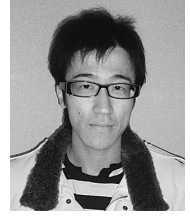


静穏状態における X 線連星の スペクトルの物理的解釈と降着の描像



永 江 修

〈広島大学大学院理学研究科物理科学専攻 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉
e-mail: nagae@hep01.hepl.hiroshima-u.ac.jp

明るい X 線連星はエネルギー・スペクトルの精度が良いため、その物理的解釈が進んできています。しかし、エディントン光度の 0.1% 以下の X 線連星のスペクトルは一般的に精度が悪く、詳細な解析がほとんど行われていません。そこでわれわれは、光度が低い天体におけるスペクトルの物理的解釈を得たり、降着の描像を探るため、エディントン光度の 0.01% 以下にある X 線連星 4U 1700+24 を「すざく」衛星で観測するとともに XMM-Newton 衛星の公開データを解析しました。本天体は非常に暗いものの、地球から近いため精度良いスペクトルが期待できる天体です。連続光は、中性子星表面からの黒体放射の逆コンプトン散乱成分と Power-law 成分の 2 成分でデータを再現することができました。また、XMM-Newton 衛星により、降着円盤を光電離したことによる複数の輝線が 0.4-0.7 keV 付近に検出されており、静穏状態においても降着円盤が存在することを示していると考えられます。

1. イントロダクション

X 線連星とは、その名のとおり X 線で明るく輝く連星です。連星の片方がブラックホールや中性子星で、もう片方が通常の恒星で構成されていて、これまでにわれわれの銀河系内だけでも 300 個程度見つかっています^{1), 2)}。このような連星系では、恒星のガスが中性子星やブラックホールの重力圏内にとらえられ、自身の重力エネルギーを解放することで X 線のエネルギー帯域で明るく輝くことができます。といっても、無限に明るくなれるわけではなく、輝くことによって生じる放射圧と重力がつり合うエディントン光度 (L_E) と呼ばれる限界光度が存在し、 L_E は

$$L_E = 1.25 \times 10^{38} \frac{M}{M_\odot} \text{ erg/s} \quad (1)$$

で与えられます。ここで、 M は中性子星やブラッ

クホールの質量、 M_\odot は太陽質量です。中性子星の場合、その質量が $1M_\odot$ 程度なので $L_E \sim 10^{38}$ erg/s です。ブラックホールの質量は銀河系内に存在している X 線連星であれば、 $10 M_\odot$ 程度なので、 $L_E \sim 10^{39}$ erg/s となります。X 線連星の光度が、 L_E で規格化したときに何%程度になるかというのは、X 線連星の状態を分類するうえで重要な尺度です。大雑把に分けると、光度が数% L_E を上回る場合、高光度状態と呼び、下回ると低光度状態と呼びます。題目にあげている静穏状態とは、低光度状態でも特に暗い状態を指すときに使う言葉で、明確な境界はありませんが $\sim 0.1\% L_E$ 以下の光度であるときに用いることが多いようです。これらの状態のうち、静穏状態以外の状態は図 1 に示しているようにスペクトルの解釈や物理的描像が立てられている一方で、静穏状態についてはまだよくわかっていないのが現状です。その

