

広帯域X線観測で挑むBHの謎

—冷たい円盤と非一様なコロナの共存—



山田 真也

〈独立行政法人理化学研究所玉川高エネルギー宇宙物理研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1 RIBF棟4F〉
e-mail: yamada@crab.riken.jp

ブラックホール連星の研究における残された大きな謎の一つは、エディントン限界光度の数%以下で実現する「ハード状態」における、激しく変動する硬X線放射の解釈である。1970年代から研究されており、「円盤-コロナ」描像が提唱されてはいるが、詳細はよくわかっていない。「すぎく」衛星により広帯域な詳細観測が可能になり、特定のモデルに依存しない独自の解析手法を組み合わせることで、われわれはさまざまなタイムスケールで変動する成分を同定することに成功した。その結果、ハード状態の広帯域スペクトルは、ハードとソフトなコンプトン放射、降着円盤からの放射、反射成分等の副次的な成分に分解できることがわかった。さらに、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。これらは、ブラックホールの周りに、冷たい円盤と非一様なコロナが存在し、質量降着率が下がるにつれて、降着円盤が徐々にブラックホールから遠ざかると考えることで自然に解釈できる。冷たい円盤と高温のコロナの共存のメカニズムなど、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や世界初の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している。

1. ブラックホール連星の未解決問題

私たちはX線観測衛星「すぎく」により、ブラックホール(BH)連星「はくちょう座X-1(Cyg X-1)」を観測し、「約100万度(～0.1 keV=0.1キロ電子ボルト)の幾何学的に薄い低温円盤(標準降着円盤)と、約10億度の高温コロナがBH周囲に共存し、質量降着率が増えるとそれらの重なる領域も増える。」という新しい知見をBH研究に加えることに成功した。これは、「すぎく」衛星に搭載されている軟X線(0.5-10 keV)を撮像観測するCCD検出器(XIS)と、硬X線(10-600 keV)を高感度観測する硬X線検出器(HXD)の両検出器と、私たちが独自開発した時間変動解析方法を組

み合わせることで得られた成果である。

一つのBH連星をじっと見ている、明るさや色(スペクトル)は空に浮かぶ雲のように時々刻々と変化する。その多様性の中から、普遍的な観測事実を紡ぐ作業が私のBH研究である。BH研究の歴史は長くて奥が深いので、今回の成果を正確に(かつ高校生にもわかるように)伝えるのは至難であるが、研究背景から発見に至る経緯までを平易に書き連ねるよう努力したつもりである。論文には書かれていない試行錯誤に多くの時間を費やしたので、この過程も同じように過去の蓄積が多い研究に挑んでいる誰かの参考になればと思います、伝わるように心がけたつもりである。全体を通して、私のバイアスがかかっているし、過

去の研究の引用が不十分な点もあると思われるが、ご容赦いただければ幸いです。

1.1 ブラックホール研究の始まりとその魅力

1971年、小田 稔先生は、ウフル衛星でCyg X-1からのX線の激しい強度変動を発見し、BHの可能性を示唆された¹⁾。この時代が、X線によるBH連星研究の始まりと言ってよいだろう。その後の可視光等の観測により、Cyg X-1はBH連星であることがほぼ確立された。Cyg X-1のようなBH連星は、恒星と連星系をなし、星のガスが重力エネルギーを獲得しつつBHへ落ち込み、高温になり、X線を放出する。このような基本的な描像は、すでに小田先生の1977年のレビュー論文の中で、今の私たちのイメージに近いものが出来上がっており、私のような新参加者はとても驚くのである²⁾。

私は小田先生とお会いしたことは一度もないが、小田先生がMIT時代に同じ職場だったJeffrey McClintock (BH連星のレビュー論文³⁾ などで有名、通称Jeff) のもとで私が2カ月ほど共同研究していたとき、Jeffが「小田はとても有能で、日本人離れた国際人だった。」と懐かしげに語っていたのが印象に残っている。ちなみに、JeffはBH研究をもう40年以上もやっているのだが、情熱は今でもすさまじく、1週間は8日あっても足りないどばやいていて、(アメリカ人なのに) 土曜日も職場にきていた。私の滞在中も、「週末は暇だろうから議論にこないか」と親切に誘ってくれた。

小田先生やJeffに限らず、今でも多くの人が熱心にBH研究を行っている。その理由の一つは、「BHはその存在自体が不思議で、それを知らうと観測すればするほど新しい謎に出会う」ことであろう。去年も、「すぎく」でCyg X-1を観測した際に、初めて鉄のHe-likeの吸収線(～6.7 keV)がくっきり見えて、共同研究者と「これはめずらしい」と盛り上がり論文にした⁴⁾。ほかにも、突発的な増光や減光、予期せぬフレアやスペクトル変動、強力なジェットの噴射など、さまざまな

