

ブラックホール連星の短時間での X 線スペクトル変動

水本 岬希 (宇宙科学研究所 / 東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

1971 年に Cyg X-1 から 1 秒以内の X 線の光度変化が検出されて以来、ブラックホール連星は X 線で短時間変動を示す天体として特徴付けられてきた。また、エネルギー分解能の向上により複数のブラックホール連星から青方遷移した吸収線が検出され、ブラックホール周辺から吸収体の放出 (アウトフロー) が起きていることが明らかになった。しかし、装置的な制約ゆえに、吸収線を検出できる高エネルギー分解能で X 線スペクトルの短時間変動を追った例は乏しい。

すざく衛星搭載の X 線 CCD カメラ XIS は、観測対象の明るさや時間変動に応じて観測モードを使い分けて観測を行っている。そのうちのひとつである Parallel-sum clocking (P-sum) モードでは、通常の観測モードでは 8 秒ごとにイベント付けされる場所、7.8 ミリ秒刻みでイベントを得ることができる。P-sum モードは通常モードとは異なる独自の較正が必要であったため、我々はまず P-sum モードの較正用観測データを網羅的に解析し、打ち上げ以来のエネルギースケールと分解能を決定した。この較正結果を踏まえて P-sum モードで取得されていたブラックホール連星 GRS 1915+105 のアーカイブデータを解析したところ、0.5–10 秒の時間スケールでは X 線スペクトル全体が変動しており、時間ビンが短いほど変動が激しいことが明らかになった。この結果は天体からの一次成分が 0.5 秒以下の変動をしていることを示している。一方で、X 線スペクトルは部分吸収により説明できるが、この部分吸収体は 0.5 秒より短い時間スケールで変動している可能性がある。

1 Introduction

ブラックホール連星は、世界初の X 線天文衛星「ウフル」によって Cyg X-1 から 1 秒以下の X 線変動が検出され、その後連星運動から質量に制限がつけられたことで、その存在が確実なものになった (e.g. Oda et al. 1971; Bolton 1975)。その後、X 線観測装置のエネルギー分解能の向上により吸収線の青方偏移が検出されたことで、ブラックホール連星からアウトフローが起きていることが明らかになった (e.g. Ueda et al. 1998, 2009)。だが、これらの検出器は時間分解能が低く、ブラックホール連星に特徴的な 1 秒以下の X 線変動を高エネルギー分解能で観測するのは装置の制約上非常に困難であった。

一方、活動銀河核 (Active galactic nucleus; AGN) 中心には $10^6\text{--}10^9 M_{\odot}$ 程度の超巨大ブラックホール (SMBH; super-massive black hole) があると考えられている。AGN の X 線スペクトルおよび光度変化を説明するモデルは複数あり、完全に決着がつかない問題であるが、SMBH 周囲での吸収体による部分吸収でスペクトル変動を説明することが出来る

ことが示されている (Miyakawa et al. 2012)。ここで、AGN の変動の時間スケールをブラックホール質量で規格化すると、ブラックホール連星における吸収体の変動の時間スケールはミリ秒程度となる。ゆえに、吸収線を検出できるだけの高いエネルギー分解能とミリ秒程度の変動を捉えられるだけの高い時間分解能を両立した X 線観測を行うことで、ブラックホール連星の変動における吸収体の影響を調べることが出来ると考えられる。

すざく衛星搭載の X 線 CCD カメラ X-ray Imaging Spectrometer (XIS) は、通常モードでは 1 フレームの電荷情報の読み出しに 8 秒かかるため、それより短い時間変動を捉えることが出来ない。しかし、XIS の観測モードの一つである Parallel-sum clocking (P-sum) モードでは、撮像領域において縦方向に複数列のイベントを加算して読み出すことで、縦方向の位置情報は失うかわりに、 $8/1024 = 7.8$ ミリ秒刻みでイベントの読み出しをすることが出来る。この観測モードを用いることで、CCD カメラの高いエネルギー分解能で秒スケール以下の短い時間変動を捉えることが可能となる。一方で、P-sum モードは