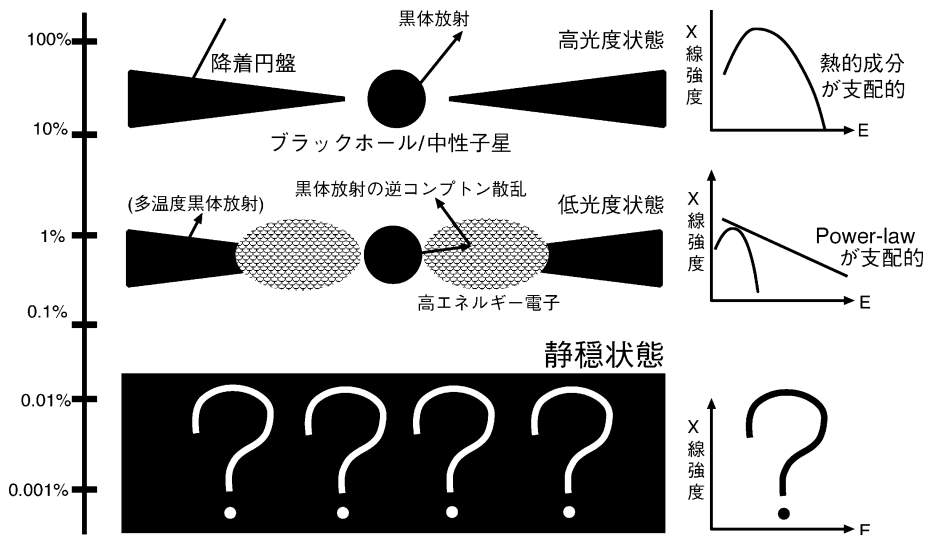


図1 高光度状態のスペクトルは、中性子星や降着円盤の熱的成分が支配的です。一方の低光度状態のスペクトルは Power-law 型をしており、それは中性子星の黒体放射の逆コンプトン散乱であると考えられています。

大きな理由の一つに、暗いので精度の良いスペクトルが得にくいということがあげられます。本稿では、非常に暗い状態にある X 線連星のスペクトルの解釈と物理的描像を迫ることが目的です。

2. 観測ターゲット 4U 1700+24

今回観測ターゲットに選んだ天体は、中性子星と M 型の巨星が連星をなした 4U 1700+24 という天体です。選定理由としては、X 線光度が 0.01–0.0001% L_E で非常に暗いものの、地球からの距離が $\sim 420 \text{ pc}^3$ と非常に近い（現在発見されている X 線連星の中で最も近い）ため天体からのフラックスが高く、精度の良いスペクトルが得られるからです。筆者らは、本天体を 2007 年 8 月 22 日に「すざく」衛星で観測しました。そのときの本天体の光度は、観測史上最も暗く ($\sim 0.00008\% L_E$)、非常に貴重な時期を観測することができました。本稿では、この「すざく」衛星による結果と XMM-Newton 衛星のアーカイブデータの中から 0.01% L_E のデータと 0.003% L_E のデータの解析結果も報告します。便宜上、0.01% L_E のデータを Newton 1、もう一方を Newton 2 とします。

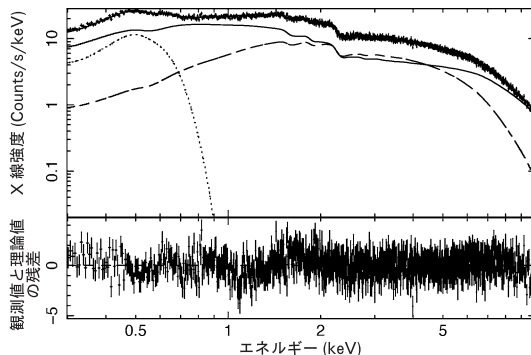


図2 文献4による Newton 1 のスペクトラム。上段の +印は観測値。一点鎖線は黒体放射成分、実線が逆コンプトン散乱成分、点線が物理的に解釈不明とされている幅の広い Gaussian 成分。下段は観測値と理論値の合計の残差。

Newton 1 のデータに関しては、すでに解析結果が報告されています⁴⁾。図2は、文献4の解析結果をもとにして独自に作成したエネルギースペクトルです。彼らの結果では、連続光の2成分（中性子星の黒体放射+種光子不明の逆コンプトン散乱成分）と $\sim 0.5 \text{ keV}$ を中心とした幅 $\sim 0.2 \text{ keV}$ の大きな Gaussian モデルが必要であるとされてい

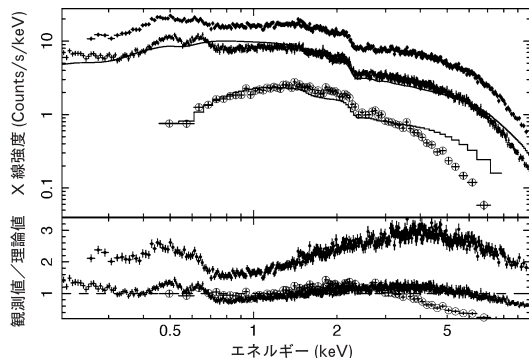


図3 XMM-Newtonと「すざく」衛星で得られたスペクトル。上からNewton 1, 2, 「すざく」データとなっています。上段は観測値(●, +, ○)と理論値(実線)の比較であり, 下段はその比である。

