

# 小口径望遠鏡でできるブラックホール X 線連星の研究あれこれ

植 村 誠

〈広島大学宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: uemuram@hiroshima-u.ac.jp

ブラックホールとそこへ流れ込むガス流、そして高速で吹き出すジェットの研究に欠かせない X 線連星。その名が示すとおり X 線観測衛星を使った研究が主役ですが、地上の可視光望遠鏡、しかも小口径のものでも観測できる面白い現象はたくさんあります。本稿ではまずこれまで研究されてきた降着円盤外縁で起こる現象をいくつか挙げ、後半では最近の話題として、ブラックホール近傍から出ているかもしれない新たな可視光成分について紹介します。

## 1. ブラックホール X 線連星とは？

「ブラックホール X 線連星」とは、通常の恒星とブラックホールで構成される連星系です（図 1 参照）。この連星はお互い非常に近いところを回っているため、相手の星（伴星）のガスがブラックホールに向かって流れ込んでいます。その降着過程でガスのもっていた重力エネルギーの一部が何らかのプロセスを経て輻射のエネルギーに転換され、強い X 線が放射されます。ブラックホール X 線連星はこれまで 20 天体が知られており、そのうち実に 85% にあたる 17 個が突発的なアウトバーストを起こす「X 線新星」と呼ばれる天体です<sup>1)3)</sup>。X 線新星の光度変化には後述するような共通した特徴がある一方で、研究者泣かせ（笑わせ？）の個性豊かな現象も多くあり、そのような多様性がなぜ存在するのかかわかっていません。現在でも新たな「サンプル」が出現するたびに、それまでわれわれが知らなかった情報をたくさん得ることができます。しかし、可視光でも明るいような新天体は数年に一つ見つかる程度。X 線新星の研究では貴重な新天体が現れたときに、

いかに迅速に、増光早期からデータを取り、長期にわたってモニターできるかが重要です。この点において、観測時間が比較的自由的な小口径望遠鏡の出番となるわけです。

ブラックホール X 線新星では、相手の星から

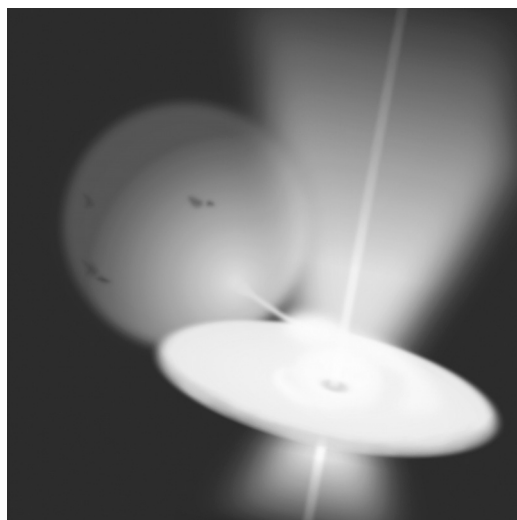


図 1 ブラックホール X 線連星のイメージ。伴星から流れてきたガスがブラックホールの周りに降着円盤を形成している。ブラックホール近傍からジェットが噴き出ることもある。

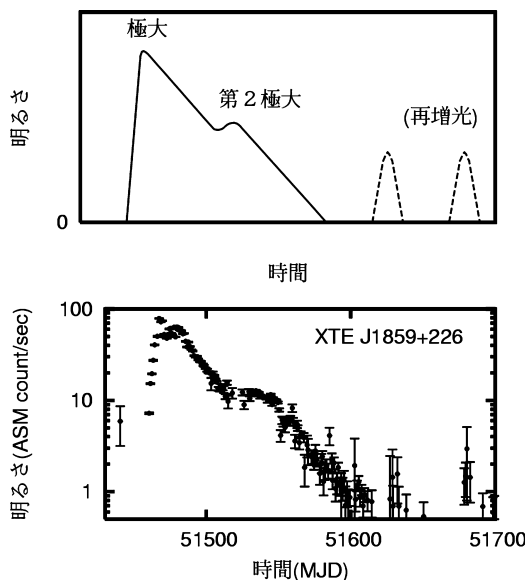


図2 上: 典型的なブラックホールX線新星の光度曲線(模式図)。下: 1999年に現れたブラックホールX線新星XTE J1859+226のX線光度曲線。RXTE衛星の観測。

流れでたガスがブラックホールの周りに「降着円盤」を形成しています。可視光で見ると、アウトバースト時にはこの降着円盤が最も明るくなり、これは円盤の質量降着率が突然大きくなった状態、すなわちガスが一斉にブラックホールに向かって落ち込んでいる状態にあたります。降着円盤では外側ほど温度は低くなり、外縁付近(約1万度)での現象は可視光で観測されます。一方、内側へいくほど温度は高くなり、内縁付近(約100万度)の現象はX線で観測されます。この内側の領域ではガスが高速で回転していて、実際、X線では短時間の変動が観測されています。