Spaced-row Charge Injection (SCI) 機能を用いることが出来ないため、宇宙線が CCD ヘダメージを与えることによる電荷転送効率の低下を軽減することが出来ず、通常モードと比べて経年劣化が著しく速い。そのため、P-sum モードは独自のゲインスケールや分解能の調査が必要であった。しかし、セグメント毎の経年劣化の様子が大きく異なるため較正線源情報を利用することが出来ないなどの理由により、P-sum モードの較正はあまり行われておらず、キャリブレーションデータベース (CALDB) はこれまで予備的なデータしか公開されていなかった。ゆえに、これまでに P-sum モードの時間分解能に着目したブラックホール連星の解析はあったものの、スペクトルの議論はされてこなかった (Yamada et al. 2013)。

そこで我々は、これまで P-sum モードで観測された較正用データを網羅的に解析し、打ち上げ以来のエネルギースケールと分解能を新たに決め直した。その後、この較正結果を用いて、ブラックホール連星 GRS 1915+105 のスペクトル変動の解析を行った。以下、これらの結果について報告する。

2 Instruments and Observations

解析を行うにあたり、まず P-sum モードのデータ較正を行った。較正には、P-sum モードで較正用観測が行われている超新星残骸 E0102-72 および Perseus 銀河団のスペクトルデータを用い、観測データが複数存在する XIS 0, 3 の Segment B, C のみを対象にした。本較正の結果は、2014 年 7 月 1 日付け以降の CALDB に反映されている¹。

作成した CALDB ファイルを用いて、すぎく衛星で取得されたブラックホール連星 GRS 1915+105 のアーカイブデータの解析を行った。使用したデータ (ID=402071010) は 2007 年 5 月に取得され、観測時間は 124 キロ秒、露光時間は 66 キロ秒である。XIS 0, 3 は P-sum モード、XIS 1 は通常モード (1/4 window + 0.1 sec burst) で観測された。P-sum モードのリプロセスは “Recipe for reducing XIS data

taken with the P-sum/timing mode”² に従って行い、両 XIS とも較正が行われている Segment B, C のデータのみを用いた。較正が不完全であるため、スペクトルフィットの際は `xspec` 上 `gain fit` コマンドを用いて補正を行った。P-sum モード、通常モードともにパイルアップの影響を防ぐために必要に応じて領域をくり抜いた。また、天体からの信号が十分強いためバックグラウンドの差し引きは行っていない。リプロセスの後に P-sum モードでのライトカーブを描いたところ、カウントが不自然に 0 に張り付いている箇所があることが明らかになった。これはテレメトリの飽和が原因であると考えられるため、GTI ファイルを作成し、カウントが不自然に 0 に張り付いている箇所を取り除いた。

3 Results

図 1 にライトカーブの一部を示す。P-sum モード観測が短い時間変動を捉えていることが見て取れる。図 2 に、XIS 1 で取得されたスペクトルを示す。単純なべき関数と吸収でスペクトル全体をフィッティングしたところ、7 keV 付近に残差が生じていることが分かる。以後、この構造に着目するため、4-10 keV のスペクトルのみを用いて解析を行う。

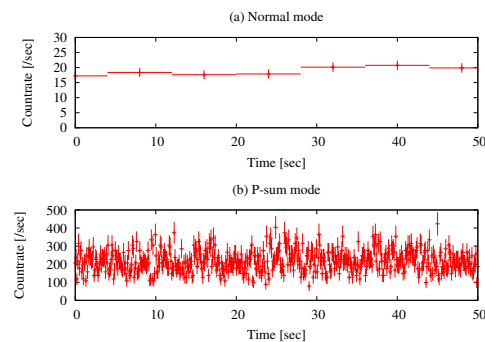


図 1: (a) 通常モード (XIS 1) と (b) P-sum モード (XIS 0 + XIS 3) で取得された GRS 1915+105 のライトカーブ。

時間変動に着目するため、difference variation function (DVF) 法 (Inoue et al. 2011) を用いてスペクトルの変動を調べた。具体的には、ある時間ビン Δt を設定し、 $2n\Delta t \leq t < (2n+1)\Delta t$ のカウン

¹リリースノートは以下のページに公開されている。
http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/caldb/doc/xis/caldb_update_20140624_README.pdf

²http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/analysis/xis/psum_recipe/Psum-recipe-20100724.pdf