ます。連続光の解釈もさることながら、彼らも論文の中で0.5 keV付近の大きなGaussianは物理的な解釈不明である述べており、非常に疑問が残る解析結果となっています。筆者らは、このデータに関しても再解析が必要であると考えました。

3. XMM-Newtonと「すざく衛星」による結果

図3は、上側のパネルがNewton 1, 2と「すざく」の観測スペクトルをプロットし、三つのデータすべてに対して同じ形のPower-lawモデルでfittingしたときの様子を表しており、下側のパネルは、データとモデルの比をとったものになっています。ただし、「すざく」のデータは、見やすくするためにデータ値(カウントレート)を20倍して表示してあります。1 keV以下の低エネルギー側より、高エネルギー側のほうが激しく変動していることがわかります。また、Newton 2のデータを見ればわかりますが、0.4–0.7 keV付近は二コブ構造になっており、酸素など重元素による特性X線放射であることが予想されます。その一方で、Newton 1のデータではそのコブ構造が見えにくくなっているのがわかります。これらのことか

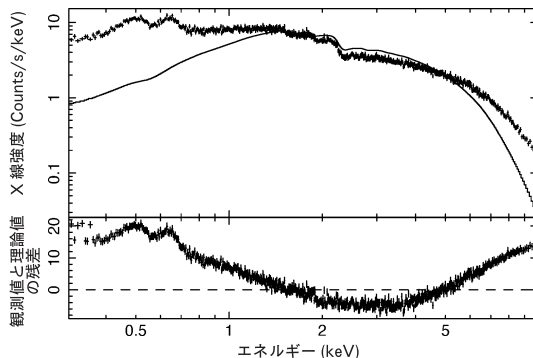


図4 Newton 2のデータを1温度の黒体放射で再現したときの結果。上段は観測値(+印)と理論値(実線)の比較であり, 下段はその残差である。

ら、Newton 1ではNewton 2で見えていた特性X線の輝線幅が何らかの原因で広がってしまったか、エネルギーの違う他の特性X線が新たに放射されたことによって、コブ構造が見えにくくなったことが考えられます(§4.2参照)。「すざく」のデータは、非常に暗い時期であったことから、残念ながら0.5 keV以下の輝線を検出するまでには至りませんでした。

4. スペクトルの解析結果

まず、§4.1でXMM-Newton衛星に搭載されているPN検出器⁵⁾の結果を用いて、連続光についてのスペクトル解析を行い、§4.2ではXMM-Newton衛星に搭載されている非常にエネルギー分解能が高いRGS検出器⁶⁾の結果を用いて、図3の0.4–0.7 keV付近に見えていた構造について詳細に解析し、スペクトルの全体像をまとめます。

4.1 連続光成分

中性子星連星において、連続光を放射するメカニズムは以下のようにいくつかあります。中性子星表面からの黒体放射、それを種光子とした高エネルギー電子による逆コンプトン散乱、中性子星の磁場と電子によるシンクロトロン放射やその逆コンプトン散乱などです。筆者らは、以上のよう