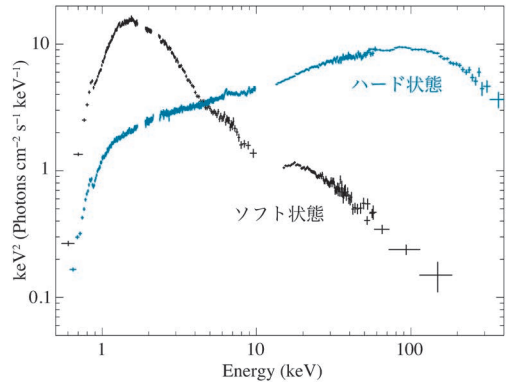


図1 典型的なBH連星Cyg X-1の「すぎく」スペクトル。縦軸は νF_ν 形式と呼ばれ、光子スペクトルにエネルギーの2乗を掛けたもの。星間吸収は除いてないが、検出器応答は除いている。～10 keV以下で卓越している放射を示すほうがソフト状態(黒)で、～100 keV付近でピークをもつのがハード状態(青)。0.5-10 keVがXIS (CCD) 検出器、10-60 keVがHXD-PIN検出器、50-300 keVがHXD-GSO検出器のスペクトルである。

新しい表情を見せてくれる。

1.2 二つのスペクトル状態—ソフトとハード

大別すると、BH連星は、質量降着率に依存して、「ソフト状態」と「ハード状態」の二つの状態を行き来する。図1に、「すぎく」によって得られたCyg X-1の二つの状態の広帯域スペクトルを示した。このように二つの状態があることが観測的にはっきりと示されたのは、日本の「はくちょう」衛星の観測による1982年のNature論文である⁵⁾。「はくちょう」衛星の名の由来はCyg X-1であるから、その名にふさわしい素晴らしい成果だと思う。

ソフト状態のスペクトルは、卓越した軟X線放射(≤10 keV)と、ソフトな光子指数(～2.5)をもち～1 MeV近くまで伸びるパワーロー的な放射からなる。この状態は、エディントン光度の～10%以上の光度のときに見られ、ハード状態よりも質量降着率が高いときに見られる。この卓越した軟X線放射は、幾何学的に薄く光学的に

厚い標準降着円盤からの黒体放射の重ね合わせ⁵⁾で記述できることがほぼ確立され⁶⁾, 円盤の内縁半径は最終安定軌道 (BHスピンのときは $3 R_s$, 最大回転BHで $0.5 R_s$ になる. R_s はシュワルツシルト半径) まで伸びていると考えられる⁷⁾. 一方, 折れ曲がりのないパワーロー成分のほうはいまだに確立した解釈はなく, 謎のままである.

ソフト状態よりも 10 keV 以下が暗くなり, エディントン光度の数%になると, スペクトル全体がハード (光子指数 ~ 1.7) になることから「ハード状態」と呼ばれ, これは1970年代から気球実験で研究されてきた⁸⁾. ハードなスペクトルが約 100 keV 付近で折れ曲がりを示すことから, 標準降着円盤の低エネルギー光子が, 高温電子雲 (コロナ) により逆コンプトンされるといふ, 「円盤-コロナ」モデルが提唱された⁹⁾. このコロナのことを円盤と呼ぶ人に出会うこともあるが, X線では, 幾何学的に厚い高温の円盤のことはコロナと呼び, 標準降着円盤と区別する.

この約 100 keV の電子雲はどこからくるのであろうか. 電子を無限遠からBHに落としたときに電子が獲得するエネルギーは, $GM_{\text{BH}}m_e/3 R_s = m_e c^2/6 \sim 85 \text{ keV}$ 程度と見積れる (M_{BH} はBH質量, G は万有引力定数, m_e は電子の質量, c は光速). 陽子は電子との質量比だけ高いエネルギーになるので, 数百 MeV 程度のエネルギーをもつ. 密度が十分に高ければ陽子と電子の温度は同じになるが, ハード状態では質量降着率が低いため, 電子と陽子は異なる温度をもつ2温度プラズマが形成されていると考えられている. 電子は放射で冷え, 陽子とのクーロン散乱や自分自身の移流によって加熱され, それらのバランスで温度が決まる. 逆コンプトン放射は, “光子加速”とも考えられ, 光子が自分よりエネルギーの高い電子に何度も散乱されることで加速され, スペクトルはベキ状に高エネルギーまで伸びる. 電子と同程度のエネルギーに至ったところで加速が終わり指数関数的に急速に減衰する. このように, 硬X線スペ

クトルのピークから, 電子の温度を測定できるのである. 一方, 陽子の温度を測定することは今のところできていない. もし何らかの方法で測定できれば (例えば, π 中間子崩壊のガンマ線), 降着流のエネルギー収支や粘性の起源の解明につながるであろう.

1.3 ハード状態の進展—「すぎく」の時代—

従来から考えられてきた「円盤-コロナ」モデルは過去の観測とおおむね矛盾しないが, 円盤やコロナの具体的な幾何, 数秒からミリ秒のランダムで激しい強度変動の起源¹⁰⁾, 種光子がどこからくるのか, そもそもコロナの起源や円盤とコロナが共存できるのか, など基本的なことさえまだよくわかっていない. 理由は, 約 0.5 keV (円盤放射) から約 300 keV (逆コンプトン放射) の広帯域にわたり, 高感度で観測することが難しかったためである. これを実現できたのが, 2005年に打ち上げられた「すぎく」衛星である.

