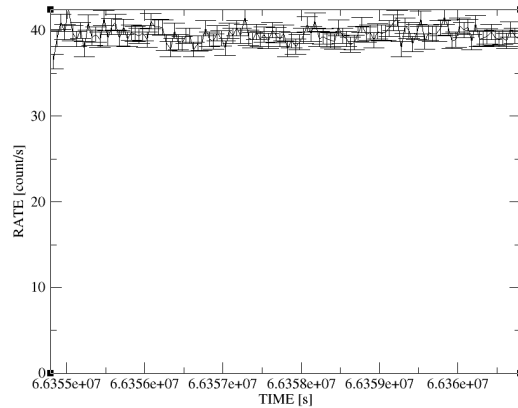


図 5.2: ライトカーブの例. これは LMC X-3 のライトカーブのひとつ.

5.4 パワースペクトル

横軸に周波数、縦軸に強度をプロットしたグラフ。天体の光度の時間変動を確かめるときに使用し、光度の変動の周期性やタイムスケールを調べることができる。ライトカーブをフーリエ変換することで、時間変化する電気信号を周波数 bin でまとめ、強度を出してプロットしている。パワースペクトルの作成には XRONOS 5.22 を使用し、時間分解能に優れた PN 検出器の結果のみを用いた。

領域はスペクトル解析と同様の範囲をとり、ライトカーブ作成時の binsize は PN 検出器の時間分解能に合わせて 0.0734 秒とすることで bin まとめによるノイズを減らした。

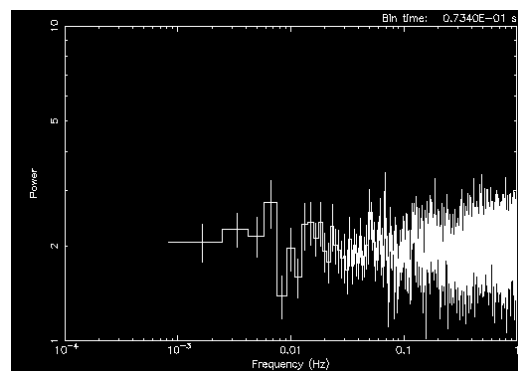


図 5.3: パワースペクトルの例. NGC6946 X-1 のバックグラウンド領域.

5.5 スペクトル解析

5.5.1 スペクトル解析で使したモデル

diskbb

標準降着円盤からの黒体放射のスペクトルモデル。パラメーターは内縁温度 T_{in} と定数 norm というものを導入している。diskbb モデルでは降着円盤上で最大となる温度を内縁温度 T_{in} とし、この時の半径を見かけの内縁半径 r_{in} としている。標準円盤モデルの式の平方根の項を無視すると半径と温度の関係は

$$T(r)^4 \propto \frac{1}{r^3} \quad (5.1)$$

となる、よって内縁温度で降着円盤の温度を表すと

$$T(r) = T_{in} \left(\frac{r}{r_{in}} \right)^{-\frac{3}{4}} \quad (5.2)$$

となる。ここで Stefan-Boltzmann の法則から円盤の全光度 L_{disk} は

$$L_{disk} = 4\pi r_{in}^2 \sigma T_{in}^4 \quad (5.3)$$

と表せる。また、円盤の全光度 L_{disk} を観測される $\text{flux} f_{disk}$ 、衛星から見た傾斜角 θ 、天体までの距離 D で表すと

$$L_{disk} = \frac{2\pi D^2 f_{disk}}{\cos\theta} \quad (5.4)$$

すなわち観測される $\text{flux} f_{disk}$ から内縁温度を求める式は

$$f_{disk} = 2\sigma \times \left(\frac{r_{in}}{D} \right)^2 \cos\theta T_{in}^4 \quad (5.5)$$

となる。この比例定数として norm を定義する。

$$K = \left(\frac{r_{in}}{D} \right)^2 \cos\theta \quad (5.6)$$

powerlaw

ベキ乗のモデル。ブラックホール連星の場合は、降着円盤を覆う高温プラズマ中でのコンプトン散乱やシンクロトロン放射による X 線光子のエネルギー増加などをこれで再現する。

