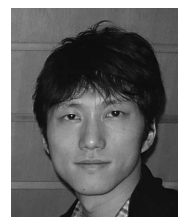


# 「すざく」が見たブラックホール連星 —激しい強度変動と広帯域スペクトル—



山田 真也

〈首都大学東京理学系研究科物理学専攻 〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1〉

e-mail: syamada@tmu.ac.jp

ブラックホール極近傍の約10億度の高温ガス（コロナ）は主にX線で輝くため、その明るさや色（波長）、それらの時間変化を調べることで、ブラックホールの極近傍のガスの流れを探ることができる。われわれは、代表的なブラックホール連星である「はくちょう座X-1（Cyg X-1）」をX線観測衛星「すざく」で観測し、約10億度のブラックホールコロナのパラメータが0.1秒以下で急激に変化していることを突き止めた。強度変動はいくつものピーク（ショット）をもつことが知られており、ショットをいくつも重ね合わせてX線光子をたくさん集めるという手法（「重ね合わせショット解析」）を適用した。「すざく」の硬X線検出器のGSOシンチレーターの較正を行い活用することで、初めて強度変動に伴うガスの温度変化の測定に成功した。この結果は、初めてガスがブラックホールに落ち込む際に、瞬間的な加熱が起こっている可能性を示唆した。今後、次期X線衛星「ASTRO-H」とX線偏光衛星の登場により、ブラックホールコロナの徹底解明が進むと期待される。

## 1. はじめに

今回、「すざく」の特集号という機会に、「すざく」のブラックホール連星についての記事を書く機会を与えていただけてとても光栄に思います。はじめに、少しだけ過去の天文月報の紹介をさせていただきます。2010年の牧島先生（当時東大）との天文月報の記事<sup>1)</sup>では、観測的にブラックホールスピンを決定する際の系統誤差の重要性を「すざく」で明らかにしたことを紹介しました。その後も、ブラックホールのスペクトルの連続成分を分析する研究が続き<sup>2)</sup>、世界的にもスピンを正しく決定しようという方向へと向かう潮流を作れたのではないかと考えています。2013年に私が書かせて頂いた天文月報の記事<sup>3)</sup>では、ブラックホール連星「はくちょう座X-1（Cyg X-1）」の「すざく」データを用いて、ハード状態と呼ば

れる質量降着率が低い状態において、低温円盤と高温コロナが共存状態にあることを紹介しました。これは、その後、京都の志達氏により、Cyg X-1以外のブラックホールからも同様の構造が見られ<sup>4)</sup>、円盤とコロナが共存状態にあるのはブラックホール連星に普遍的であることがわかってきました。少し補足ですが、ブラックホールのコロナは、幾何学的に厚く光学的に薄い“円盤”の意味で使われています。太陽コロナのように、球状のイメージではなく、ブラックホールを取り巻く分厚い円盤というイメージが近いです。（余談ですが、X線では「円盤＝標準降着円盤」と「コロナ＝分厚い高温の円盤」という使い分けが明確ですが、電波の分野では、「円盤＝コロナ」として使っているようです。他分野の人と話すときには、「円盤」の定義に気をつけるといいかもしれません。）

今振り返ると、これらの結果は、検出器の性能などから、ある程度は予想できた結果に当たるかと思えます。今回の特集号では、予想していたものでなく、「すぎく」の硬X線検出器のGSOシンチレーターでサイエンスをだせないかと、試行錯誤したことでえられた思いがけない結果について紹介したいと思います。そのほかにも、面白い成果が上がっていますが、テーマを絞るほうがよいかと思ひ、僭越ながら、私のGSO検出器とCyg X-1のお話を紹介させていただくことにしました。

## 2. 背景—激しい時間変動の謎—

ブラックホール研究の残された大きな謎は、円盤とコロナの共存時にみえる激しい強度変動<sup>5)</sup>です。これは、ブラックホール連星と巨大ブラックホールの両方で観測され、降着物質が間欠的にブラックホールに落下する際に重力エネルギーを解放するブラックホール特有な現象と考えられています。この“降着物質”の大きさや形などの基礎情報ですらわかっていません。これを解く鍵は、約100 keV (10億度に相当) 付近に見える硬X線スペクトルの折れ曲がりど、軟X線の微弱な反射光(鉄輝線など、6 keV付近)が、速い変動に伴いどのように変動するか明らかにし、降着物質の加熱や冷却時間と幾何を推定することです。