前述の謎を解明すべく, 私たちは広帯域高感度を誇る「すぎく」衛星をもちいてCyg X-1を観測し, XISおよびHXDのハードウェアメンバーとサイエンスメンバーで構成される「すぎく」Cyg X-1解析チームが総力を結し, 約2年間にわたる解析および議論を経て, 「円盤-コロナ」モデルで約3桁にわたる広帯域かつ高感度のスペクトルをほぼ初めて再現することに成功し, 論文にまとめた (牧島+08¹¹⁾). 「円盤-コロナ」の素性も明らかになり, コロナは極めて非一様な光学的厚み $\sim 0.4\text{--}1.5$ をもち, 降着円盤は事象の地平線からやや (\sim 数十 R_s) 離れていることもわかった.

1.4 縮退するモデルたち—フィットからの卒業—

ところがその後, 同じ「すぎく」のデータを用いて, 私たちの「円盤+非一様なコンプトン描像」とは別の解釈が現れた. ジェットモデル¹²⁾ や相対論的効果を強く受けたモデル¹³⁾ などである. ほぼ同じスペクトルを複数のモデルで再現できてしまうということは, 「データの特徴的な構造数<モデルの自由度」という状況になっている

ためである。個々のモデルの詳細は省くが、図1のスペクトルを見るだけでも、ハード状態は全体的に構造が少ないことから、モデルの縮退が起きやすい状況が理解していただけるのではないだろうか。

ところが、相対論的に広がった鉄輝線を主張する研究者の中には、いささかバランス感に欠ける主張が見られる。例えば、広がった鉄輝線を見いだしたい4-7 keV付近をフィットからいったん外して、その他の範囲を適当な連続成分で合わせた結果、4-7 keVに残差が生じる。その残差を「相対論的に広がった鉄輝線の証拠」と主張するのである。元々のスペクトルの形が上に凸の場合が多いため、4-7 keVでは必ず正の残差が得られてしまう。多くの場合、仮定が結論になりやすいのである^{14), 15)}。さらにこのような論文では、他の可能性を棄却できないことが十分に論じられておらず、「自説が観測結果に合致するから正しい」という数学的には十分条件しか得られていないにもかかわらず、必要十分であるかのように断定することが多い。一研究者としては、そういう議論をできるだけなくし、モデルによらない研究を心がけたい。

極端な主張には違和感を感じずにはいられないが、現状のスペクトルだけから一意的な解を得るのは難しいということは客観的な事実である。そこで、私たちはさまざまなモデルでスペクトルをフィットすることからはいったん卒業し、何か別の手がかり探すことにした。

2. スペクトル成分の探査

2.1 発見の前兆—わずかな凹み—

牧島+08の解析をしていたときのことである。当時私はまだ修士2年で、指導教官の牧島先生や先輩の高橋弘充さんにいろいろと教えてもらいながら、解析をしていた。この論文で私たちは、速い強度変動の解明のため、高い統計をもつXIS (CCD) データを用いて $\Delta t=1$ 秒で強度を判別

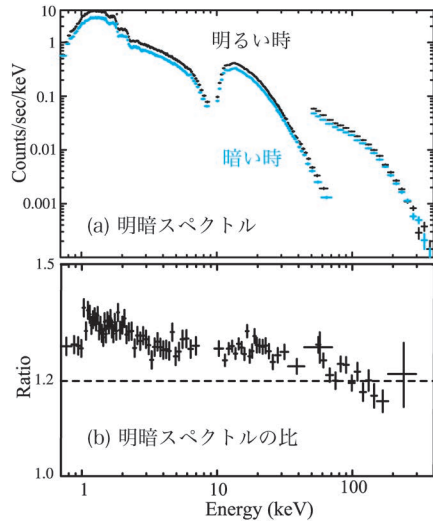


図2 (a) 1秒で明るいとき(黒)と暗いとき(青)のスペクトル、ただし検出器応答込み。(b) (a)のスペクトルの比。点線は比が1.2のところを示しているため、全体的に20%ほど明るくなり、 ~ 1 keV以上ではソフトになり ~ 1 keV以下で凹んでいることがわかる。

し、より統計の低いHXDデータまで含めて明暗を決定し、明暗それぞれの状態でのスペクトルを集積する「強度判別分光法」を考案し、 $\Delta t=1$ 秒でスペクトルの変動を調べることができた。