$$A(E) = K E^{-\Gamma} \quad (5.7)$$

K は単位時間単位面積単位エネルギーあたりの光子の数であり、 Γ は PhotonIndex と呼ばれる無次元量である。

phabs,wabs

星間ガスによる光電吸収のモデル。パラメーターは水素の柱密度 n_H 。

$$M(E) = \exp[n_H \sigma(E)] \quad (5.8)$$

で表される。この $\sigma(E)$ は光電吸収の断面積。phabs,wabs はこの断面積の取りかたが異なる。

第6章 解析結果

6.1 LMC X-3

6.1.1 イメージ

パイルアップを防ぐために半径 40 " の円から半径 20 " の円を除いた円環状の領域をとった。

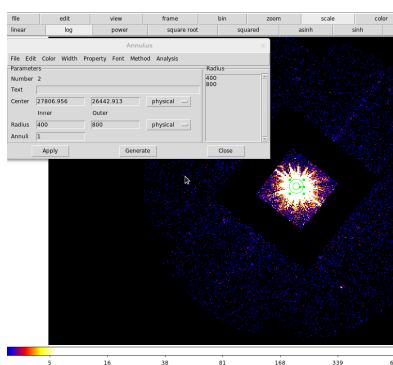


図 6.1: スペクトル抽出する領域

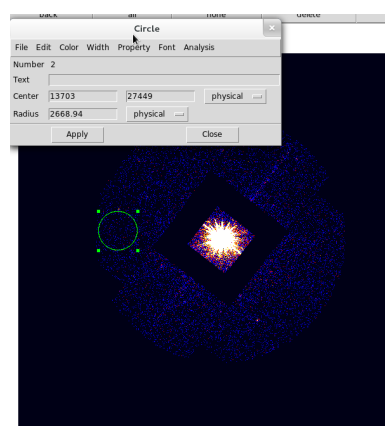


図 6.2: バックグラウンドスペクトルをとった領域

6.1.2 ライトカーブ

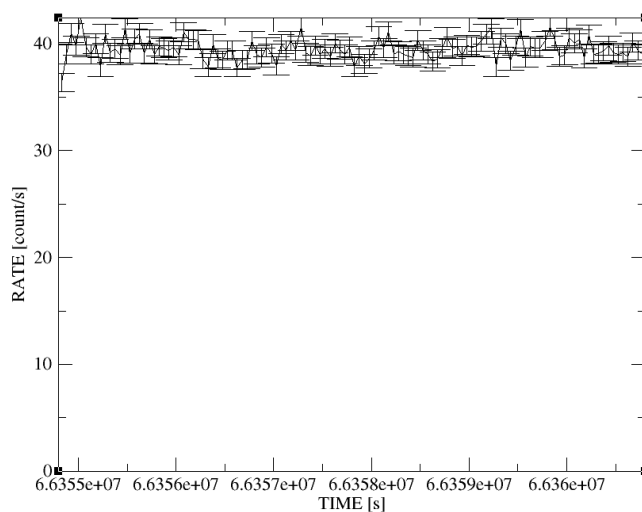


図 6.3: LMC X-3(mos1)