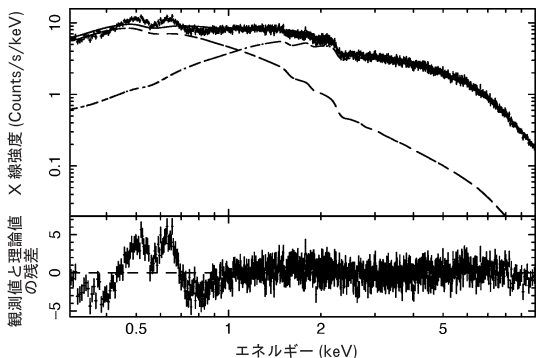


図5 Newton 2のデータを黒体放射の逆コンプトン散乱成分（高エネルギー側）と Power-law（低エネルギー側）で再現したときの結果。

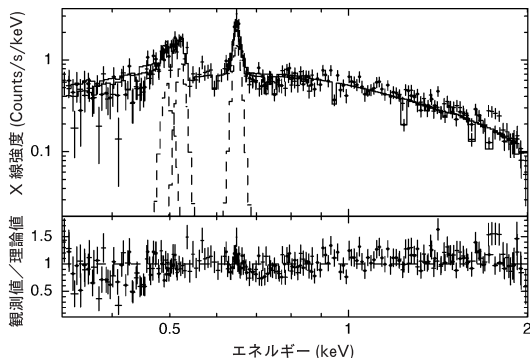


図7 連続光に加えて3本の輝線で Newton 2 のデータを再現した結果。見やすくするため、連続光成分のモデルは図に書き入れていません。図6で見えていた残差が消えています。

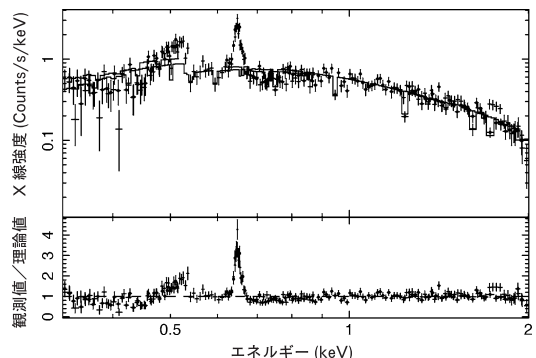


図6 連続光（黒体放射の逆コンプトン散乱＋Power-law; §4.1参照）を Newton 2 の RGS のデータにあてはめた結果。0.65 keV と 0.5 keV 付近に残差があるのがわかります。

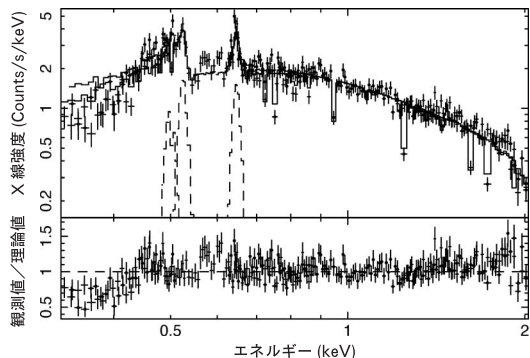


図8 連続光と図7でわかった3本の輝線で Newton 1 の RGS のデータの再現を試みた結果。0.60 keV, 0.57 keV, 0.46 keV あたりに小さい残差が残っています。

な放射モデルで観測データが再現可能かどうかを調べました。星間空間を光子が伝わる間の吸収量の指標である N_H は、 0.04×10^{22} （文献7）に固定しました。その結果、連続光は一つのモデルでは再現することができませんでした。例として Newton 2 のデータに対して1温度の黒体放射で再現を試みたときの結果を図4に示します。低エネルギー側と高エネルギー側に大きな残差があることがわかります。最終的に連続光は2成分の放射で再現され、1 keV 以下は Power-law モデルで、1 keV 以上は中性子星の黒体放射（温度は ~ 1 keV）の逆コンプトン散乱が支配的になっている

ことがわかりました。その結果を図5に示します。図4に見えていた大きな残差はなくなっており、0.5 keV 付近の輝線による二コブ構造だけが残差になっているのがわかります。他のデータ（Newton 1 と「すぎく」）についても同じモデルで連続光を再現することに成功しました。

4.2 輝線構造

図6は、§4.1で得られた連続光のモデルだけで Newton 2 の RGS のデータを再現しようとしたものです。0.65 keV 付近に鋭い残差が残っており、0.5 keV 付近には比較的幅の広い残差が残っ

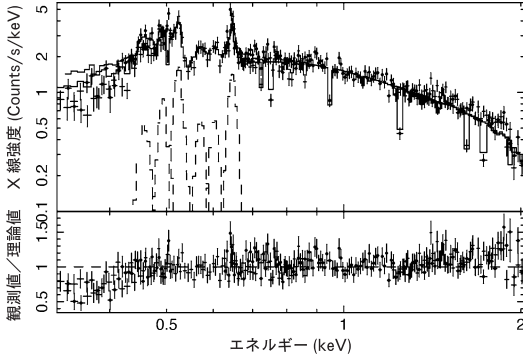


図9 図8の結果に新たな3本の輝線(0.60 keV, 0.57 keV, 0.46 keV)を加えてデータを再現した結果. Newton 1は合計6本の輝線が存在することが明らかになりました.