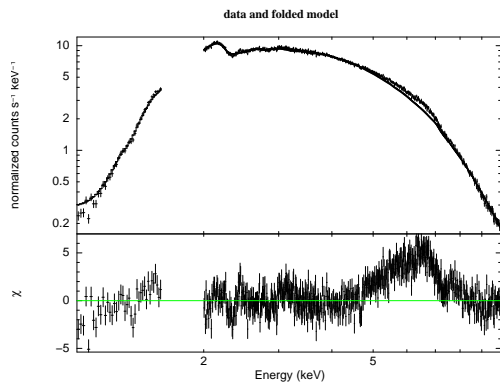


図 2: GRS 1915+105 の時間平均スペクトル (XIS 1)。モデルフィットは `xspec` 上で `phabs * powerlaw` を用いて、スペクトルの構造が見受けられる 5–8 keV は外してフィッティングを行った。

ト数と $(2n + 1)\Delta t \leq t < (2n + 2)\Delta t$ のカウント数を比較し、明るいフェーズと暗いフェーズを決定した (図 3)。次に、明るいフェーズを足上げたスペクトルと暗いフェーズを足上げたスペクトルを作成した。図 4 に、 $\Delta t = 1.02$ 秒とした時のスペクトルの比較、図 5, 6 に複数の Δt における明るいスペクトルと暗いスペクトルの比を示した。

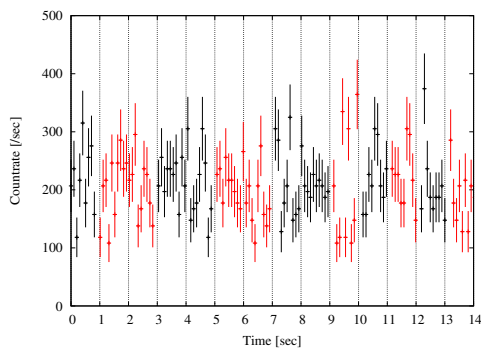


図 3: $\Delta t = 1.02$ 秒で DVF 法を用いた際のライトカーブの一部。黒が明るいフェーズ、赤が暗いフェーズを示している。

4 Discussion

4.1 スペクトルフィット

図 2 で示した通り、時間平均スペクトルにおいて 7 keV 付近にべき関数からの残差がある。このよう

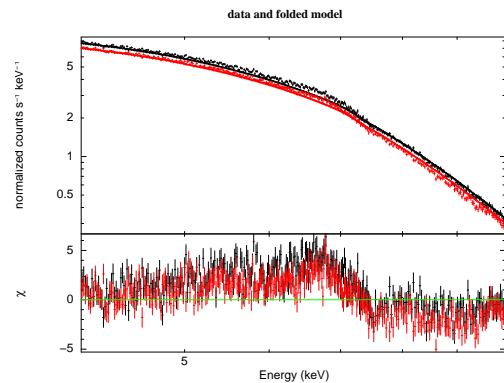


図 4: $\Delta t = 1.02$ 秒で DVF 法を用いた際のスペクトルの比較。黒が明るいフェーズ、赤が暗いフェーズを示している。モデルフィットは `xspec` 上で `phabs * powerlaw * const` を用いて行った。`phabs` は図 1 の値に固定した。

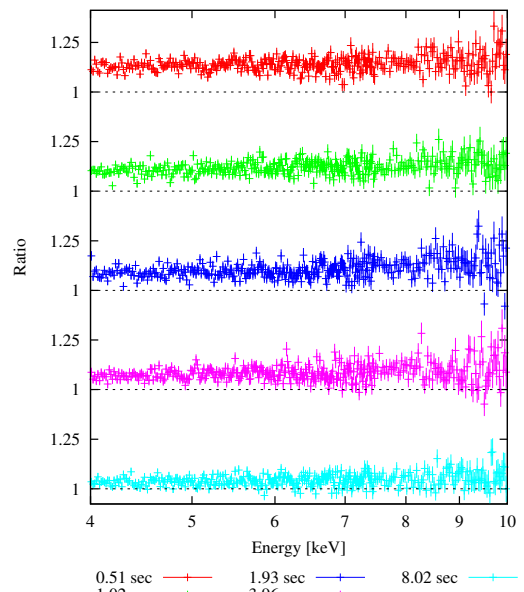


図 5: $\Delta t = 0.51, 1.02, 1.93, 3.96, 8.02$ 秒で DVF 法を用いた際の、明るいスペクトルと暗いスペクトルの比。

な「広がった鉄輝線のように見える構造」はブラックホール連星や AGN のいくつかに見えるものであるが (e.g. Blum et al. (2009))、部分吸収による鉄の吸収エッジによって作られているというモデルでスペクトルを説明可能であることを示した (図 7)。