6.1.3 パイルアップ

パイルアップの影響がしっかりカットされているかを確認する。図の下のグラフから、ヒストグラムと理論曲線のズレが領域を円環にとることで小さくなっているのがわかる。

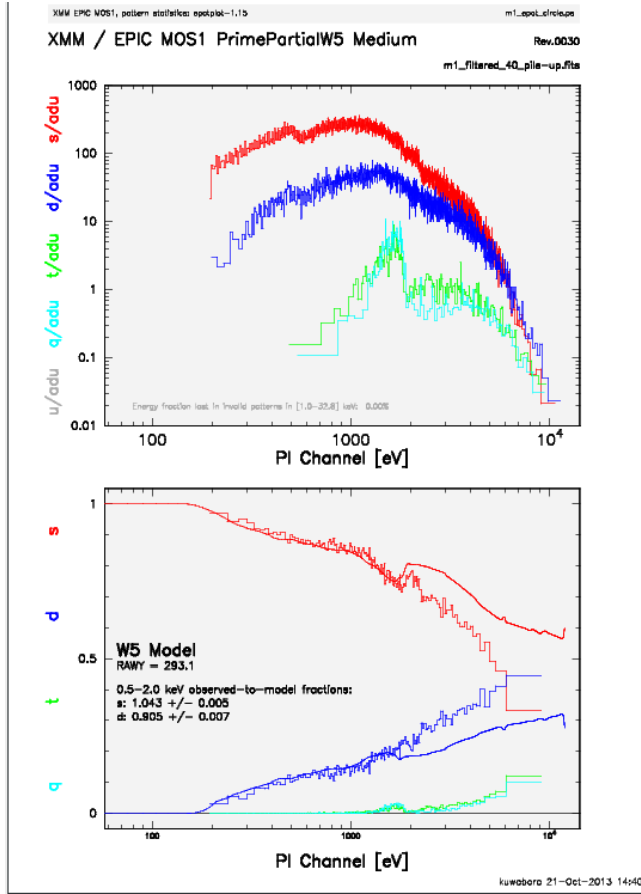


図 6.4: 半径 40 " の円

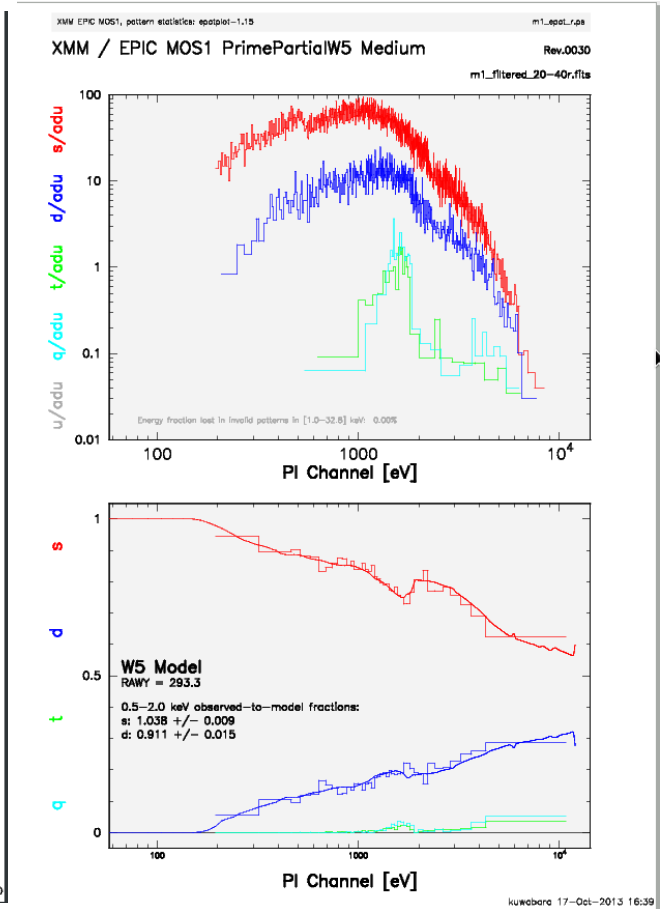


図 6.5: 半径 20~40 " の円環

6.1.4 スペクトル解析

今回用いた観測データは mos1,mos2 は Large Window Free Running というモードで観測されているが、PN は FullFrame モードで観測されていたため同時にフィッティングすることはできなかった。

phabs*(powerlaw+diskbb) でのフィッティングの結果

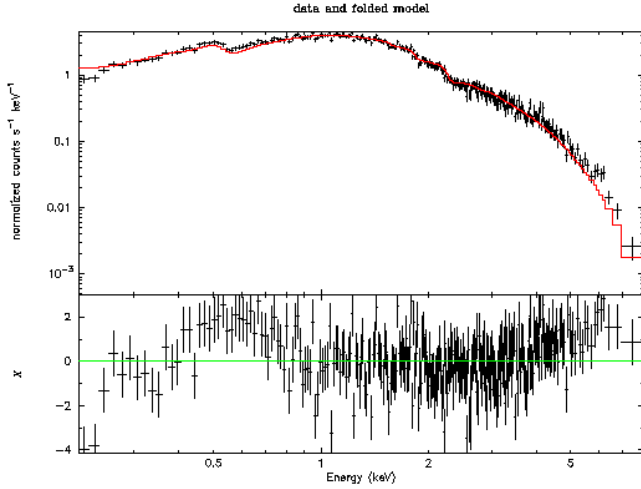


図 6.6: model:phabs*diskbb

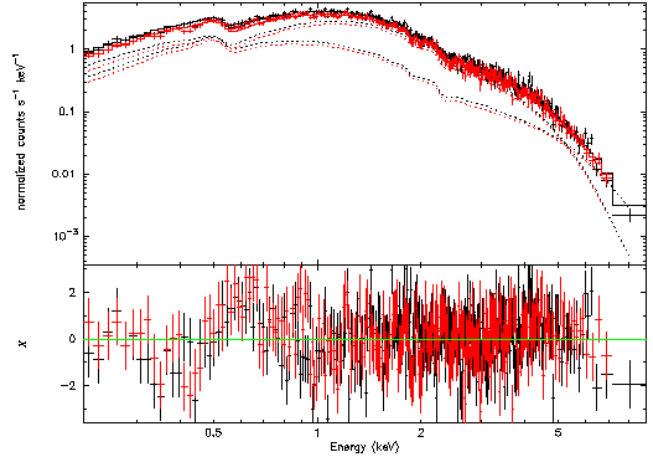


図 6.7: model:phabs*(powerlaw+diskbb)