このことは後述する最近話題の可視光短時間変動を考える上で重要になります。通常、可視光で観測される円盤外縁の回転周期は数時間から数日と長く、そのようなタイムスケールの世界では数秒の短時間変動は期待しにくいからです。これについては本稿第4節でより詳しく紹介します。

本稿前半は従来型の、つまり可視光で見える降

着円盤外縁付近の現象を扱います。90年代中頃までに、典型的なブラックホールX線新星の光度曲線には、図2に見られるような、いくつかの共通した特徴が知られるようになりました<sup>4)</sup>。急増光から極大を経た後、しばしば「第2極大」が観測されます。この現象のメカニズムは現在でも未解明の問題で、これについては第3節で詳しく紹介します。いくつかのX線新星ではアウトバーストがいったん終了した後に再度増光することがあります。この再増光現象については最後の節で少しだけ紹介します。

さて、本稿では小口径望遠鏡でできるブラックホールX線新星の研究について具体的なトピックスをいくつか紹介していきます。まずは小口径望遠鏡が最も得意とする「一晚数時間の連続観測による数カ月の長期モニター」が必要な「スーパーハンプ現象」について書きたいと思います。

## 2. スーパーハンプとブラックホールX線新星

スーパーハンプとは矮新星やブラックホールX線新星の光度曲線に現れる振幅0.1-0.5等の周期的なコブ(=ハンプ)で、その周期がわずかに連星周期より長いのが特徴です(図3参照)。この現象は降着円盤が潮汐不安定性で楕円形に変形するのが原因です。スーパーハンプの正体やメカニズムについては、次号に掲載を予定されている「小望遠鏡で探る矮新星の増光と進化」(野上)を参考にしてください。このスーパーハンプ現象がX線新星の研究にどうして重要なのか、本節では二つの理由を紹介します。

まず一つめは中心天体の質量についてです。X線連星にブラックホールが含まれるかどうか調べるためには中心天体の質量を見積もる必要があります。最も確実な方法は、静穏時に伴星の速度変化を分光観測でとらえて、ブラックホール質量の下限値(質量関数)を見積もる方法です。しかしながら、この方法は静穏時がとても暗い天体では

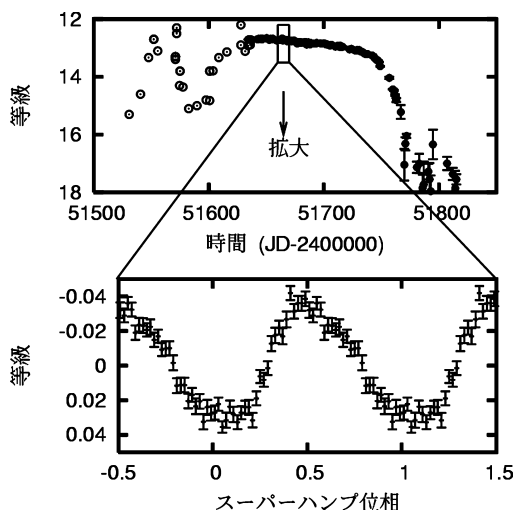


図3 上: ブラックホール X 線新星 XTE J1118+480 の可視光光度曲線. 下: 観測されたスーパーハンプ. スーパーハンプは伴星の潮汐効果によって楕円形に変形した円盤が原因で, X 線新星にも矮新星と同じ物理が働いていると考えられている.

できません.

そんなとき, スーパーハンプが希望をもたらしてくれます. 理論的にはスーパーハンプ周期と軌道周期の比は連星質量比と円盤半径の関数で書くことができます<sup>5)</sup>. ここで伴星の半径と質量の関係, 例えば主系列星のそれを仮定すると, 中心天体の質量の下限値を計算することができます. スーパーハンプ周期から中心天体の質量が決定できる, すなわちコンパクト天体がブラックホールかどうかの判定や, ブラックホール質量に制限をつけることができるわけです<sup>6)</sup>. スーパーハンプの観測をブラックホール質量を推定するという面で見たととき, その特徴は「明るい時期」の「測光観測」であることです. これは「暗い時期」の「分光観測」である質量関数を決める方法とは正反対で, スーパーハンプ観測に有利な点といえます. さらに, 分光観測では直接はわからない「連星の質量比」が, スーパーハンプ周期からは見積もることができます<sup>5), 6)</sup>. スーパーハンプ観測が相補

的な役割も果たすわけです.

