

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740129

研究課題名(和文) X線分光偏光観測で探るブラックホールの激しい時間変動

研究課題名(英文) X-ray spectral and polarimetric study on rapid variability of black holes

研究代表者

山田 真也 (Shinya, Yamada)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：40612073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ブラックホール連星(恒星とBHの連星系)を宇宙X線衛星で観測し、降着流の物理や、一般相対論の役割を解明するのが目的である。X線衛星「すざく」を用いてBH連星を観測し、約1秒では変動しない円盤放射の存在を明らかにした。また、降着率が低い時は、ハードとソフトなコンプトン、降着円盤からの放射、反射成分に分解できることを特定にモデルに依存せずに示した。これらにより、「約100万度(-0.1 keV)の低温円盤と、約10億度(-100 keV)の高温コロナがBH周囲に共存し、質量降着率によってそれらの重なり具合が変化する」ことを観測的に示す事に成功した。

研究成果の概要(英文)：Our aim is to understand general relativistic accretion flow around a black hole by observing X-ray binaries of a black hole. We have analyzed a famous black hole binary, Cygnus X-1, using Suzaku X-ray observatory in the low/hard were conducted in a model-independent manner. Variations on short (seconds) and long (days to months) time scales require a constant component localized below 2 keV, a broad soft one dominating in the 2-10 keV range, and a hard one mostly seen in 10-300 keV range. These are respectively interpreted as emission from the truncated cool disk, a soft Compton component, and a hard Compton component in view of the truncated disk/hot inner flow picture. Long-term spectral evolution can be produced by the constant disk increasing in temperature and luminosity as the truncation radius decreases. Furthermore, we found highly ionized Fe-K absorption lines, which can be a probe of accretion geometry.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：ブラックホール 宇宙 X線

## 1. 研究開始当初の背景

ブラックホールの存在は、20世紀前半に一般相対論により理論的に予言され、その強大な重力のために光さえその中から脱出できない天体である。20世紀後半のX線天文学の台頭によりブラックホールの存在は疑いようのないほど確かなものとなり、今では、銀河や宇宙の進化にも影響を与えるほど重要な存在であることが分かってきた。

これまでの研究から、銀河系には2種類のブラックホールがあることがわかってきた。ひとつは、銀河の中心に1つだけ存在する太陽の100倍ほどの重さをもつ巨大ブラックホールである。もうひとつは、星が死ぬ時の大爆発で作られる星の10倍ほどの重さをもつブラックホールである。後者は、ブラックホールと普通の恒星のペアからなるブラックホール連星として発見され、銀河に約20個ほど存在する。ブラックホール連星の周囲には恒星からのガスがあり、それらはブラックホールの周囲を回り、ガスは回っているうちにブラックホールへと引き込まれ摩擦熱で高温になり、X線を放出する。そのX線を詳細に調べる事でブラックホールの極近傍まで探ることができる。

そのブラックホールからのX線が、激しい時間変動を示すことが30年以上前のロケット実験で発見され、その後も人工衛星を用いた観測がされてきたが、その起源や放射源として考えられている円盤やコロナについて未だによく分かっていない。ブラックホール近傍の強い重力も働いていると考えられているが、観測情報が大きく不足していた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、約40年の謎であるブラックホール特有のX線変動とその放射源の解明である。ブラックホールが示すX線変動のタイムスケールは、シュワルツシルト半径程度( $\sim$ ms)とひじょうに早くブラックホール以外の天体からは一切観測されない。そのため、ブラックホール近傍に形成されるコロナが生じる一般相対論的效果とも考えられているが、コロナの形状や密度などの基本情報すら分かっていないのが現状である。

ブラックホールの近傍に存在すると考えられているコロナに関しては、約10億程度程度の高温であると考えられているが、その物理状態や大きさや形等の基礎情報ですら分かっていない。申請者は、コロナは磁気乱流

状態にあり、ガスがBHに落ち込む際に磁気リコネクションによりエネルギーを解放するという仮説を考えており、これを検証するために、X線衛星のデータを様々なタイムスケールや、広帯域のスペクトルで解析することで、この謎の紐解きを目指す。

## 3. 研究の方法

「すざく」衛星のデータと自ら開発した『時間分解スペクトル法』の合わせ技でコロナの基礎情報の抽出を行う。これは、任意のタイムスケール  $t$  におけるスペクトル変動を抽出する方法である。ただし、最短の  $t$  は検出器の時間分解能に依存するため、「すざく」衛星搭載 CCD 検出器の較正もを行い CCD の高時間分解能モードを自在に解析できる環境の構築が不可欠である。

「すざく」衛星によるはくちょう座 X-1 というブラックホールの観測データを、系統的に解析し、「すざく」衛星を用いて電子密度と温度を詳細に決定し、円盤やコロナの物理状態を観測的に決定する。質量降着率の変化と、コロナの光学的厚みや温度、円盤放射の強度や内縁半径、がどのように時間発展するかを明らかにする。これにより、「円盤-コロナ」の描像をより具体化し、時間変動との関係も調べる。