LMC X-3 は標準的なブラックホールのモデルで表せることがわかった。

phabs	nH(10^{22})	$6.73269 \cdot 10^{-02}$
diskbb	T_{in} [keV]	0.835958
	norm	31.8850
powerlaw	PhoIndex	2.20841
	norm	$3.64316 \cdot 10^{-02}$
chi-squared		1.2061

LMC X-3 の解析結果まとめ

自作の perl を使って内縁半径を計算した。計測器との角度を事前に知ることは難しいので $\theta = 60^\circ$ とした。

光度は XSPEC の flux コマンドを用いて出した flux から計算した。flux コマンドのエネルギー範囲は 0.3~10.0 keV に設定した。

表 6.1: 内縁半径と光度の計算結果

Obs ID.	0116900501
Date	2000/2/7
内縁半径 R_{in} [km]	39.9
質量 $M[M_{\odot}]$	4.4
光度 L [erg/s]	$1.28 \cdot 10^{38}$

6.2 NGC6946 X-1

6.2.1 イメージ

パイルアップの影響は小さいと思われるので領域は円状に半径 12 "でとり、0.3~10 KeV の範囲でフィルターをかけた。バックグラウンドは同心の半径 12 " ~ 17 " の円環をとった。

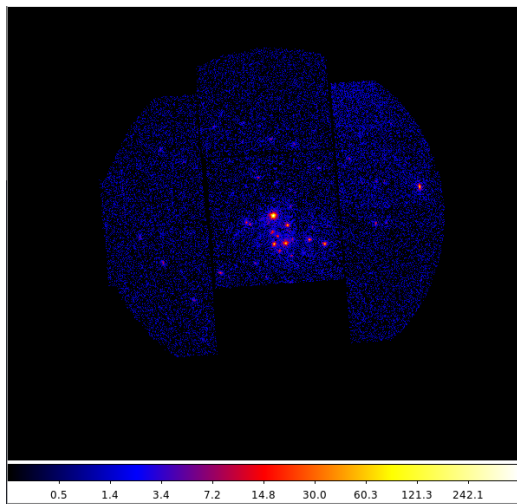


図 6.8: mos1

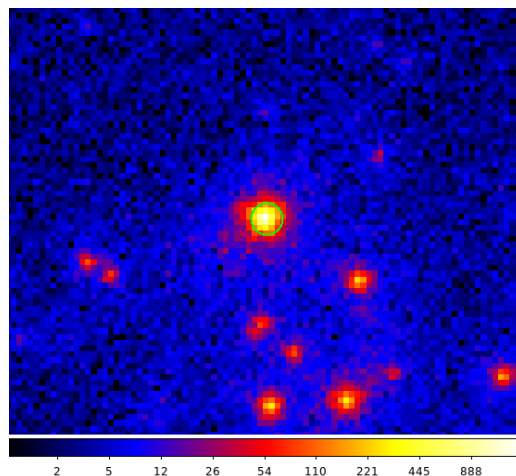


図 6.9: 半径 12 " の領域

mos2,PN についても mos1 と同じ領域をとった。