得られた明暗のスペクトルおよびそれらの比を図2に示した。全体的に、スペクトルの比が、やや右肩下がりになって見えるのは、BH連星は、明るくなるとややソフトになるという傾向があり、それが見えているためである。特に鉄輝線付近で構造が見えないのは、 ~ 1 秒のタイムスケールでは、鉄輝線を含む反射成分が、直接成分に追従して変動しているためと考えられる。私はこれを見て、過去の観測と大差ないと思った。ところが、牧島先生は違ったのである。このスペクトル比の ~ 1 keV以下がわずかで凹んでいて、しかもその凹み方がかなり急峻であることに違和感を感じておられた。私はこの凹みが検出器由来などでないかどうか、いろいろな角度から調べた。

大概のBH連星研究者は「ディップの恐怖」と

いうのを一度は味わっているであろう。これは、伴星からの降着ガスで視線方向がふさがれて、低エネルギー側のフラックスが急激に減少（ディップ）することで、これを除いて解析しないと、真のスペクトル変化と見誤ってしまうのである。このディップの可能性も検証したが、それでは説明できなかった。その他、検出器由来の可能性も検討したが可能性は見当たらなかったため、 ~ 1.2 keV以下の不思議な凹みは謎のままであった。ただ、私にはこのときに謎の凹みについていろいろな検証をしたことがかなり強く記憶に残った。

2.2 変動しない成分の正体—冷たい円盤—

3年後、私は博士論文のための解析をしていた。「すぎく」は明るさが異なるハード状態の Cyg X-1 を 25 回観測していた。あとは解析するだけと思われる読者も多いと思うが、Cyg X-1 のように明るい天体ではまだいくつか問題が残っていた。XIS 検出器 (CCD) はパイルアップと言って、二つ、三つの光子を一つと見なしてしまう現象が起こるので、これを適切に扱う必要がある。そのため、このパイルアップの較正¹⁶⁾や、判定する自動化ツールを作製した。また、「すぎく」に搭載された GSO シンチレーター検出器 (50–600 keV) のエネルギー較正も必要で、それも行った¹⁷⁾。

このように解析の準備を整え、「すぎく」が観測した Cyg X-1 の全 25 観測の解析を始めた。まずは 25 観測中、軟 X 線で最も明るい時期に注目した。長期的 (\geq 日) なタイムスケールでの変動を調べるため、最も明るい時期の平均スペクトルを、数日以上離れて観測された最も暗い時期の平均スペクトルで割った比スペクトルを作成した。それを図 3 に青で示してある。全体的に右肩下がりであるが、 ~ 3 – 4 keV で折れ曲がっているように見える。次に、短時間 (1 s) の変動を調べるため、「強度判別分光法」を適用し、1 秒での明暗のスペクトルの比を取ったところ、くっきりと ~ 2 keV 以下の凹みが現れたのだ。これを図 3 に黒

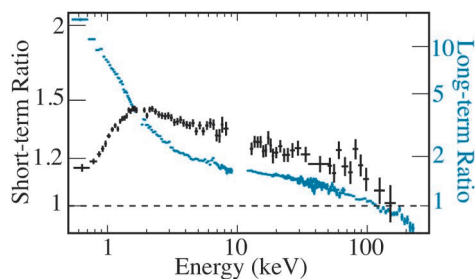


図3 最も明るいハード状態の長期 (\sim days) と短期 (1 s) のスペクトル変動. 1 秒での明暗スペクトルの比 (黒). 長期で明るいハード状態のスペクトルと、暗いスペクトルとの比 (青). どちらも ~ 10 keV 以上ではソフト化の傾向が似ているが、 ~ 10 keV 以下では大きく異なる。

いスペクトルで示した。このときは、自分で自分のプロットに驚いたのをよく覚えている。そのあと落ち着いてさまざまな検証をしたが、これは天体由来以外では説明できないことがわかった。

このような変動がはっきり見えたのは、観測的に初めてである。しかし、どのようにこの発見を活用するかは簡単ではない。このようなときに先人の研究はとても参考になった。1984年の満田ら⁶⁾では、「てんま」衛星による中性子星の観測で、時間変動しない成分を仮定して、中性星の放射を表面の黒体放射成分と円盤成分に分離した。私もほぼ同様な発想で、変動する成分としない成分が ~ 2 keV 以下にあると仮定することで、変動しない成分のスペクトルの形状を抽出することに成功した。図 4 の青い点線で挟まれた範囲が、1 秒で変動しない成分であり、これが図 4 の青い実線で示した、温度が ~ 0.2 keV の降着円盤モデルと一致したのだ。この結果は、降着円盤は確かに存在し、それは数秒のタイムスケールでは変動しないことを示している。降着円型の温度は 0.2 keV、内縁半径は $\sim 10 R_g$ で、過去の観測とも矛盾はない。このようにスペクトルフィットに依存せずに降着円盤の存在を示す結果を得たのは今回が初めてである。

同様に、牧島+'08 で用いた観測データか

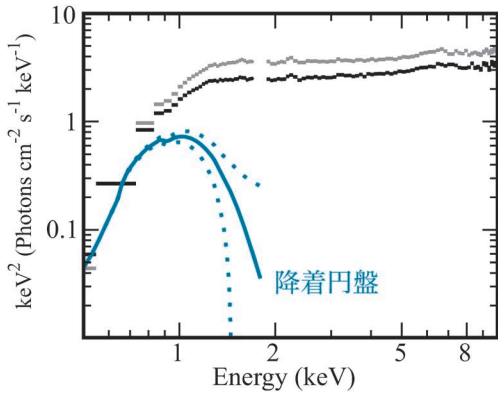


図4 明るいハード状態(図3と同じ観測)で抽出された変動しない成分(青点線で囲まれた領域)と~0.2 keVの降着円盤モデル(青線). 明るいとき(グレー)と暗いとき(黒)のスペクトルも示した.