ているのがわかります. 解析を進めると0.5 keV付近は1本の輝線ではなく、 ~ 0.52 keVと ~ 0.49 keVの2本の輝線が存在することがわかりました. その様子を図7に示します. 図8は, Newton 1のRGSデータについてNewton 2で見つかった三つのGaussianモデルで再現した結果ですが, まだ ~ 0.45 keV, ~ 0.57 keV, ~ 0.60 keVに小さい輝線の残差があることがわかります. 結局, Newton 1には6本の輝線放射が伴っていたことがわかりました(図9). このように, 複数の輝線放射があったがゆえに, エネルギー分解能がRGS検出器ほど良くないPN検出器では, 図3の0.4–0.7 keV付近は一つのコブのように見えてしまっていたわけです. すべての輝線の広がりは ~ 10 eVであり, 極端に広がっていないことから, 中性子星のごく近傍で放射されたものではないこともわかります.

以上の結果から, 非常に暗い中性子星連星4U 1700+24は以下のような特徴をもっていることが観測的にわかりました. 1) 連続光スペクトルは, 1成分ではなく, 低エネルギー側で支配的なPower-law成分と高エネルギー側で支配的な黒体放射の逆コンプトン散乱成分で再現される. 2) 黒体放射は, 中性子星表面からの黒体放射である

と考えられる. 一方で, 低エネルギー放射はPower-lawの形をしており, 考えられる放射源は, シンクロトロン放射, シンクロトロンセルフコンプトン放射(以後はSSC), 降着円盤の多温度黒体放射の逆コンプトン散乱(以後はDBB-IC)があげられる(§5.1参照). 3) 連続光だけではなく, 0.4–0.7 keVには複数(3本あるいは6本)の輝線放射が存在し, 文献3で提唱されていた幅の広いGaussian構造は必要ない.

5. 低エネルギー側の連続光と輝線放射の正体は??

高エネルギー側で支配的な黒体放射が中性子星表面からの放射と考えられるのに対し, これほど光度の暗い天体の低エネルギー側のPower-law放射や輝線放射の放射起源は明白ではありません. ここでは, 低エネルギー側の連続光の正体と複数の輝線放射の放射起源について議論することになります.

5.1 低エネルギー側の連続光の正体

§4.2で述べたように, 中性子星連星において1 keV以下のPower-law型スペクトルの起源は, シンクロトロン放射, SSC, DBB-ICが主に考えられます. しかし, シンクロトロン放射については, 以下の理由でメカニズムとしては妥当ではないと考えられます. それは, 典型的な弱磁場中性子星の場合($\sim 10^8$ G)と電子のエネルギー(~ 100 keV)を仮定した場合, 放射されるシンクロトロン放射の光子のエネルギーは ~ 1 eVであり, とても観測されている1 keVの放射は出せないからです. 次にSSCについて考えた場合, 100 keVの電子で逆コンプトン散乱するとすると, 1回の散乱で光子のエネルギーは約2倍になります. よって, 1 eVオーダーのシンクロトロン光子が1 keVに到達するためには, 10回程度散乱されればよく, 低エネルギー側の連続光の候補の一つと言えます. 最後にDBB-ICについて考えます. §5.2で述べるように降着円盤は中性子星から

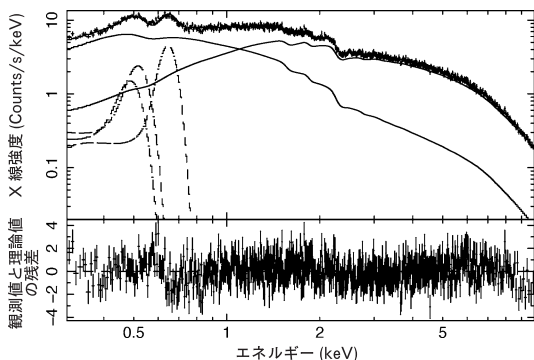


図10 Newton 2のデータに対して、低エネルギー側にPower-lawの代わりにDBB-ICに対応するモデル(CompPSモデル)を用いてfittingした結果。