1994年に大阪大学(当時)の根來均氏(現・日大)は、「畳み込みショット解析」というX線スペクトルと強度変動を融合させた手法を考案し、ブラックホールにガスが落ち込む過程を、時間軸とスペクトルから解析できるようになりました(それまでは、フーリエ空間での解析が主でした)。そして、日本が開発したX線衛星「ぎんが」で観測したブラックホール連星を解析しました。その結果、特徴的なX線の短時間変動中に急激なスペクトルの変化があることを発見しました<sup>6)</sup>。また、1996年には、根來氏らのデータをもとに京都大学の研究グループがシミュレーションを行

いガスがブラックホールに吸い込まれていく様子を再現しました<sup>7)</sup>。しかし、当時のX線観測衛星に搭載されていた検出器では、高温プラズマの温度(約100 keV)を計測することができなかったため、観測できるエネルギー帯域が限られてしまい、ガスの温度変化など短時間変動に伴うブラックホール周辺の詳細な動態は不明のままでした。そのため、多くの研究者たちは、高感度でかつ広帯域をカバーできる宇宙X線観測衛星の実現を切望していました。

## 3. 研究手法

### 3.1 GSO検出器の較正

「すぎく」衛星は、XIS (CCD検出器) とHXD (硬X線) の二つの検出器を搭載しています。HXDは、東京大学、JAXA、広島大学、金沢大学、理化学研究所、青山学院大学、大阪大学、スタンフォード大学の研究者と総力を挙げて開発してきました<sup>8)</sup>。宇宙放射線の影響で、高い雑音(バックグラウンド)環境が避けられず、その中に埋もれている天体からのX線光子を1個ずつ丁寧に仕分け判別していくことが必要です。そのため、数々の工夫でバックグラウンドを極力抑えることで、感度よく天体からの信号を検出しています。主検出部は、シリコン検出器とGSOという結晶シンチレーターを用いています。天体からの硬X線のうち、より低いエネルギーのものはシリコン検出器によって、より高いエネルギーのものはGSOで検出します。

GSO検出器は、「すぎく」衛星の50-600 keVの帯域を担う検出器で、ブラックホールからの硬X線を検出するには、ほかの海外の検出器と同程度の性能があります。しかし、地上の試験のときと比べて、軌道上で検出器のエネルギースケールが変わったように見えており、検出器応答もそれにより変わったように見えていました。打ち上げ後、さまざまな調査が行われましたが、理由はすぐにはわかりませんでした。この辺りの事情は

国分氏（当時東大）のHXD論文で詳しく紹介されています<sup>9)</sup>。私は、(伝統に従い) この謎を解くことを修士論文のテーマにしました。再現性を見極めるため、川原田氏（当時東大）に指導をいただきながら、まずはフライトスペアの電気回路を用いて、上空環境を模擬した実験を行いました。さまざまな条件を試しましたが、なかなか手掛かりが得られませんでした。しかし、電源電圧を変更する実験を行ったところ、無信号時のベースライン信号が僅かに（20%程度）変化していることがわかりました。最終的に、原因は複合的であり、これが問題の重要な一部であることがわかるのですが、当時はまだ気がついていませんでした。

その後、さまざまなソフトウェアや、軌道上、地上試験のデータを調べましたが、手掛かりは得られませんでした。年末になっても全く手掛かりが得られないため、上空でシンチレーターの光電子増倍管の電圧を変更するオペレーションをすることにしました。国分氏（当時宇宙研）と中澤氏（当時東大）とともに、2007年の大晦日の前後だったと思いますが、相模原の運用室で特殊運用を行いました。その後、このような特殊運用は一度も行われなかったため、今となっては思い出に残るエピソードとなりました。このときに得られたGSOシンチレーターのスペクトルが図1です。通常では、GSOシンチレーターは600 keV付近までが最大のエネルギーレンジですが、ゲインを1/3倍に下げたため、1.8 MeV付近までのGSOスペクトルが取得できました。

これにより、バックグラウンドスペクトルに含まれる放射化の輝線（エネルギーが既知）を、異なる電圧値で取得することができました。ところが、予想に反して、何も新しい情報が見いだせませんでした。しかし、何か前提となる量が違っているのではないかと、という方向へと思考を向けさせてくれました。その結果、いままで放射化のエネルギーとして用いていたのは、電子と光子を合