らも変動しない円盤成分の抽出に成功した. こうして, 2.1節で見た謎の凹みは, 変動しない円盤が存在するためだと確定した. さらに, Cyg X-1の全25観測に同じ手法を適応することで, Cyg X-1が明るくなるにつれて, 円盤の温度が高くなり, 内縁半径が小さくなることもわかった.

2.3 変動する成分の正体—非一様なコロナ—

こうして, ハード状態には低温 (~0.2 keV)の降着円盤があることは間違いないことがわかった. ほかの成分は何であろうか? ~100 keV付近の折れ曲がり, 約100 keVの電子雲によるコンプトン放射が存在する証拠であり, 光子指数が~1.5であるから, 光学的厚みは~1程度だと考えられている. ハード状態における硬X線放射を解釈するうえで, このハードなコンプトン放射の存在を疑う人はほとんどいない. 実際のスペクトルは, 2.2節で見いだした冷たい円盤とハードなコンプトン放射だけで再現できるだろうか? スペクトルから ~0.2 keVの円盤成分と, ハードなコンプトン放射を差し引いたところ, その二つだけでは説明できない成分が残り, それはハードなコンプトン成分よりはソフトで, 円盤よりはハードな形をしている. 牧島+'08では, スペク

トルフィットからこの成分を見だし, ソフトなコンプトン放射を考へて, 広帯域スペクトルを再現した. このソフトなコンプトン成分は時間変動から必要とされるであろうか?

図3の青のスペクトルは, 長期のスペクトル比である. 円盤放射は ~2 keV以下に集約されるので, それを種光子とするハードなコンプトン成分は ~2 keV以上でべき的な形をする. したがって, 2-5 keV付近の下に凸な形状は, 円盤とハードなコンプトン成分だけでは説明ができません. さらにほかの観測からも, 2-10 keV付近のスペクトルに, ならかな変化が見られた. よって, スペクトルフィットから得られた「冷たい円盤と, ハードとソフトなコンプトン放射」というスペクトル分解は, 長期, 短期の時間変動からも正しいということがわかった. 補足すると, ここでのハードとソフトのコンプトン放射は, スペクトルフィットの際に最低でも2種類のコンプトン放射が必要という意味であり, 実際に局在した2種類のコンプトン雲が存在しているという主張ではなく, 非一様なコロナが存在しているという解釈である.

では, ソフトなコンプトン放射以外の可能性は本当にないのだろうか? もしそうであれば, 時間変動に違いが見えてもよさそうであるが, 過去の観測からも2-200 keVはほぼ同期して変動することが知られており, 起源が大きく違うものが共存しているとは考えにくい. さらに, 硬X線は軟X線よりも遅れて変動するのだ (ハードラグと呼ばれている). BHからのジェット成分もX線帯域まで伸びてくることが知られているが, 典型的なジェットモデルでは, コロナで硬X線が明るくなり, それからジェット成分が明るくなるので, ハードラグを説明できない. 一方, コンプトンモデルは軟X線が叩き上げられて硬X線になるため, エネルギーの高い光子のほうが何度も散乱されてくるので, ハードラグを自然に説明できる. よって, 現在の観測データからはコンプトンモデ

ルが正しいと言ってよいだろう。

3. 新しいBH降着流の描像

3.1 暗いハード状態の軟X線超過成分

2.3節までの内容で博士号を取ることができて、その内容で投稿論文にしようと思っていたが、ポストクも何かと忙しいもので、あっという間に1年が経ってしまった。そこで2年目の7月に、1カ月ほどダラム大学の著名な女性BH研究者のChris Doneのところ滞在することにした。

Chrisとは学会や会議でしか話をしたことがなかったが、実際に現地滞在して議論するときの彼女は、いわゆる本気モードというのだろうか、これまでに聞いたことがない鋭いコメントをたくさんくれて、やはり現地で対面して議論することは大事だと思った。ダラム大学は、キャンパスの一部が世界遺産であるダラム城であり、Chrisの部屋の窓からはダラムの大聖堂（ハリポッターの魔法学校でもある）が見える。大学から道一つで美しい川が流れる森に迷い込めて、一瞬で自然の中に溶け込め、とてもよい研究環境である。

彼女が特に注目したのが全25観測の中で、光度がエディントン光度の～1%以下のときの観測であった。このような暗いときのスペクトルの比を図5に示した。図3のように～2 keV以下で、