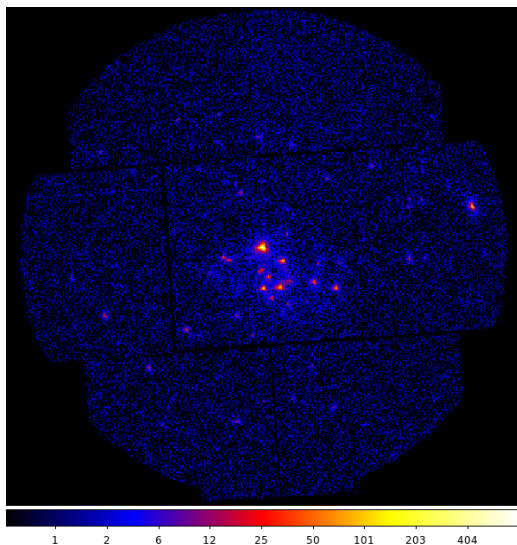


図 6.10: mos2

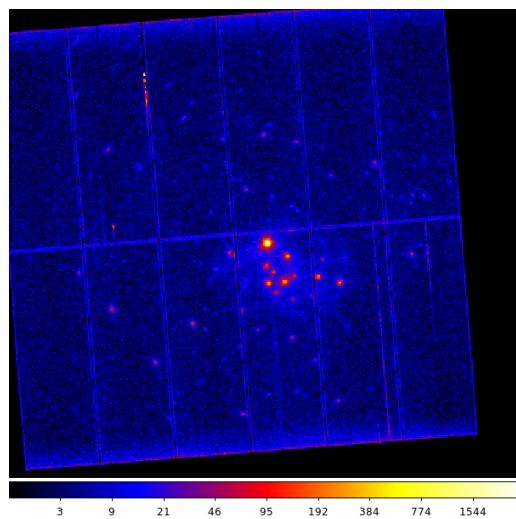


図 6.11: PN

6.2.2 ライトカーブ

観測データの全領域のライトカーブには大きな変動が見られたが、対象天体の周辺の領域では大きな変動はなかったので GTI フィルターはかけずに解析を行った。

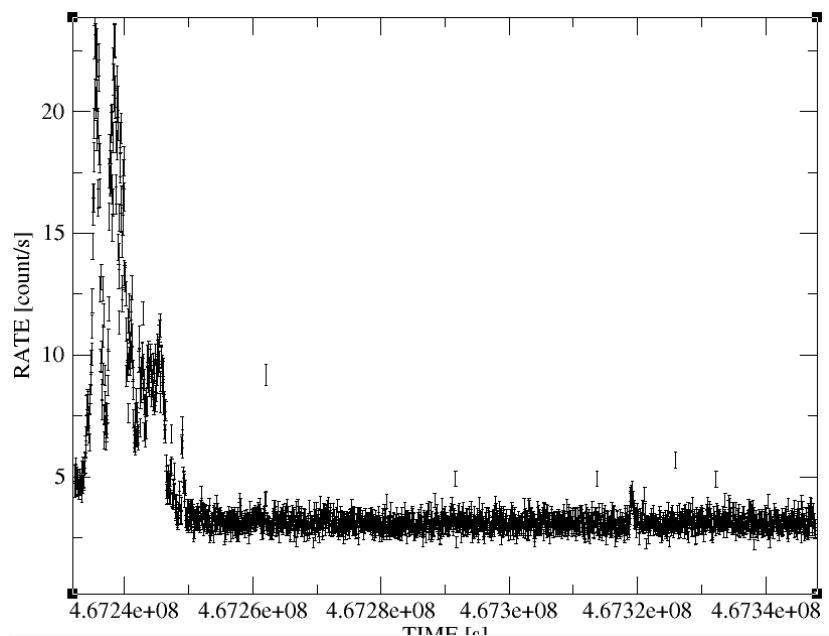


図 6.12: mos1(全領域)

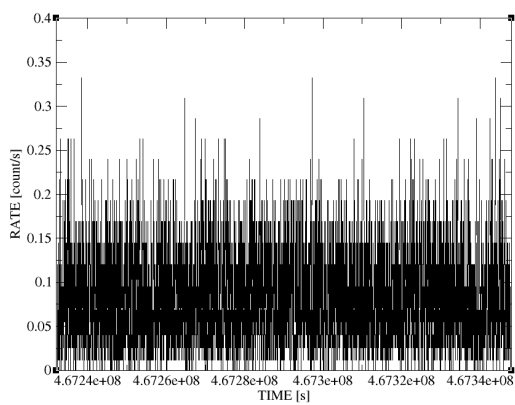


図 6.13: mos1(対象領域 $\sim 12''$)

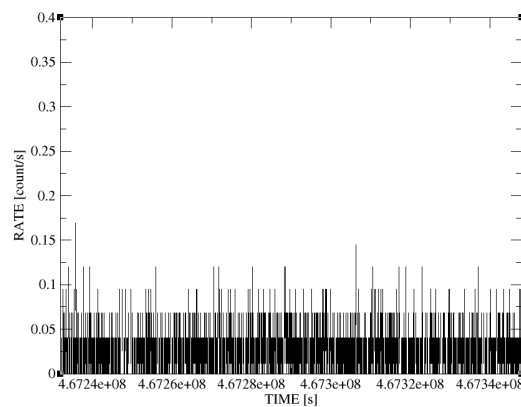


図 6.14: mos1(バックグラウンド $12\sim 17''$)

6.2.3 スペクトル解析

すべての検出器が Full Frame モードでの観測だったので同時にフィッティングした。
model:phabs*(diskbb+powerlaw) でのフィッティング

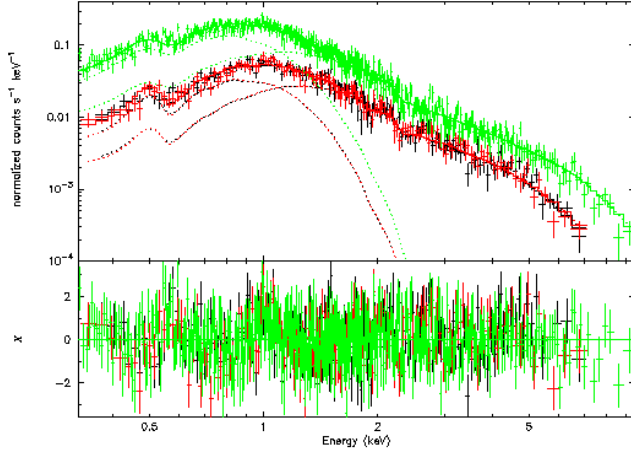


図 6.15: Date 2012/10/21

表 6.2: 各パラメータの結果

Obs ID.	0691570101	
Date	2012/10/21	
phabs	nH(10^{22})	0.399536
diskbb	T_{in} [keV]	0.167953
	norm	250.153
powerlaw	PhoIndex	2.42557
	norm	2.85031×10^{-04}
Reduced chi-squared		1.0414