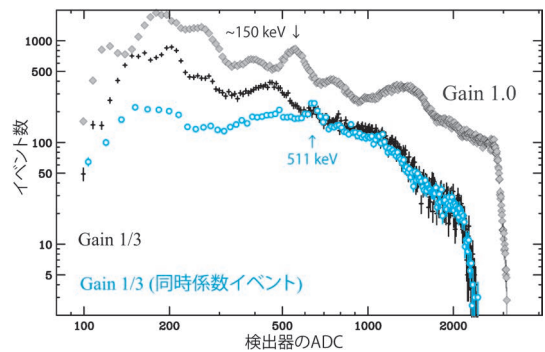


図1 GSOのゲイン下げオペレーションにより得られたバックグラウンドスペクトル。ゲインを1/3倍にしたことで、約1.8 MeVまで取得ができた。

算したトータルのエネルギーでしたが、GSOシンチレーターの中では電子と光子では発光量が異なるため、エネルギーではなく、シンチレーターの光量で換算してエネルギー較正を行うことが必要であることに気がつきました。GSOシンチレーターの光子応答は北口貴雄氏（当時東大）、電子応答は内山泰伸氏（当時宇宙研）が何年も前に定量化していたので、光量の計算はすぐにできました。この効果と、電源電圧の変化の両方を考慮すると、地上試験のエネルギー較正の結果とピタリと一致して、打ち上げ後、2年半かかって、やっと謎が解けました。

新しいゲインスケールを使って、渡辺伸氏（宇宙研）らが開発したHXDのモンテカルロシミュレーター（simHXD）のパラメータや、軌道上のキャリブレーションを行い、検出器レスポンスを更新し、こうして全ユーザーが正しいGSOのスペクトルを得られるようになりました<sup>10)</sup>。

### 3.2 「すざく」と「重ね合わせショット解析」

さて、ブラックホールの話に戻りたいと思います。ブラックホールのガスは10億度（100 keV）以上と超高温であることが知られているため、「すざく」衛星に搭載された検出器の中で、最も高いエネルギーのX線を捕らえられるGSOシンチレーターが不可欠でした。「すざく」の硬X線

検出器チームは、衛星の打上げ前、そして打上げ後も何年もかけて検出器の性能や応答を調べることで、世界最高レベルの感度で、ブラックホールの温度を測定できるようになりました。とはいえ、世界には、GSOと似たような感度の検出器をもつ衛星（INTEGRAL）などが健在で、どうすれば「すざく」でユニークな結果が出せるか思案していました。その当時は博士課程3年の夏でした。「すざく」のGSOシンチレーターの売りは、感度の高さで、ほかの衛星よりも短い時間で統計の良いスペクトルが得られることでした。明るさの判定をうまく行い、HXDデータの仕分けができればひよっとしたら勝機があるのではないかと直感的に思っていました。

明るさの判定をするには、高い光子統計が必要です。通常のXIS検出器の時間分解能は、早くても1秒ないし2秒です。「すざく」のCyg X-1の広帯域スペクトルの解析<sup>11)</sup>では、1秒での変動スペクトルを調べたところ、スペクトルがややソフトになっていることがわかりましたが、電子の温度と光学的厚みのいずれかが変わっているかわかりませんでした。そこで、当初はまだほとんど使われていなかったXISのCCD検出器のタイミングモードを用いて強度を判別することを提案し、幸いなことにその提案が認められました。

実際に観測をしてみると、非常にきれいな激しい時間変動が観測できました。図2に示すような、軟X線帯域で数秒を切る変動が、きれいに検出できました。Cyg X-1は非常に明るいので、タイミングモードであってもパイルアップが起こるレベルであったり、HXDとの時刻ずれがあったり、いろいろと較正をしました。このような経験を通じて、XISチームの方々とも交流できたことは良い経験になったと思います。

「すざく」の感度が優れているといっても、一つのショットだけでは光子の数がありすぎ、十分な結果が出せません。いくつものショットを重ね合わせる必要があります。根来氏が開拓した