短時間変動を示す黒いスペクトルに凹みが見えないのである。単純に考えると、円盤の温度が低くなり、放射が0.5以下に集約されているという解釈に行き着くかもしれない。しかし、それだけでは平均スペクトルを説明できないのである。図3と図5で用いた観測の時間平均スペクトルから、星間吸収（吸収量は過去の観測で～ $7 \times 10^{21} \text{ cm}^2$ とほぼ分かっている）を除いた場合の時間平均スペクトルを図6に示した。図6では～2 keV以下で、上にそり上がっている傾向が暗いハード状態でも見えている。つまり、暗いハード状態では、コンプトン放射とともに変動する～2 keV以下の軟X線の超過成分があると考えられるのである。

円盤と似たような帯域に見えるこの変動する放射は何であろうか？ Chrisから、近年ではエディントン光度の～1%の暗い状態が注目を浴びていることを知った。それ以上の明るい時期では、「明るくなるとソフトになる」傾向があり、過去に大量の研究がなされている。この傾向はハード状態でも共通だろうと思われていたが、最近の観測で、エディントン光度の～1%以下の暗い時期は、「明るくなるとハードになる」という逆の傾向があることがわかってきたのだ。全25観測を改めて眺めてみると、まさにエディントン

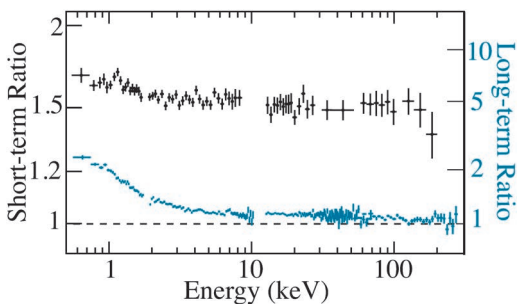


図5 図3と同じ形式で、軟X線で暗い時期のハード状態の短期と長期のスペクトル比。図3では、短期の変動スペクトル（黒）が～2 keV以下で下がるのに対して、この図ではほとんどフラットである。

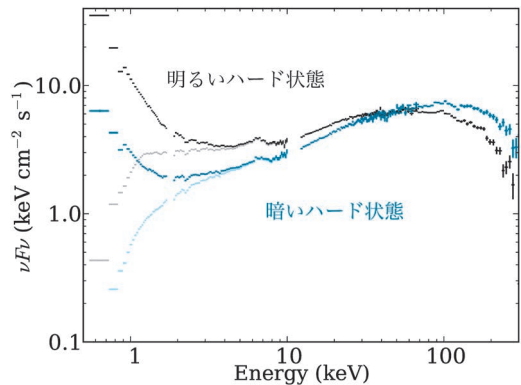


図6 明るいハード状態（図3）と、暗いハード状態（図5）の観測平均の νF_ν スペクトル。星間吸収を取り除く前のスペクトルは淡い色で示した。

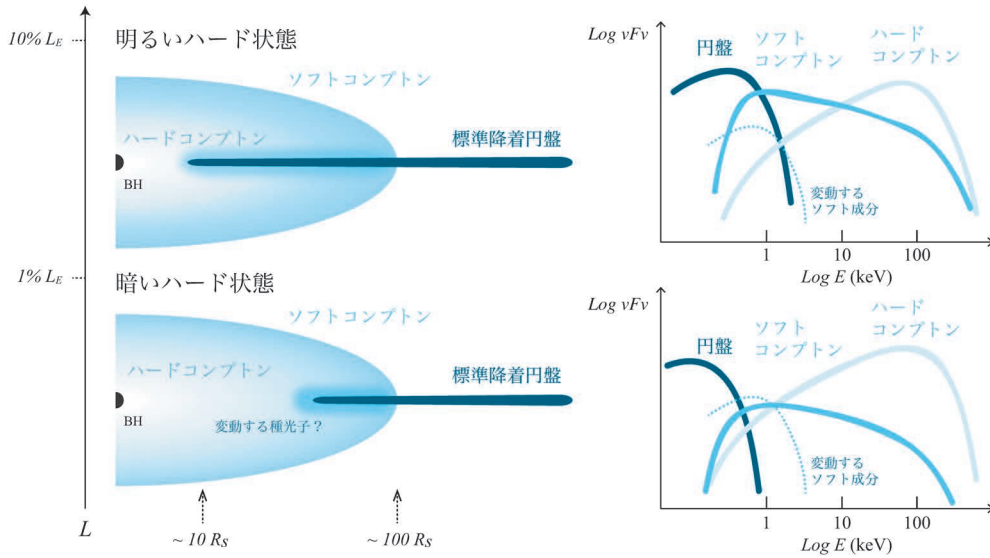


図7 明るいハード状態と暗いハード状態の降着流の描像（左）と、それらのスペクトルの概念図（右）。明るくなるにつれて、幾何学的に薄い降着円盤（標準降着円盤）が徐々にBHに近づき、コロナ（薄水色）に深く入り込み、ソフトなコンプトン成分もそれに追従して卓越する。（左図は、軸対称の降着流を4分の1に切断して、横からのぞいた状況である。）

