

「すざく」衛星による Holmberg IX X-1 での
鉄吸収線の発見

天体物理若手夏の学校

福井県東尋坊温泉三国観光ホテル

2012.8.1~4

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

牧島・中澤研究室

小林翔悟

牧島一夫、中澤知洋、野田博文(東大理)、磯部直樹(ISAS/JAXA)

1.Black Hole (BH)の種類

BH は現在主に質量で 2 種類に分類される。

- 5~20 M_{\odot} の恒星質量 BH (Cygnus X-1 , GX339-4 , etc)
- $10^4\sim 10^9$ の巨大質量 BH (NGC4151 , etc)

みての通り、 $10^2\sim 10^3M_{\odot}$ の中間質量に対応する BH が未だ未確認であり、はたして本当に存在しないのか非常に疑問が残る。BH の進化を考える上でも非常に重要な要素となるこの中間質量 BH の候補として考えられているのが Ultra Luminous X-ray Source (ULX) である。

2.Ultra Luminous X-ray Source (ULX)とは

ULX とは、1980 年代に発見された X 線で異常に明るい天体である。系外渦巻き銀河の腕の部分に主に存在し、その明るさは、 $1M_{\odot}$ の BH のエディントン限界光度（球対称な天体で、その放射圧と重力が釣り合う光度。理論的な光度の限界値。） $\sim 10^{38}$ erg/s を大幅に超える $\sim 10^{39}\sim 10^{40.5}$ erg/s にまで達する。これまでの観測から、この天体の正体が BH であることはわかってきたが、主に

- エディントン限界光度程度で輝く中間質量 BH
- エディントン限界光度を大幅に超えて輝く恒星質量 BH

の 2 つの解釈があり、未だ決着がついていない。そこで、その決着への足掛かりとして、ULX のスペクトルを他の典型的な恒星質量 BH 連星のそれと比較することで、BH 連星との共通点や相違点を見て行く。今回は ULX の一つである Holmberg IX X-1 (Hol.IX X-1) に着目し、その「すぎく」の公開データを解析した。

3.Holmberg IX X-1

Hol. IX

渦巻き銀河 M81 の伴銀河。不規則矮小銀河で距離は ~ 3.6 Mpc である。星形成が活発に起こっていると考えられている。

Hol. IX X-1

Hol. IX に付随する ULX。周りに X 線で明るい天体がなく明るい($3\sim 6 \times 10^{39}$ erg/s/cm²)。

他衛星による過去の観測

「あすか」 1999 $\sim 7.6 \times 10^{39}$ erg/s (0.5-2.4 keV)

SAX and ROSAT 1998.6.5 $\sim 3 \times 10^{39}$ erg/s (0.5-2.4 keV)

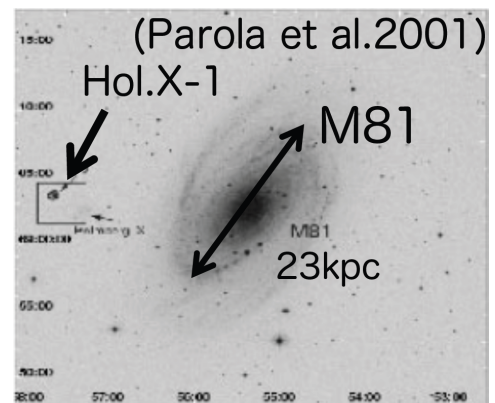


図 1:可視光と X 線画像を重ねたもの

(Parola et al.2001)

4.Hol.IX X-1 の「すぎく」による観測

今回、周りに明るい X 線源がないことから、長時間観測を行うことで XIS+HXD による 0.5-40 keV の広帯域スペクトルが得られると期待され Hol.IX X-1 が、「すぎく」による観測の対称に選ばれた。今回の観測は exposure ~150 ks の観測で、観測期間は 2012.4.13-17。ただし、キャリブレーションが間に合わなかったため、今回扱うのは XIS による 0.5-10 keV のデータのみである。