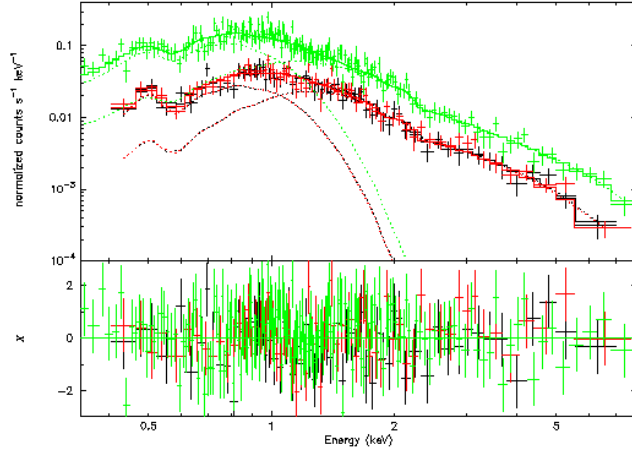


図 6.16: Date 2007/11/02

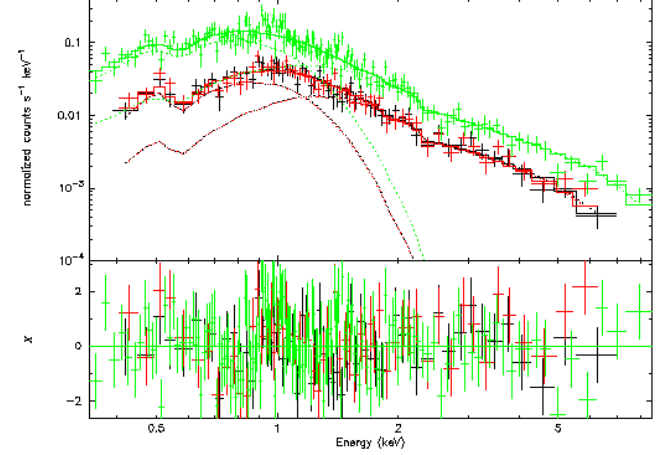


図 6.17: Date 2007/11/08

表 6.3: 各パラメータの結果

Obs ID.	0500730201	
Date	2007/11/02	
phabs	nH(10^{22})	0.456700
diskbb	T_{in} [keV]	0.138630
	norm	1019.53
powerlaw	PhoIndex	2.51910
	norm	2.81937×10^{-04}
chi-squared		0.89242

Obs ID.	0500730101	
Date	2007/11/08	
phabs	nH(10^{22})	0.381419
diskbb	T_{in} [keV]	0.165346
	norm	239.744
powerlaw	PhoIndex	2.18378
	norm	1.87948×10^{-04}
chi-squared		1.0909

表 6.4: 内縁半径と光度の計算結果

Obs ID.	0691570101	0500730101	0500730201
Date	2012/10/21	2007/11/08	2007/11/02
内縁半径 $R_{in}[km]$	13420.5	13138.3	27093.6
質量 $M[M_{\odot}]$	1491.17	1459.81	3010.40
光度 $L[erg/s]$	3.43354×10^{39}	3.001384×10^{39}	2.91894×10^{39}

6.2.4 パワースペクトル

先行研究に合わせてエネルギーフィルタを 0.3~10.0 keV に設定し、スペクトル解析と同様の領域をとった。

ピークの位置から、QPO の周波数は約 0.008 Hz ということがわかる。周波数 F と周期 T の関係は $T = 1/F$ なので、この X 線変動の周期が約 120 秒であることがわかった。