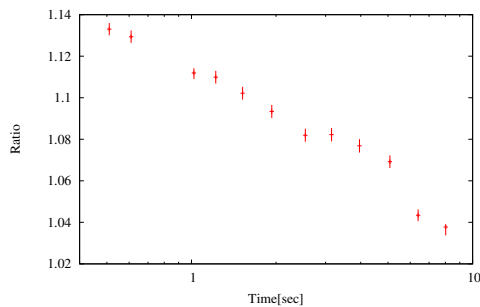


図 6: 光度変化の Δt 依存性。横軸に Δt 、縦軸に暗いスペクトルに対する明るいスペクトルの比を示している。縦軸のエラーバーは 90% 信頼区間。

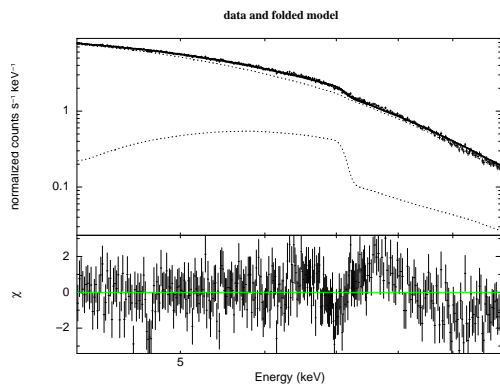


図 7: 部分吸収を入れた時のスペクトルフィット。柱密度 $N_H = 1.2 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ の低電離吸収体が X 線源の 30% を覆い隠している。

4.2 時間変動

DVF 法を用いたスペクトル変動解析から、0.5–10 秒の時間スケールでは時間ビンが短くなればなるほど明るいスペクトルと暗いスペクトルの比が大きくなっていることが明らかになった (図 6)。これは、0.5–10 秒の間では短い時間スケールでの変動が激しいことを示している。一方で、スペクトル変動の要因が吸収体によるものであるとすると変動の振る舞いにエネルギー依存性が生じるはずであるが、変動のエネルギー依存性は小さく、鉄のエッジ構造は表れていない (図 5)。このことから、0.5–10 秒の間での時間変動は一次放射成分の変動、即ち X 線放射領域の固有の変動であると解釈することが出来る。

以上の議論により、鉄のエッジ構造を形成してい

るものは、変動をしていない、あるいは 0.5 秒以下もしくは 10 秒以上で変動をしているものであることが明らかになった。GRS1915+105 のスペクトル変動がセイファート銀河 MCG-6-30-15 のように吸収体の変動によるものとするならば (Miyakawa et al. 2012)、ブラックホール質量で規格化すると変動の時間スケールは 10 ミリ秒程度となり、今回調べた 0.5 秒より短い。今後の課題として、今回の解析よりもさらに短い時間スケールでの変動を調べていくことを考えている。

5 Conclusion

すぎく衛星 XIS 検出器の P-sum モードの打ち上げ以来のエネルギースケールと分解能を決定した。その較正結果を踏まえて、ブラックホール連星 GRS 1915+105 の P-sum モードでのアーカイブデータを解析した結果、以下の結論を得た。

1. スペクトルの形状は部分吸収による鉄エッジによって説明できる。
2. 0.5–10 秒の時間スケールでは、時間幅が短くなるほど変動が大きくなる。
3. 0.5–10 秒の間の変動は天体からの一次成分の変動であると考えられる。
4. 吸収体の変動の時間スケールは 0.5 秒より短いと予想される。

Reference

- Blum, J. L., Miller, J. M., Fabian, A. C., et al. 2009, ApJ, 706, 60
- Bolton, C. T. 1975, ApJ, 200, 269
- Inoue, H., Miyakawa, T., & Ebisawa, K. 2011, PASJ, 63, 669
- Oda, M., Gorenstein, P., Gursky, H., et al. 1971, ApJ, 166, L1
- Miyakawa, T., Ebisawa, K., & Inoue, H. 2012, PASJ, 64, 140
- Ueda, Y., Inoue, H., Tanaka, Y., et al. 1998, ApJ, 492, 782
- Ueda, Y., Yamaoka, K., & Remillard, R. 2009, ApJ, 695, 888
- Yamada, S., Negoro, H., Torii, S., et al. 2013, ApJ, 767, L34