～1,500 km 離れたところに存在していると考えられます。文献8によると、降着円盤の内縁半径が1,500 kmで天体の明るさが $\sim 10^{33}$ erg/sであった場合、円盤の内縁温度は ~ 7 eVになります。つまり、7回程度逆コンプトンされれば、1 keVに達することができます。そこで内縁温度を7 eVに固定した状態でDBB-ICに対応するモデル(CompPSモデル⁹⁾)でデータの再現を試みたところ、図10のように再現することに成功しました。この解析によって求まる降着円盤の内縁半径は～600 kmとなり、1,500 kmに比べて小さいですが、降着円盤の多温度黒体放射の一部が逆コンプトンされていると解釈することができます。よって、DBB-ICも候補の一つと言えます。

以上のような考察から、1 keV以下の連続光はSSCかDBB-ICであると考えられます。これら二つのうち、どちらが妥当かを結論づけるには、今後他の波長帯(特に紫外線)による観測や他の天体の観測および理論的な研究が必要であると考えています。

5.2 輝線放射の正体

National Institute of Standards and TechnologyのAtomic Spectra Database^{*1}によると、RGSで検出された複数の輝線のうち、0.65 keVはO VIII K_{α} 、0.57 keVはO VII K_{α} (Newton 1のみ検出)、0.52 keVはO I K_{α} 、0.49 keVはN VII K_{α} であるとそれぞれ同定されます。その他の輝線や電離度についての詳細な議論は、現在投稿論文にまとめているところです¹⁰⁾。上記のような電離した物質からの輝線が検出された場合、光電離なのか熱電離(衝突電離)なのか問題となります。今回の場合、FeのLの輝線(熱電離であるときの特徴的な輝線)が検出されていないことから、熱電離ではなく光電離であると考えられます。

これらの輝線はどこから放射されているのでしょうか? 注目して欲しいのは、電子を一つあるいは二つもつO VIIIやO VIIと電氣的に中性なO I輝線が検出されている点です。O Iは、電離されていないので光電離を受けにくい遠くて密度の大きい場所から出ていることが予想されます。中性子星連星のみならず、X線連星ではそのような場所は降着円盤が最有力候補です。また、他の電離した輝線は、O Iよりは電離されやすい場所、すなわち降着円盤を取り囲むような密度の小さい場所に分布していると考えられます。また、検出されたすべての輝線は～10 eVの幅をもっていました。これは、降着円盤の回転を反映したDoppler broadeningであると考えられ、その回転速度 v は $v \sim 0.02 c$ (c は光速)であることが見積もられます。このまま降着円盤がケプラー回転をしているならば、中性子星から降着円盤までの距離が～1,500 kmであると推定され、中性子星(半径～10 km)からは非常に離れていることがわかります。高光度状態では、降着円盤の内縁は一般相対性理論で予想される最終安定軌道(1 M_{\odot})

*1 <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines form.html>

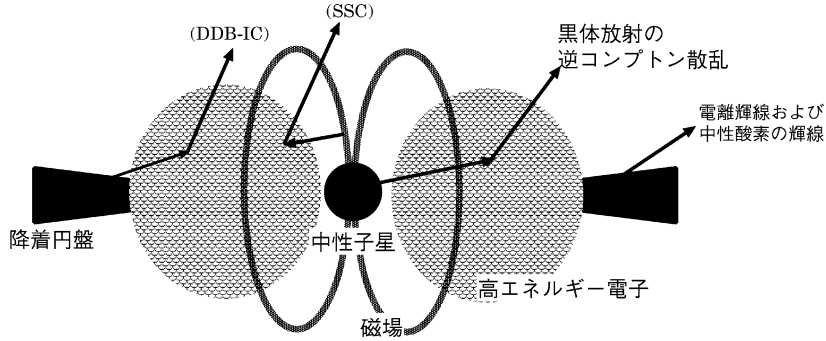


図 11 本研究で明らかにした静穏状態における 4U 1700+24 の物理的ジオメトリ. 中性子星の周りには黒体放射などを逆コンプトンする高エネルギー電子が存在することが考えられます. 光電離されたことによる輝線の特徵から降着円盤が中性子星から遠く離れたところに存在していることが推察されます.