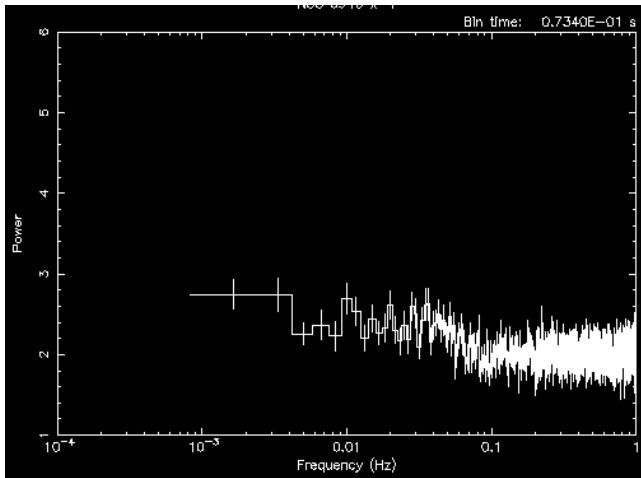


図 6.18: Date 2012/10/21 対象領域

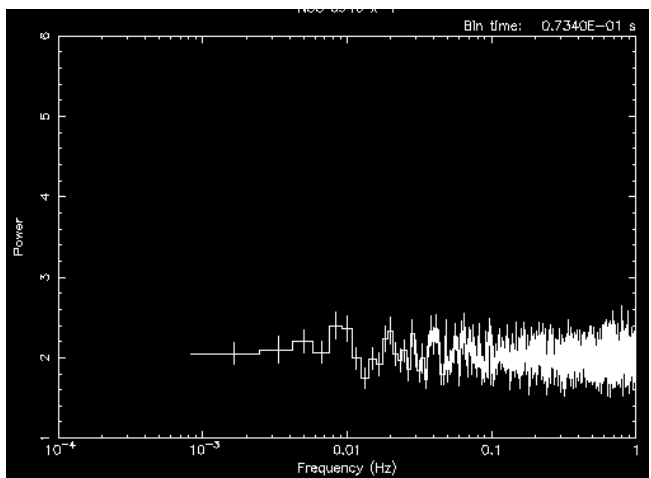


図 6.19: バックグラウンド領域

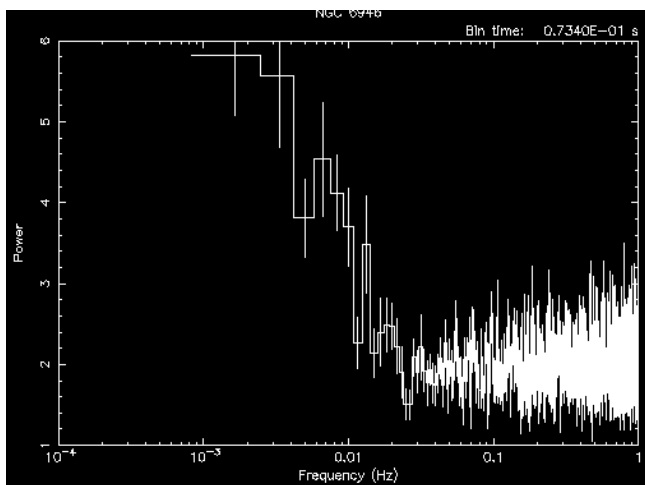


図 6.20: Date 2007/11/08 対象領域

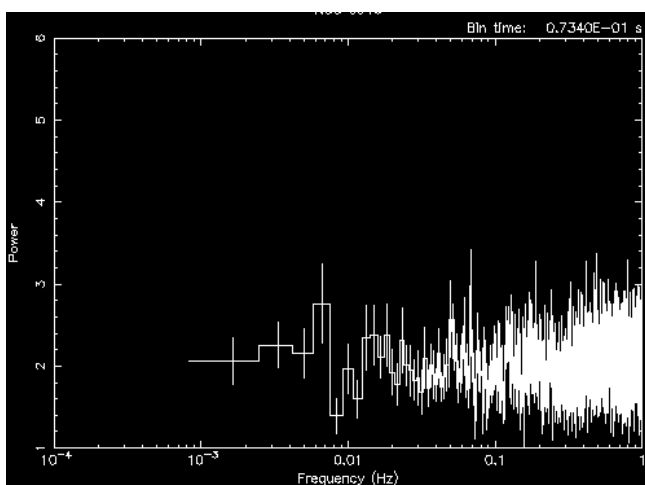


図 6.21: バックグラウンド領域

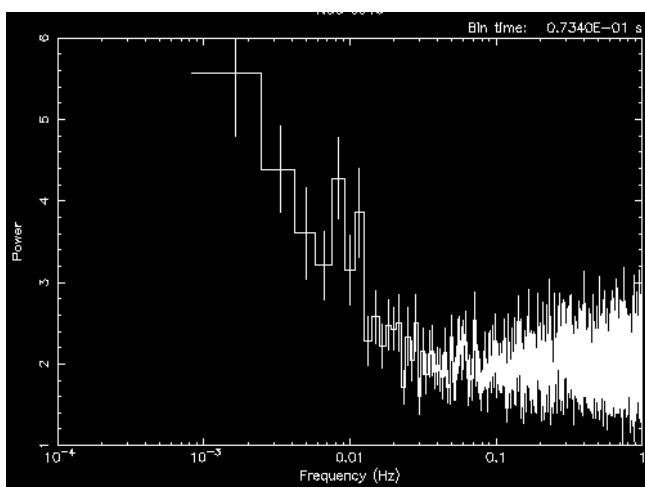


図 6.22: Date 2007/11/02 対象領域

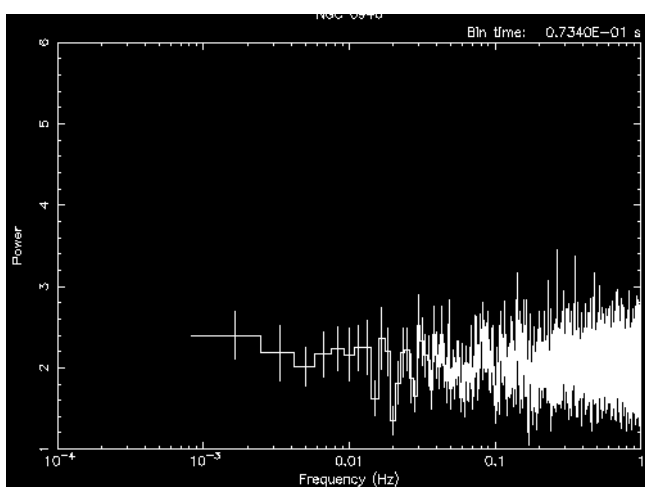


図 6.23: バックグラウンド領域

第7章 まとめ

NGC6946 X-1 の光度は LMC X-3 と比べてはるかに大きく、超大光度 X 線源としての特徴が見てとれる。降着円盤が標準的なものであると仮定した場合の質量は太陽質量の 10^3 倍のオーダーを持つことがわかった。また、LMC X-3, NGC6946 X-1 がともに $\text{phabs}^*(\text{diskbb}+\text{powerlaw})$ モデルで再現できたことから NGC6946 X-1 もブラックホールである可能性が高いと思われる。よって、恒星質量ブラックホールと大質量ブラックホールの間の質量を埋めてくれる存在が超大光度 X 線源なのではないかと期待される。

また、NGC6946 X-1 が約 120 秒という短い時間変動をしていることもわかった。

object	date	内縁半径 $R_{in}[km]$	質量 $M[M_{\odot}]$	光度 $L[\text{erg/s}]$	re- χ^2
LMC X-3	2000/02/07	39.9	4.43	$1.28 * 10^{38}$	1.2061
NGC6946 X-1	2007/11/08	13138.3	1459.81	$3.00138 * 10^{39}$	1.0909