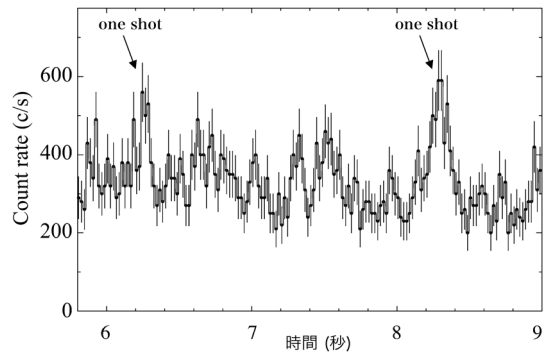


図2 「すざく」のXIS検出器のPsumモードが捕らえたX線強度の時間変化（約4万秒の観測のうち、3秒間だけを拡大表示）。全部で約4千個のショットを検出、これらを集積して統計を上げる。

「重ね合わせショット解析」を「すざく」で適用するために、XISのタイミングモードで取得したライトカーブを用いて強度判別し、HXDデータに適用することにしました。解析は、標準的なツールではできないため、解析ツールを自分で構築しました。このような時空間の手法よりも、周波数空間でのパワースペクトルのほうがよく用いられていると思います。周波数空間の解析は汎用ツールもあり簡単ですが、位相をつぶしてしまっているため、パワースペクトルと位相を両方使わないと情報が半分失われてしまいます。かといって、位相を見れば良いかということ、位相を見ても何だかよくわからないことが多いと思います。そのような場合でも、時空間で見ると、現象を直感的につかみやすく（その分、FFTに比べると数学的な完全性を犠牲にしているわけですが）、それが真実の断片をより早く見つけ出す可能性を秘めているともいえます。こうして、必要なデータと解析環境の準備が整いました。

#### 4. 得られたブラックホールの結果

「ぎんが」のエネルギー帯域は、約60 keVまででした。「すざく」は、GSOシンチレーターによって、50–200 keVまでのデータが取れる点で、

何か新しい兆候が見えるのではないかという期待はありました。ソフトウェアを書き上げて、「重ね合わせショット解析」を「すざく」のCyg X-1データに適用したところ、PIN検出器（60 keV以下）では、明るさのピークのときに、急激に暗くなっていくことがわかりました。X線強度は、1秒よりも短い時間で明るくなり、暗くなります。約1秒は、ブラックホール半径の数百倍に相当します。この変動は「ぎんが」衛星でも見えていました。GSOシンチレーターのデータは、統計が悪いため、最初にははっきりとはわかりませんでした。PIN検出器の変動とは少し異なるように見えました。間違いでないか検証するために、さまざまな解析をしました。本当に検出器由来ではないことを見極めるうえで、GSOシンチレーターの較正に携わり、検出器をよく理解していたことは役立ったと思います。その結果、100 keV以上のエネルギーをもつX線のほうが、より急激に変化していることがわかりました。これは、思いがけない発見でした。エネルギー帯域を伸ばしても、低エネルギー側の延長線上にくることも多いのですが、今回は、100 keV以上で初めて違いが見えたのです<sup>12)</sup>。

図3に、得られた時間変動を示しました。理論的には、時刻0のときがガスがブラックホールに飲み込まれる瞬間に対応していると考えられ、ガスが重力エネルギーを最も効率よく開放するために明るくなります。時刻が負のときは、ガスがブラックホールに近づく、時刻が正のときは逆にガ

スがブラックホールから遠ざかることを意味しています。図4にその概念図を示しました。この明るさの変動は、「ぎんが」衛星でも見えていました。

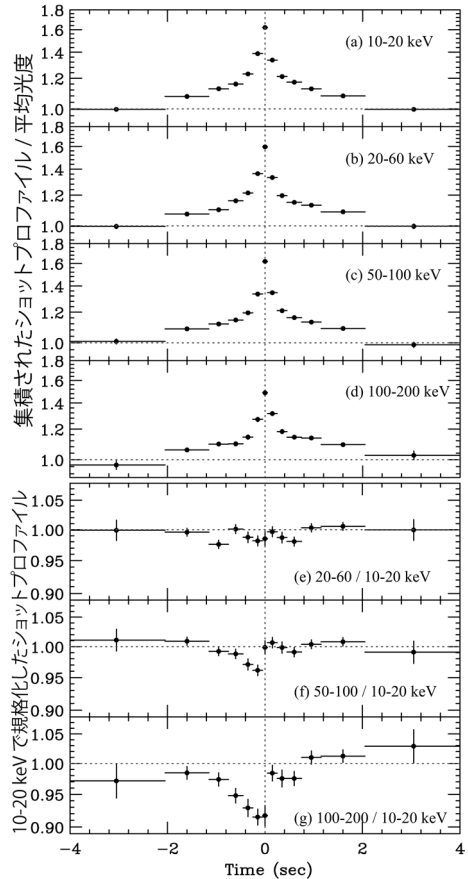


図3 畳み込んだショットのプロファイル。(a) 10-20 keV, (b) 20-60 keV, (c) 50-100 keV, (d) 100-200 keV。それらを10-20 keVで割り算してハードネスにしたものが、(e)-(g)。100-200 keVで急激な変化が起きていることがわかる。