i) 光度曲線

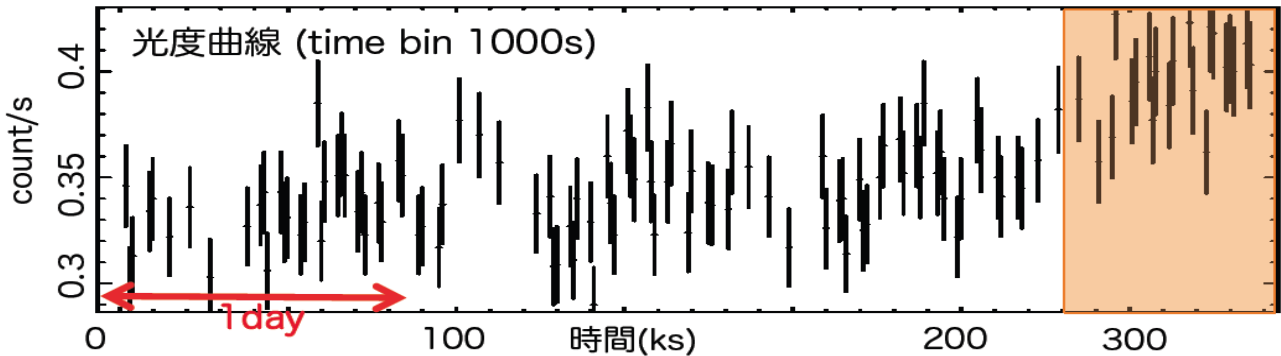


図 2: 「すぎく」による観測の光度曲線。観測の最後の方で増光が見られる。

上図は今回の観測の XIS の光度曲線である。統計的に非常に恵まれた観測で、観測前半は一様におおよそ平坦であるが、280 ks 以降からおおよそ 20% の光度の上昇が見えた。

ii) 全時間スペクトル

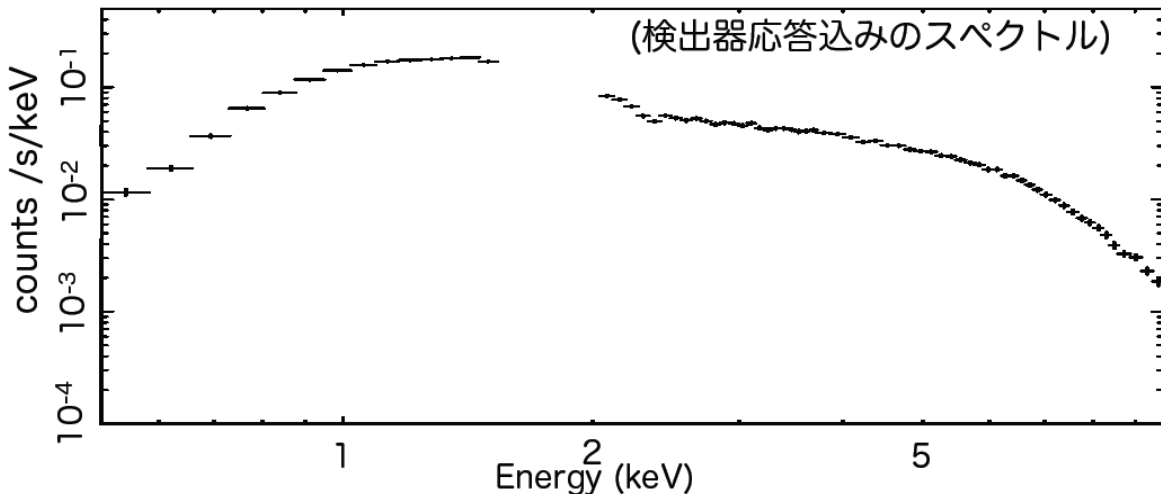


図 3: 今観測の全時間スペクトル。これに BH 連星で典型的なモデルを適用しフィットする。

上図は検出器応答込みの全時間スペクトルである。これを BH で用いられる典型的なモデルでフィットする。具体的には降着円盤からの黒体放射モデルと、その円盤付近にある高温な電子による逆コンプトン散乱のモデルの組み合わせである。フィットした際のパラメータから、この天体がこのとき BH 連星のどの状態に対応する状態にあり、またどのように異なるかを見て行く。