光度の $\sim 1\%$ を境に、短時間のスペクトル変動の様子が変わっていた。このことから、エディントンの 1% 前後ではジオメトリや種光子の起源が異なる可能性が高く、それが図6における 2 keV 以下の超過に寄与していると考えられる。

3.2 ハード状態の階層性

最後に、今回の結果から得られた描像を図7にまとめた。エディントンの $\sim 10\%$ 程度に明るいハード状態では、円盤は $\sim 0.2 \text{ keV}$ の温度で、数十 R_g 程度までBHに近づく。一方、エディントンの $\sim 1\%$ 以下に暗くなると、円盤はやや温度が下がり、数百 R_g 程度までBHから後退していると考えられる。

では、ハードとソフトなコンプトン成分はどのように存在していると考えられるだろうか？ コロナがシングルゾーンの場合は、高エネルギー X 線ほど何度も散乱されるために、時間的になまされ、変動のタイムスケールは長くなると考えられる。しかし、観測はその逆で、エネルギーの高い光子のほうが低い光子よりも速く変動することが

わかっている^{18), 19)}。これは、「すぎく」の硬 X 線検出器のデータを使った鳥井+'12で、GSO 検出器 ($> 50 \text{ keV}$) のライトカーブの自己相関関数が、PIN 検出器 ($< 50 \text{ keV}$) よりも狭いプロファイル（短いタイムスケールに対応）をしていることではっきりとわかった²⁰⁾。基本的にBHでは、近づくほどさまざまなタイムスケールが速くなるため、ハードな放射のほうがBH近傍で発生していると考えると、エネルギーが高い光子のほうが速い変動を説明できる。よって、ハードな放射が内側で、ソフトな放射ほど外側で作られていると考えたと自然である。コロナの大きさは、変動のタイムスケールがかなり速いことから、 $100 R_g$ 程度までの広がりだと考えられる。それ以上に大きいと、変動がなまされてゆっくりになると考えられるからである。

図7（左）のように、コロナには円盤との共存領域があると考えられる。これは種光子の起源は円盤からの光子であると考えるのが最も自然であるからである。光度が下がる（＝質量降着率が下

がる)につれて、少しずつ円盤が後退していくと、外側で作られているソフトなコンプトン成分の量が減る。これは円盤からの冷たい光子が増えることで、ソフトなコンプトン成分の領域が増えていくと考えられるためである。ハードなコンプトン成分はより内側で作られるため、ソフトなコンプトン成分よりは、円盤との相関が弱いと考えられる。

3.1節で述べた円盤と似たような帯域で変動するソフトな成分の起源は、円盤と全く無関係とは考えにくいので、円盤の近くにある成分にちがいない。高温電子によるシンクロトロン光子はコンプトン成分と足並みをそろえて変動するため、エディントン光度の $\sim 1\%$ 以下では、種光子が円盤光子だけでなく、シンクロトロン光子が寄与している可能性もある。

4. まとめと今後の展望

「すざく」によるCyg X-1の観測により、エディントン光度の $\sim 10\%$ 以下で実現されるハード状態では、確かに冷たい(約100万度)標準降着円盤が存在し、それを非一様な高温(約10億度)コロナが円盤を取り囲んでいる様子が明らかになった。さらに、光度が下がるにつれて円盤が後退し、それに伴い、放射源の幾何も徐々に変化し、コロナと円盤の共存領域が減ることで、ソフトなコンプトン成分の量が下がることもわかってきた。

この結果は、一つのBH連星Cyg X-1についての結果であるが、ほかの天体も、同様の時間変動やスペクトルを示すため、Cyg X-1が特殊であるとは現時点では考えにくく、このような描像はBH連星全般に当てはまるものと考えられる。今後はほかのBH連星でも検証を進めていきたい。また、銀河の中心に存在する巨大BHでも、コロナがシングルゾーンではないという結果もあり²¹⁾、BH連星の研究が巨大BHのX線放射の理解にも役立つかもしれない。

これからの10年では、X線偏光観測が大きな切り札になるであろう。それも、時間平均した偏光度だけではなく、明るさやスペクトルの成分と偏光度、偏光角の時間変動の相関を見ることで、コロナのジオメトリーや大きさ、反射体の構造などがわかってくるであろう。これについては、ASTRO-H衛星のSGD検出器²²⁾や、世界初のX線偏光衛星GEMS²³⁾に大きな期待ができる。

また、多波長による同時観測もより重要になるであろう。特に、早い変動ほどBH近傍の放射に迫れるため、時間分解能がよい多波長観測が鍵になるであろう。BH連星研究に関しては、アメリカでは、X線、可視光、電波の連携が強く、新しいBH連星が発見されてから、フォローアップ観測に至るタイムスケールが極めて速い。日本は、アメリカにできないことを狙う視点は重要だと思うが、連携のよさは見習いたいところである。このようなBH連星は、われわれの天の川銀河には約20個ほど知られているが、そもそもどうやってBH連星が形成されたのかわかっていない。はじめから連星系をなしていたのか、孤立したBHが単独飛行中に恒星と偶然に出会って連星を形成したのか、いずれもよくわかっていないのである。