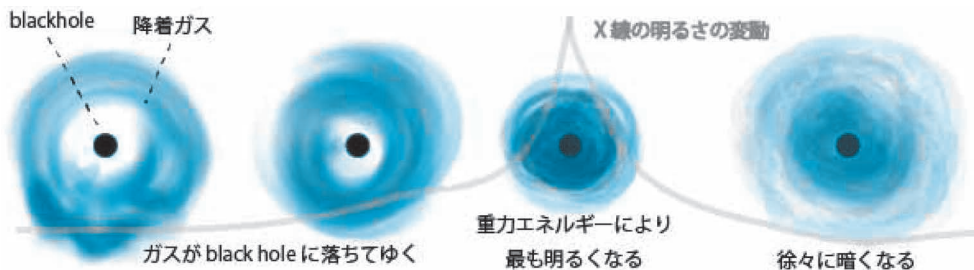


図4 理論的な解釈の概念図。ガス降着によりX線強度が上がり、ピーク後はガスの散逸により暗くなる。

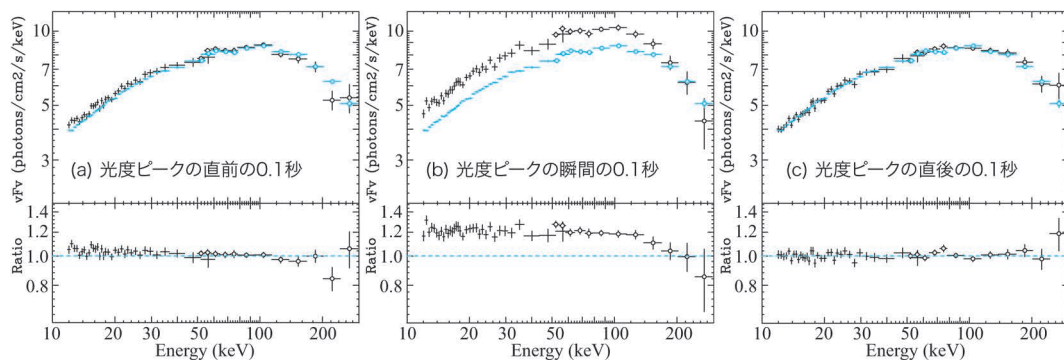


図5 上段は、黒いスペクトルが短時間のスペクトルで、青線は時間平均スペクトル。下段は、平均スペクトルとの比。(a) 明るさのピークの0.1秒前のスペクトル。(b) 明るさのピークの瞬間。(c) 明るくなった後の0.1秒。

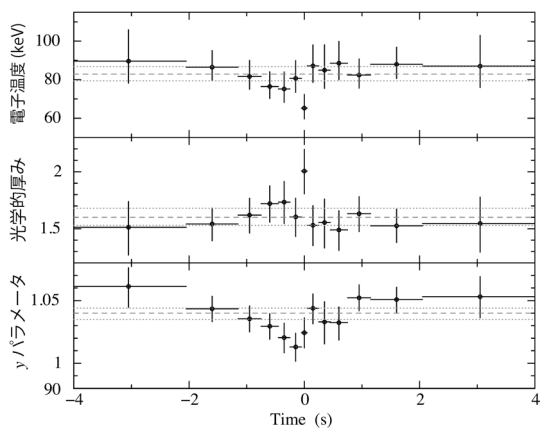


図6 スペクトルフィットから得られた物理量の時間発展。上から順に、電子温度、光学的厚み、 $\gamma$ パラメータ。時刻0付近(=明るさのピーク)で、パラメータが変化している。薄い横線は、平均スペクトルの値とそのエラー。

次に、このような時間変動がスペクトル空間でどうなっているのかを見ました。スペクトルの傾きは、コンプトンの $\gamma$ パラメータ(光学的厚みと電子温度の積)で決まるため、スペクトルの傾きだけからは両方を区別できません。スペクトルを見ると、100 keV以上のスペクトルのカットオフの変化がきれいに観測できて、電子温度が下がっていることが初めて観測的にわかりました。図5に得られたスペクトルを示しました。三つのスペクトルは、明るさのピークの0.1秒前、ピーク時、0.1秒後に対応しています。後段は平均スペ