の中性子星の場合～10 km) つまり、中性子星あるいはブラックホールの近傍まで形成されていますが、その描像とは異なることがわかりました.

6. ま と め

本稿では、0.01-0.0001% L_E の状態にある中性子星を含んだ X 線連星 4U 1700+24 の解析結果を報告しました. 本天体は、光度は非常に低いですが、地球からの距離が近い (~420 pc) ため、精度の良いスペクトルが得ることができ、謎が多い X 線連星の暗い状態を精査するのに最適な天体の一つです. 観測された 1 keV 以上のスペクトルは中性子星の黒体放射を逆コンプトン散乱する成分で説明でき、1 keV 以下のスペクトルは Power-law 型のスペクトルで、その放射機構は SSC か DBB-IC だと考えられます. RGS 検出器の結果からは、複数の電離輝線 (O VIII, O VII, N VII) や中性酸素などの輝線を検出しました. これらの結果から、静穏状態では降着円盤の内縁は～1,500 km と非常に遠くまで後退していることを明らかにしました. 以上のように、静穏状態のスペクトルを詳細に解析し、物理的解釈を与えたことや、降着円盤の存在を示唆できたのは初めてです. 図 11 に、今回明らかとなった連星の物理的なジオメトリをまとめておきました.

今後は観測天体数を増やしていく予定です. その先駆けとして、筆者らはすでに IGR J16194-2810 という天体の解析を始めています. この天体は、4U 1700+24 よりも光度が 1 桁高く、低光度状態と静穏状態のかけ橋となるような天体です. 今回得た描像が適用できるかを精査し、静穏状態にある X 線連星について理解を深めていきたいと考えています.

謝 辞

「すざく」の観測データを取得していただいた Suzaku Working Group の皆様には、データ取得をはじめさまざまな協力をしていただきました、厚く御礼申し上げます. 本研究は、私の博士論文の一部です. 当時、夜遅くまで指導して下さった広島大学の高橋弘充氏やデータ解釈でさまざまな助言をして下さった同大学の深澤泰司氏に深く感謝いたします. また、本稿の執筆をご紹介いただいた編集委員の山崎 了氏にも御礼申し上げます.

参考文献

- 1) Liu Q. Z., et al., 2007, A&A 469, 807
- 2) Liu Q. Z., et al., 2006, A&A 455, L1165
- 3) Masseti N., et al., 2002, A&A 382, 104
- 4) Tiengo, A., et al., 2005, A&A 441, 283
- 5) Briel, U. G., et al., 2000, SPIE 4012, 154
- 6) den Herder, J.-W., 2001, A&A 365, L7
- 7) Dickey, J. M., Lockman, F. J., 1990, ARA&A 28, 215
- 8) Mitsuda, K., et al., 1984, PASJ 36, 741
- 9) Poutanen, J., Svensson, R., 1996, ApJ 470, 249
- 10) Nagae, O., et al., 2010, PASJ, submitted

Physical Interpretation of the Spectra and Accretion Picture of X-ray Binary in Its Quiescent State

Osamu NAGAE

Department of Physical Science, School of Science, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: Physical interpretations of energy spectra of high luminous X-ray binaries have been developed owing to their accurate spectra. However, the spectra below 0.1% Eddington luminosity (L_E) do not have enough quality, and detailed spectral analysis have not been done. Thus, using Suzaku satellite, we observed an X-ray binary, 4U 1700+24, of which the luminosity is always below 0.01% of L_E , and we analyzed archival data of XMM-Newton satellite to study a physical interpretation of the spectra and accretion picture. The continuum spectra are represented by Comptonized black body arisen from the neutron-star surface and the Power-law component. Several emission lines are also detected by XMM-Newton, which are thought to be arisen from the photoionized accretion disk. This infers that the accretion disk still exists even in quiescent state.