iii) フィット結果

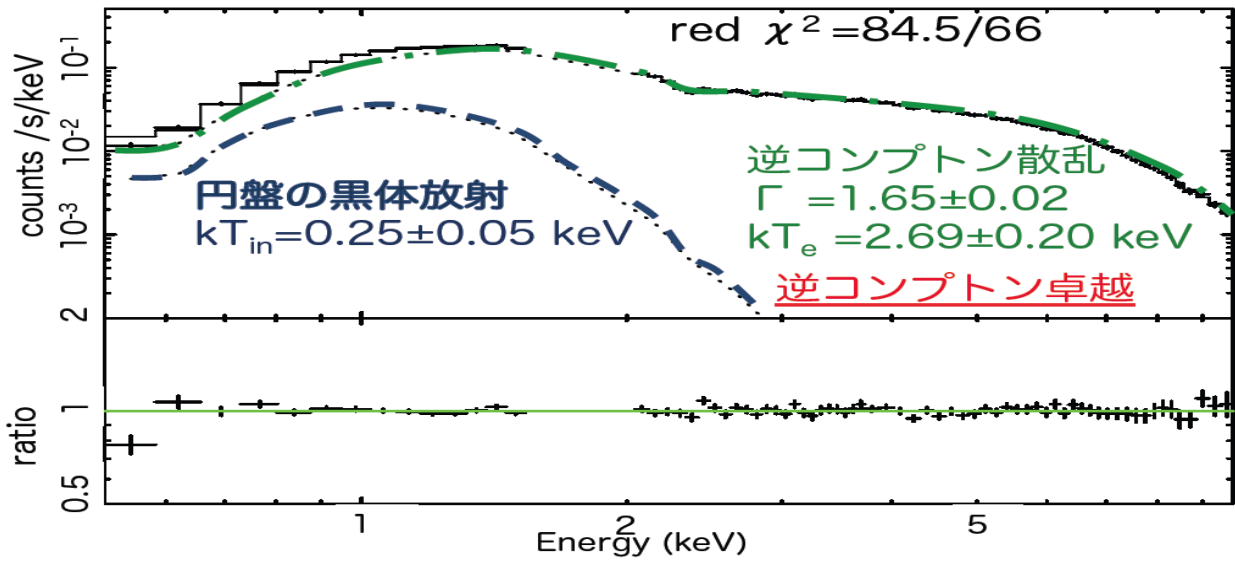


図 4: 全時間スペクトルのフィット結果。

図 4 はフィットした結果である。統計量が大きいにも関わらず、よく再現できていることがわかる。これを見るとわかるように、逆コンプトン散乱の成分が円盤からの黒体放射の成分よりも卓越していることがわかる。それぞれのパラメータは、

kT_{in} : 降着円盤の最内縁温度。

Γ : 逆コンプトン散乱の光子指数。

kT_e : コロナの電子温度。スペクトルの高エネルギー側の折れ曲がりを与える。

を表す。光子指数 Γ は 1.65 となっていて、スペクトルがハードであることを示している。光度 L は $L = 1.3 \times 10^{40}$ erg/s (0.5-10 keV) となっていて、ULX の典型的な光度の範囲内である。これは $100M_{\odot}$ の BH のエディントン限界光度に相当する。過去の観測と比べて中間程度の光度にあることがわかった。

iv) 光度増加前後での変化

次に、ii) の光度曲線で光度増加が見られたことを述べたが、その前後でスペクトルがどのように変化したかを見るため、増光時(図 1 で 280-340 ks の領域)と、それ以外の時間帯のスペクトルで比をとった。それを以下に示す。