クトルとの比です。ピークの瞬間に、カットオフの位置がきれいに下がっています。これは、スペクトルの傾きではなく、カットオフ、つまりは電子温度が変化していることためです。

これを定量化するために、時間でスライスしたスペクトルを、コンプトンモデルで定量化し、電子温度、光学的厚み、 $\gamma$ パラメータが時々刻々どのように変化しているかを調べました。その結果を図6に示しました。電子温度が下がり、光学的厚みは上昇し、コンプトンの $\gamma$ パラメータは、ピークの直前まで下がり、ピーク直後に上昇しています。このように明るさのピークに至る過程で、徐々にパラメータが変化し、ピークの瞬間にパラメータが急激に変化することは、何らかの時間的な非対称性を生み出す物理が背後にあると考えられます。また、ピークの瞬間に何らかの電子温度を変化させるようなメカニズムも必要になります。

今回、新しくわかった観測結果をまとめますと、明るさがピークに達したときに、ガスの温度は下がり、その直後に温度が上がっていることです。この結果から、物質は単に静かにブラックホールに落ち込んで消えるのではなく、何らかの理由で冷却され、ブラックホールに落ち込む最後の瞬間に加熱される、という不思議でダイナミックな挙動を示すことがわかりました。

## 5. ま と め

今回、「すざく」のGSOシンチレーターの較正を行い、HXDとXISのタイミングモードを最大限に活用することで、ブラックホールの電子温度の急激な変化を発見した例について紹介しました。さらなる発見に向けて、私たちは「すざく」衛星の性能をはるかに上回る次期X線衛星「ASTRO-H」衛星を打ち上げるべく研究開発を進めています。また、私がポストドク時代にお世話になった理化学研究所では、世界初の偏光衛星の実現に取り組んでいます。日本が大きくかわるこれらの将来衛星によって、ブラックホールについても飛躍的に解明が進むと期待されています。

例えば、ブラックホール近くでの加熱メカニズムについては、太陽コロナに見られるような磁気リコネクションによる加熱や、星が爆発するときなどに見られる衝撃波加熱などと似た現象ではないかと考えられています。これを解明するには、より高感度の観測装置（衛星）や、これまでになかった偏光という情報が切り札になります。ガスがブラックホールに消える瞬間の高エネルギー放射は、散乱や反射により偏光が生じ、その情報から高温ガス塊の形状や密度などに制限がつけられ、ブラックホール近傍物理を解き明かす手掛かりになると考えています。

### 謝 辞

検出器の制作に貢献し、私に多くのことを教えてくださった方々と「すざく」に心より感謝しています。少しずつでも恩返しできるように精進していきたいと思えます。

## 参考文献

- 1) 牧島一夫, 山田真也, 2010, 天文月報, 103, 186
- 2) Noda H., et al., 2014, ApJ 794, 2
- 3) 山田真也, 2014, 天文月報, 107, 214
- 4) Shidatsu M., et al., 2014, ApJ 789, 100
- 5) Oda M., 1977, Space Science Reviews 20, 757
- 6) Negoro H., Miyamoto S., Kitamoto S., 1994, ApJ 423, L127
- 7) Manmoto T., et al., 1996, APJL 464, L135
- 8) Takahashi H., et al., 2008, PASJ 60, 69
- 9) Kokubun M., et al., 2007, PASJ 59, 53
- 10) Yamada S., et al., 2011, PASJ 63, 645
- 11) Yamada S., et al., 2013, PASJ 65, 80
- 12) Yamada S., et al., 2013, APJL 767, L32

### **Suzaku View on Black Hole Binaries —Rapid Variability—**

**Shin'ya YAMADA**

*Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Osawa,  
Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan*

Abstract: X-ray studies of Cygnus X-1 using *Suzaku* are presented. We have studied rapid spectral changes in the hard X-ray on a time scale down to  $\sim 0.1$  s by applying “shot analysis” technique to the *Suzaku* observations of the black hole binary Cygnus X-1, over the energy range of 10–200 keV with the *Suzaku* HXD-PIN and HXD-GSO detector. We found that the spectral change is more prominent in energies above  $\sim 100$  keV, implying the existence of some instant mechanism for direct heat production.