将来的に、新しい観測量を得るため、次期X線衛星「ASTRO-H」と世界初のX線偏光衛星「GEMS」衛星の開発も行う。これらが実現すれば、ブラックホール近傍の降着円盤から発せられる鉄の蛍光輝線から、円盤の回転にともなうドップラー効果や一般相対論効果の強さを測定する事も可能になる。

## 4. 研究成果

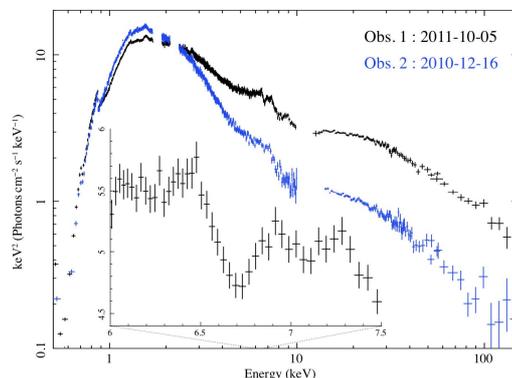
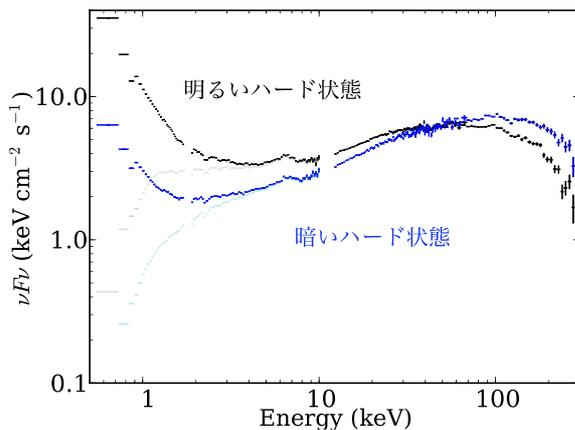


図1: 「すざく」衛星により発見されたブラックホール連星はくちょう座X-1からの鉄の高電離した吸収線。

(1) 質量降着量が高い時期のはくちょう座 X-1 を「すざく」で観測し、ブラックホール降着流から高階電離した鉄吸収線が現れて消える現象を発見した。ブラックホール周囲に存在する非定常な電離吸収体の存在が明らかとなり、それが短時間(数時間)で変動していることがわかった。

このような吸収体があること自体は既知な事象であったが、高電離した鉄の吸収線はほぼ初めてであり、また時間発展も「すざく」の高感度により初めてわかった。伴星からの質量供給の幾何と、ブラックホール近傍の降着円盤やコロナとの関係は未だに分らないことが多く、次期 X 線衛星 ASTRO-H や、世界初の X 線偏光衛星 GEMS に期待されており、「すざく」で恒常的に明るいはくちょう座 X-1 から鉄吸収線が発見されたことで、観測戦略の見通しが立つことになった。

(2) 2 つ目は、「すざく」衛星が 2005-2009 年に行った Cyg X-1 の全 25 観測のデータを系統的に解析し、観測ごとや様々なタイムスケールでの変動現象を調べた。強度判別分光を用いて約 1 秒のタイムスケールを調べる事で、円盤放射の存在を明らかにし、中長期的なタイムスケールから、ハード状態の広帯域スペクトルが、ハードとソフトなコンプトン、降着円盤からの放射、反射成分に分解できることを特定にモデルに依存せず示す事に成功した。



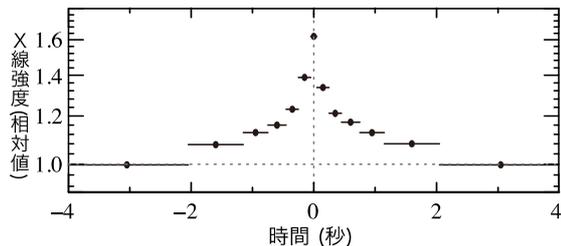
これにより、「約 100 万度(約 0.1 keV)の低温

**図 3: 「すざく」が捉えたブラックホール連星はくちょう座 X-1 の明るいときと暗いときの広帯域スペクトル。黒が明るいときで、青が暗い時。星間吸収と検出器応答は除いている。**

円盤と、約 10 億度(約 100 keV)の高温コロナ

がブラックホール周囲に共存し、質量降着率によってそれらの重なり具合が変化する」という描像を補強する事に成功した。また、同じハード状態の中でも、エディントン限界光度の約 1%より明るいときと暗いときで、スペクトル変動に違いがはっきりと見えており、暗くなると降着流の幾何に違いが生じる可能性がでてきた。特に円盤が後退してもなお残る軟 X 線の起源はよくわかっておらず、ブラックホール降着円盤の磁場と電子の相互作用で起こるシンクロトロン光を見ている可能性も見えてきた。今度、電波を含めた多波長観測を展開する上で、貴重な観測結果を導いたと考えている。

(3) 最後は、ショット解析(根来他'95)を用いて 1 秒以下のスペクトル変動を抽出し、集積したフレア(ショット)を 0.1 秒ごとに時間分割し、10-200keV までのスペクトルを得る事にはじめて成功し、コンプトンモデルによる定量化を行った。牧島他(2008)では電子温度、光学的厚みのどちらが増光時に変化しているかが分からなかったが、これにより、明るくなるにつれて、電子温度が下がり、光