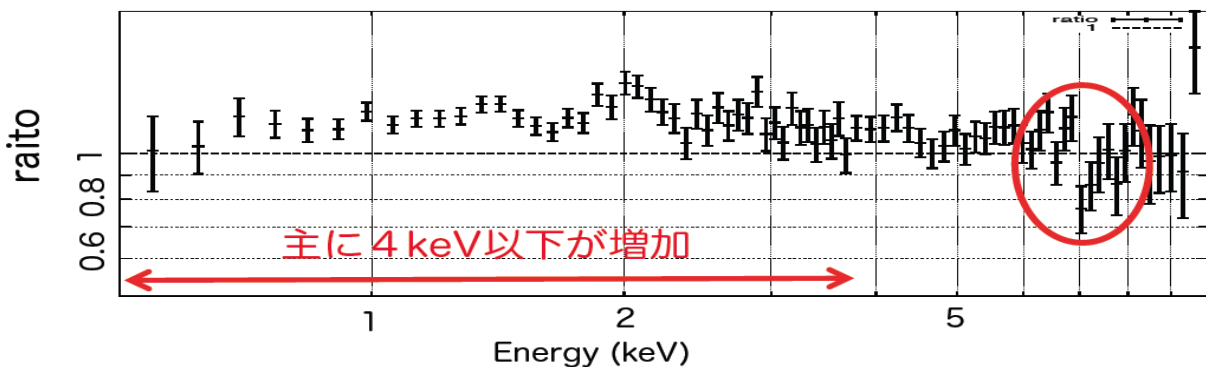


図 5: 増光時と平常時のスペクトル比。7 keV 付近に構造がうかがえる。

これを見るとまず 4 keV 以下の成分が全体的に増加しているのがわかる。増光分のほとんどがこの帯域で占められている。大きな変化はここだけのように見えるが 7 keV 付近をよく見てみると、増光時のスペクトルが平常時のスペクトルに比べて細い帯域で減光しているのがわかる。これは、増光時のスペクトルのこの帯域に何かしらの構造があることを示唆している。そこで、増光時の時間帯のみを取り出し、再度同じモデルを用いて解析を行った。

v) 増光時のスペクトル

増光時の時間帯を先ほどのモデルで再フィットした結果を図 6 に示す。 χ 二乗値をみると改善されているのがわかる。パラメータを見てみると、最内縁温度が若干上昇し、スペクトルが若干ソフトになりはしたが、コンプトン散乱の成分が卓越しているという状況に変化はない。最内縁温度が上がっていることから、4 keV 以下のスペクトルの増加は、円盤成分の増加によるものだとわかる。光度 L は $L=1.4 \times 10^{40}$ erg/s (0.5-10 keV) であり、増光が確かに確認された。