	2007/11/02	27093.6	3010.40	$2.91894 * 10^{39}$	0.89242
	2012/10/21	13420.5	1491.17	$3.43354 * 10^{39}$	1.0414

表 7.1: すべて $\text{phabs}^*(\text{diskbb}+\text{powerlaw})$ でのフィッティング

第8章 謝辞

この論文を書くうえで多くの方にお世話になりました。特に松下先生、佐藤先生のご指導なくしてこの論文は書けませんでした。夏の院入試に落ちて以降、卒業研究が本格的に始まりつつもやはり気分が落ち込むことも多くありました。先生方の鋭くも優しいご指摘があったからこそ研究を続けられたと思います。

院生の佐々木さん、望月さん、横田さん、阿部さんにはたくさんのご迷惑をかけてしまったことと思います。それでもいつも優しく接して下さり、みなさん忙しいなかでも笑顔で指導してくれてとてもありがたかったです。おかげでいつも明るい雰囲気の中で研究することができたと思います。

最後に卒研究生の皆さん、本当に楽しい一年でした。冬の院試が近づくにつれ死にそうな顔になっていった私を励ましてくれたのは常に楽しい雰囲気に包まれた研究室の皆でした。来年以降も顔を合わせる人が多いですが、また仲良くしてくれるとありがたいです。

この一年間での経験、学んだことを大学院、さらには社会に出てからも活かせるよう頑張っていきたいと思います。

参考文献

- [1] 澤口麻美修士論文 (東京理科大学) 2010
- [2] シリーズ 現代の天文学 8 ブラックホールと高エネルギー現象 著. 小山勝二 編. 嶺重慎
- [3] 宇宙科学入門 第 2 版 著. 尾崎洋二
- [4] すざくホームページ <http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/index.html.ja>
- [5] Rao, Fengyun.Feng, Hua.Kaaret, Philip.,2010 , Apj , 620 , 624
- [6] Shaposhnikov, Nickolai. Titarchuk, Lev., 2009, ApJ, 699, 453