理論的な研究では、磁場(ガス圧と同程度であれば $\sim 10^5$ G程度は存在しうる)の効果を考慮した研究の進展が目覚ましく²⁴⁾、冷たい円盤と高温のコロナの共存がどのように解明されるか楽しみである。

観測家にできることは、さまざまな質量降着率のBHを観測し、「円盤-非一様なコロナ」の観測的特徴を明らかにすることである。ASTRO-H衛星は、硬X線ミラーを搭載するため「すざく」よりも感度が桁で向上する。それゆえ、サンプル数も桁で増えると予想される。また、世界最高のエネルギー分解能(~ 5 eV@6 keV)を実現するマイクロカロリメーターによって、鉄輝線のプロファイルがより詳細に見えることで、BH近傍の

反射体の構造や、コロナとの位置関係もわかって
くるであろう。今後の10年に期待して欲しい。

謝 辞

本稿は内容は、私の博士論文²⁵⁾ とその投稿論文²⁶⁾ による「すぎく」衛星のCyg X-1のハード状態の観測結果を解説したものである。指導教官の牧島先生には、辛抱強く時間をかけて指導していただいたことにたいへん感謝している。同期の湯浅孝行氏は研究全般を支援してもらい、後輩の鳥井俊輔氏と野田博文氏にはブラックホール研究ですさまじい協力を得た。「すぎく」衛星の検出器の制作に奔走した先輩たちが、打ち上げ後に加入した私にも惜しみなく多くのことを教えてくださったことに心より感謝している。京大の嶺重先生や千葉大の松元先生をはじめとして、多くの理論家方の支えも力となっている。

最後に、いろいろな方から、「人の真似ではなく、まだ誰もやってないことやろう。」という精神を教えてもらったことに感謝したい。そのようなことはなかなかできないものであるが、特定のモデルに依存しない解析というのはハードウェアも熟知している必要があるの、オリジナリティーを生みやすい領域だと思われる。今やハードウェアとサイエンスの両方のエキスパートになることが、困難な現実であることを受け止めつつも、それを何か賢い方法でこれからも維持できれば、日本のオリジナリティーの一つになるだろうと私は思っている。

参考文献

- 1) Oda M., et al., 1971, ApJ 166, L1+
- 2) Oda M., 1977, Space Science Reviews 20, 757
- 3) Remillard R. A., McClintock J. E., 2006, ARA&A 44, 49
- 4) Yamada S., et al., ApJL 767, 2, L35, 6

- 5) Ogawara Y., et al., 1982, Nature 295, 25, 676
- 6) Mitsuda K., et al., 1984, PASJ 36, 741
- 7) Makishima K., et al., 1986, ApJ 308, 635
- 8) Sunyaev R. A., Trümper J., 1979, Nature 279, 506
- 9) Liang E. P. T., Price R. H., 1977, ApJ 218, 247
- 10) Mlyamoto M., et al., 1989, Nature 342, 773
- 11) Makishima K., et al., 2008, PASJ 60, 585
- 12) Nowak M. A., et al., 2011, ApJ 728, 13
- 13) Miller J. M., et al., 2012, ApJ 757, 1, 11, 21
- 14) 牧島一夫, 山田真也, 2010, 天文月報103, 3, 186
- 15) Yamada S., et al., 2009, ApJL 707, 2, L109
- 16) Yamada S., et al., 2012, PASJ 64, 3, 53, 12
- 17) Yamada S., et al., 2012, PASJ 63, 3, 645
- 18) Negoro H., et al., 1995, ApJL 452, L49
- 19) Yamada S., et al., 2013, ApJL 767, 2, L34, 5
- 20) Torii S., et al., 2011, PASJ 63, 771
- 21) Noda H., et al., 2013, ApJ 771, 2, 100, 13
- 22) Takahashi T., et al., 2010, Proc. SPIE 7732
- 23) Black J. K., et al., 2010, Proc. SPIE 7732, 77320X
- 24) Oda H., et al., 2012, PASJ 64, 15
- 25) 山田真也, 2012, 博士論文 (東京大学)
- 26) Yamada S., et al., 2013, PASJ 65, 4, 80

Wide-Band Spectroscopy of Cygnus X-1 with Suzaku—A Cool Disk and Inhomogeneous Corone—

Shin'ya YAMADA

RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama
351-0198, Japan

Abstract: X-Ray studies of Cygnus X-1 using Suzaku in the low/hard were conducted in a model-independent manner. Variations on short (1-2 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. In view of the truncated disk/hot inner flow picture, these are respectively interpreted as emission from the truncated cool disk, a soft Compton component, and a hard Compton component. Long-term spectral evolution can be produced by the constant disk increasing in temperature and luminosity as the truncation radius decreases.