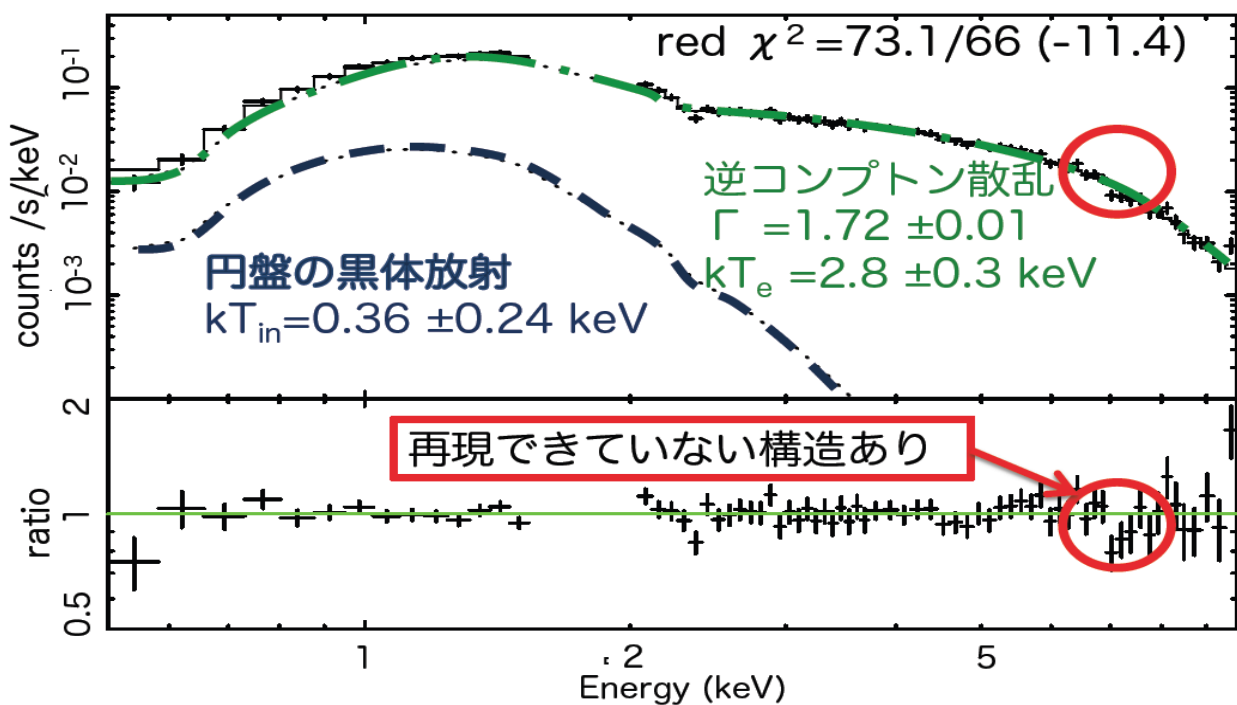


図 6: 増光時のスペクトルを全時間スペクトルのときと同じモデルでフィットした結果。

7 keV 付近に再現できていない吸収線らしき構造が見える。

次にモデルとの比 (図 6 下) をみると、先ほどへこみが見られた 7 keV 付近に、今のモデルでは再現できていない構造があることがわかる。これを吸収線と考え、現在のモデルにこのエネルギー付近にピークを持つ吸収線のモデルを加えて再フィットを試みた。その結果を次に示す。

vi)吸収線を加えた結果

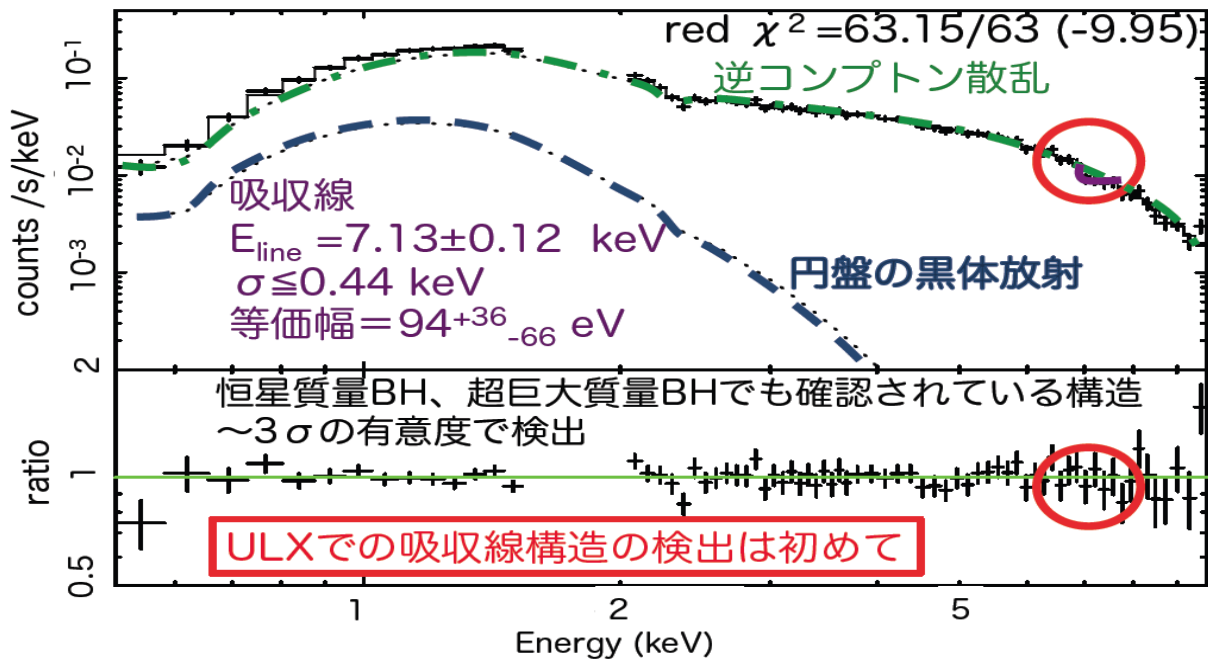


図 7:先ほどのモデルに吸収線を 7 keV 付近に加えて再フィットした結果。見ての通り、 χ^2 乗値が改善していることがわかる。吸収線の検出は ULX では初めてである。

吸収線を加えた結果、 χ^2 乗値はさらに改善された。この時の黒体放射成分、コンプトン散乱成分のパラメータ値は誤差の範囲内で一致した。一方吸収線のパラメータは、エネルギー中央値 E_{line} が 7.13 keV となっている。これを青方偏移した He-like Fe K- α (静止エネルギー 6.69 keV) による吸収線と解釈すると、これは吸収体が視線方向に $1.5\text{-}2.5 \times 10^4$ km/s で運動している、すなわち out flow による円盤からの質量放出が起きていることが示唆される。今回は 3σ の有意度でこの吸収線構造を検出することに成功した。ここで強調したいのは、このような青方変移した吸収線構造は他の BH 連星や活動銀河核でも観測されている構造であるが、ULX でのこのような吸収線構造の検出は初めてであることである。この吸収線構造は個人的に非常に興味深いものと考えており、これから先の追解析、及び追観測に期待したい。