**図 2: 数秒のタイムスケールで変動するブラックホールからの X 線の強度変動。「すざく」に搭載された CCD 検出器で時間分けを行い、硬 X 線検出器で得られた。**

学的厚みが上がり、明るさのピークに達した瞬間に電子温度が急激に上がることがわかった。これは、ブラックホールにものが落ち込む最後の瞬間になんらかの加熱が起こっていることを示唆する初めての結果で、2013 年 4 月 4 日に理化学研究所からプレスリリースを行った。

冷たい円盤と高温のコロナの共存のメカニズム、ブラックホールジェットとブラックホールスピンや降着流の関係など、謎はまだ多く残されているが、次の 10 年で、次期 X 線衛星 ASTRO-H や世界初 X 線偏光衛星 GEMS の登場により、謎が飛躍的に解明されていくと期待でき、本申請で、現存する高感度かつ広帯域の衛星「すざく」をもちいて新しい知見が得られたことで、次の一歩への足がかりを得た。自身も、ASTRO-H 衛星、精密

X線分光装置の検出器の開発や試験、次世代の衛星に向けて超伝導遷移端X線検出器の開発にも貢献してきた。

その他、ブラックホール連星のように明るい天体を解析する上で、X線 CCD に起こるパイルアップを扱いには注意を要し、軌道上での明るい天体を系統的に解析し、CCD イベントのグレード分岐比(電荷のピクセル分布)と明るさの関係や、スペクトルへの影響を半経験的にまとめあげて論文にし、その他の世界ユーザーのためにも汎用のソフトウェアを構築し、誰でも使えるように公開することも行ってきた。このようなソフトウェアは「すざく」衛星に限らず、ASTRO-H 衛星に置いても使う事が可能である。

国内外からは、「すざく」衛星と用いた時間変動と広帯域のブラックホール研究では一定の評価を得た。ギリシャでのX線天文学の50周年の国際会議で口頭講演、プラハでのブラックホールの専門家だけが集う国際会議でも口頭講演、国内のALMAのブラックホール研究会でも招待講演をした。ASTRO-H衛星のブラックホール観測のサイエンスチームのサブリーダーとして、海外と日本の研究者を先導する役目を円滑に行う事ができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

##### (1) [査読有]

Yamada, S., Makishima, K., Done, C., Torii, S., Noda, H., Sakurai, S.  
Evidence for a Cool Disk and Inhomogeneous Coronae from Wide-band Temporal Spectroscopy of Cygnus X-1 with Suzaku  
2013, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.65, No.4, 80  
DOI : 10.9093/pasj/65.4.80

##### (2) [査読有]

Yamada, S., Negoro, H., Torii, S., Noda, H., Mineshige, S., Makishima, K.  
Rapid Spectral Changes of Cygnus X-1 in the Low/Hard State with Suzaku  
2013, The Astrophysical Journal Letters, Volume 767, Issue 2, L34, 5  
DOI : 10.1088/2041-8205/767/2/L34

##### (3) [査読有]

Yamada, S., Torii, S., Mineshige, S., Ueda, Y., Kubota, A., Gandhi, P., Makishima, K.  
(他3名)  
Highly Ionized Fe-K Absorption Line from Cygnus X-1 in the High/Soft State Observed

with Suzaku

2013, The Astrophysical Journal Letters, Volume 767, Issue 2, L35, 6  
DOI : 10.1088/2041-8205/767/L35

##### (4) [査読有]

Yamada, S., Uchiyama, H., Dotani, T., Tsujimoto, M., Katsuda, S., Makishima, K., (他7名)  
Data-Oriented Diagnostics of Pileup Effects on the Suzaku XIS  
2012, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.64, 3, 53, 12  
DOI : doi:10.1093/pasj/64.3.53

[学会発表](計3件)

##### (1)

Yamada, S., Suzaku Wide-band and Temporal Analysis of Cygnus X-1: inhomogeneous coronae and cool disk, "Prague Synergy 2013", Prague, Czech, 25-29 November (2013)

##### (2)

山田真也、「ブラックホール連星のX線観測の現状とALMAへの期待」, "ALMA ワークショップ「ALMAで探るブラックホール高エネルギー現象」", 国立天文台、東京都、2013年9月25-26日

##### (3)

Yamada S., Inhomogeneous coronae and a stable disk of Cyg X-1 revealed with Suzaku  
HALF A CENTURY OF X-RAY ASTRONOMY, Mykonos island, Greece, 17-21 Sep. 2012

[その他]

山田真也、嶺重慎、根来均、牧島一夫、(他2名)、プレスリリース、理化学研究所、2013年4月4日

「ブラックホールに落ち込む最後の1/100秒の解明へ ガスが最後に放つ高エネルギーX線を初めて捉えた」

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山田 真也 (Shinya, Yamada)

独立行政法人理化学研究所  
仁科加速器研究センター  
基礎科学特別研究員  
研究者番号 : 40612073