5. 恒星質量 BH 連星のスペクトルとの比較と議論

以上から、今回の「すざく」の観測で得られた、Hol.IX X-1 のスペクトルの大まかな性質は理解できた。次にこれを他の典型的な恒星質量 BH 連星のスペクトルと比較し、共通点と相違点から、この天体の物理的な解釈を与えたいと思う。

そこで、まずは典型的な恒星質量 BH 連星でみられるスペクトル形状とその特徴を見て行く。以下に示すような特徴を恒星質量 BH 連星が持つことを念頭に Hol.IX X-1 との比較を進めて行きたい。図 8 に恒星質量 BH 連星がとるスペクトル状態と、その形状、構成成分を表した概略図を示す。恒星質量 BH 連星多くは、その質量降着率の変化といった物理

状態の変化に伴い、そのスペクトルの形状はおおまかに3つにわかれた状態間を時間経過とともに行き来することが知られている。

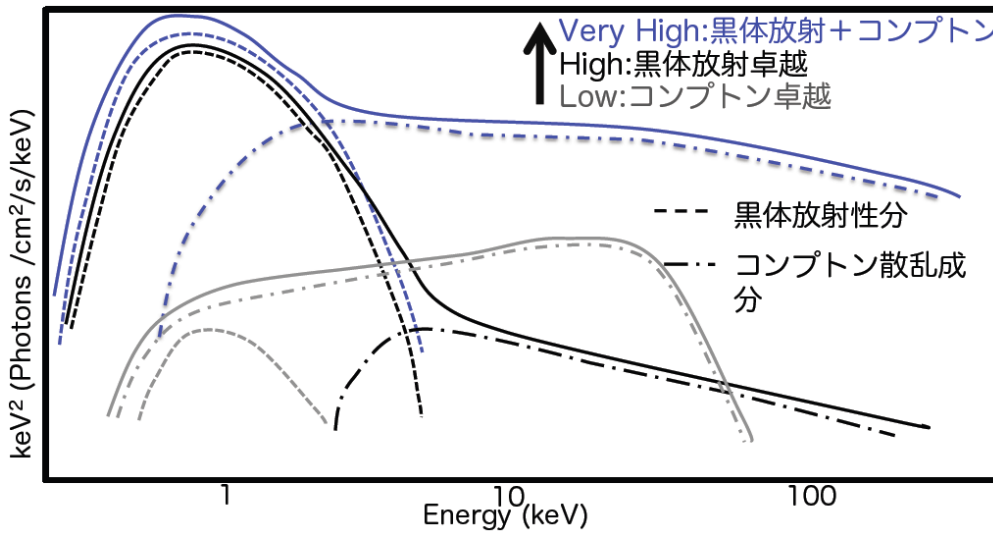


図 8: 恒星質量 BH 連星のそれぞれの状態でのスペクトル形状の概略。

物理状態の変化でこのようにスペクトル形状が変化する。

降着率が低く、エディントン限界光度の数%以下の光度のとき、スペクトルはコンプトン散乱の成分が大きく卓越した形状を取る。これを Low State という(灰)。そこから降着率が上昇して行き、エディントン限界光度の 10%以上の光度になると、Low State で卓越していたコンプトン散乱成分は消失して行き、円盤の黒体放射性分が卓越した High State となる(黒)。さらに降着率が上昇し、エディントン限界光度付近まで光度が上昇すると、消失したコンプトン散乱成分が復活し、円盤の黒体放射成分とコンプトン散乱成分を組み合わせたような形状となる。これは Very High State(青)とされている。

以上をふまえて、Hol.IX X-1 のスペクトルを比較してみる。図 9 上に示すのは、Hol.IX X-1 の検出器応答を解いたスペクトルにエネルギーの二乗をかけたもの(νF_ν プロット)である。コンプトン散乱が卓越したハードなスペクトル形状をしていることから、まず考えられるのが Low State である。しかしながら、Low State は先述したように降着率、光度がともに低い状態である。降着率が上昇したために光度が上昇し、放射圧が効き始め、質量放出による吸収線が顕在化したと考え、Low State ではこの吸収線の説明が困難である。そこで考えられるのが、Low State と同様コンプトン散乱の成分がそれなりに存在する Very High State である。

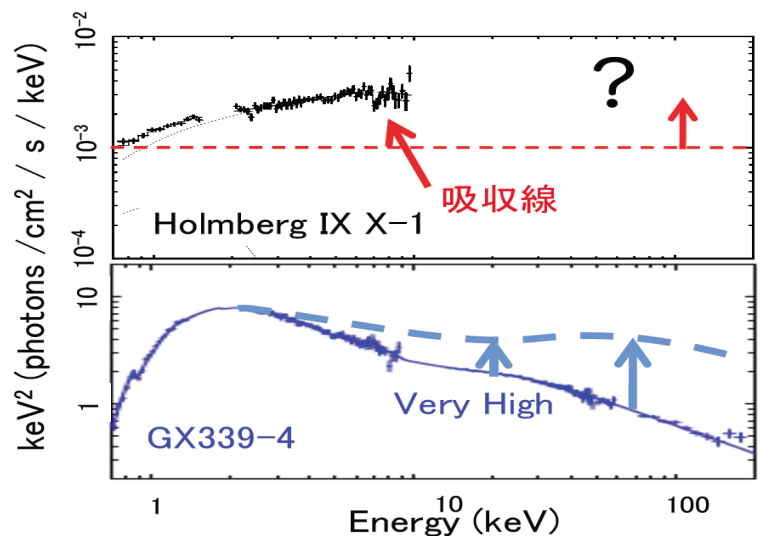


図 9: 今回の観測での Hol.IX X-1(上)と BH 連星 GX339-4(下)の Very High State での νF_ν スペクトル

図9の下側は典型的なBH連星であるGX339-4のVery High Stateのスペクトルである。見てわかるように、今回のHol.IX X-1のスペクトル形状とは大きく異なる。これを説明するものとして、コンプトン散乱tailの極端化を考えた。降着率が通常のVery High Stateよりもさらに高くなることで逆コンプトン散乱がさらに活発になり、コンプトン散乱成分のtailが図に表したようにさらに卓越してきたのではないかと解釈できる。すなわち、Very High Stateよりも降着率が上の状態の存在を示唆しており、このように考えれば、増光時での吸収線の発生の議論と辻褃をあわせることが出来る。これを確かめるには10 keV以上のスペクトルが必要である。なぜなら、スペクトル形状にLow Stateとの違いが顕著に現れるのが10 keV以上の帯域だからである。しかしながら、ULXは系外天体であるため、この帯域の信号は非常に弱く、この帯域を担う「すぎく」の検出器、Hard X-ray Detector(HXD)の感度でも信号を検出することは困難である。事実、ULXは数十個確認されている中、HXDで信号を有意に検出した例はわずか数例にとどまっており、いずれも30 keV程度までである。今回キャリブレーションが間に合わなかったため、HXDのデータは解析できていないが、図9上に赤の破線で書かれたHXDのおおまかな検出限界をみると、HXDでスペクトルを得ることは十分可能であると考えられる。また、今回の観測は途中段階であり、今秋さらに追観測が行われる予定である。これにより統計量がさらに稼げるため、これからの解析に期待がかかる。また、さらに先の話となるが、2014年打ち上げ予定の次世代X線天文衛星ASTRO-Hに搭載される、硬X線検出器Hard X-ray Imager(HXI)は、HXDよりも二桁よい感度を持つ。これにより、10 keV以上の信号の検出が格段に容易となり、Hol.IX X-1、ひいてはULXの広帯域スペクトルを得ることが出来る。これにより、BH連星との比較が進み、ULXの謎を解き明かす大きな突破口となることが期待される。

参考文献

- [1]Kazuo Makishima et al. 2000 ApJ 535 632
- [2]Naoko Tsunoda et al. 2006 PASJ 58 1081
- [3]Manami Tamura et al. 2012 ApJ 753 65
- [4]La Parola, V., Peres, G., Kim, D.~W., Bocchino, F. 2001 ApJ 556 47