スーパーハンプが X 線新星でもおもしろい理由その 2 は, ハンプ周期が円盤の進化をトレースしていることです. 矮新星ではスーパーハンプの周期はアウトバーストを通して完全に一定ではなく, 時間とともに少しずつ変化していきます. この周期変化は円盤半径の変化, もしくはスーパーハンプ光源の位置の変化に依存します<sup>5)</sup>. つまり, ハンプ周期の変化は円盤の膨張・収縮の情報を含んでいるのです. しかしながら, X 線新星でスーパーハンプの周期変化が検出された例はまだたった一つしかありません. その唯一の例は 2000 年に発見された XTE J1118+480 (=KV UMa) で, われわれの小口径望遠鏡を使った成果でした. この天体のスーパーハンプ周期は時間とともに「減少」しました<sup>7)</sup>. これは円盤の収縮を意味します. 対照的に, XTE J1118+480 と同様に質量比が非常に小さい矮新星 (WZ Sge 型矮新星) の場合, 周期は時間とともに「増加」します<sup>8)</sup>. この違いは何なのでしょう? そして他の X 線新星では? われわれは最近, スーパーハンプ周期の増減には, 極大時の降着円盤のサイズが関係しているのではないかと考えています<sup>9)</sup>. しかし X 線新星の観測例はまだこれ一つ. 矮新星と X 線新星を統一的に理解するには, 今後の新たな X 線新星を待つ必要があります. XTE J1118+480 の観測は主に 30-cm 望遠鏡で行われました. 次の新天体でもこのような小口径望遠鏡の活躍が期待されます.

さて, X 線新星のスーパーハンプについて, 最後に次節への導入となる話に触れておきます. スーパーハンプは楕円に変形した円盤が原因です. この楕円円盤は伴星からの強い潮汐効果のため, 通常より明るく輝きます. 一方で, アウトバーストが起こってから円盤が楕円に成長するまで, 典型的なブラックホール X 線新星では 80 日ほどかかると予測されています. そうすると, アウトバースト極大後しばらくしてから降着円盤が

楕円に成長して、それまでより明るくなるのが期待できます。これが光度曲線に現れる「第2極大」の原因ではないか、と指摘されているのです<sup>10), 11)</sup>。

### 3. 第2極大の謎

X線新星でしばしば観測される第2極大。一体何が起きて、二つめのピークが生まれるのでしょうか？ まずは観測の特徴をまとめます。第2極大はだいたい極大の50-70日後に現れ、緩やかな増光後、再び元の値と同じ速度で減光します。また、第2極大は可視光でもX線でも観測されますが、可視光の方が2-3日早く明るくなるのがわれわれの観測から明らかになっています<sup>12)</sup>。これは円盤外縁でまず明るくなって、その高温領域が内側へと伝播することを示唆します。

第2極大を説明するアイデアには2種類あります。一つは前節の最後で触れた「潮汐不安定性」によるもの。もう一つはX線による円盤外縁の照射によるものです<sup>13)</sup>。すでに述べましたが、円盤が楕円形に変形するまでに80日ほどかかることが理論的に予測されており、1996年にO'Donoghue & Charles は実際にスーパーハンプが検出された時期を調べ、この理論予測に矛盾しない結果を報告しています<sup>10)</sup>。このシナリオはスーパーハンプが現れる時期と第2極大の関係から検証することができます。すなわち、第2極大とほぼ同じ時期にスーパーハンプが現れれば、このシナリオが支持されますし、第2極大の時期に関係なくスーパーハンプが現れれば、このシナリオは否定されます。表1はスーパーハンプが最初に検出された時期と第2極大の時期の比較です<sup>12)</sup>。O'Donoghue & Charles が報告したのは表1中の上の三つの天体で、いずれも第2極大より後にスーパーハンプが検出されていて上記モデルに矛盾しません。しかし、これらの観測は、単にスーパーハンプの観測を開始した時期がすでに第2極大より遅かっただけで、ハンプが第2極大の時期に現れ始

表1 スーパーハンプ検出と第2極大の時期の比較<sup>12)</sup>

天体名	スーパーハンプ 初検出時期(日)	第2極大時期 (日)
GRO J0422+32	110	120
GS 2000+25	100	70-80
GRS 1124-683	110	70
XTE J1118+480	90	140?
GRS 1009-45	70	20?-70?
XTE J1859+226	13	50

注) 時間はいずれもアウトバースト極大からの時刻。  
GRS 1009-45 と XTE J1859+226 では観測された変光がスーパーハンプかどうか決定的ではないので注意が必要。

めたのか、それともずっと以前から現れていたのか、実は明らかではありません。第2極大とスーパーハンプの関係を調べるには、早期から密な観測をしないとイケないのです。

そのような観測が行われたのが1999年に発生したXTE J1859+226と、前節でも扱ったXTE J1118+480で、いずれもわれわれが小口径望遠鏡で観測した成果です。XTE J1118+480の場合、スーパーハンプが第2極大より50日も早く検出されており、「潮汐シナリオ」に否定的です。ただしこの系ではX線の第2極大が不明瞭で、通常のものとは異なる現象だった可能性が残ります。XTE J1859+226では軌道周期に大きな誤差があるため、われわれが観測した周期変光がスーパーハンプかどうか結論できません。ただ、このハンプも第2極大より先に現れています。現状ではもう一つのシナリオ、円盤外縁のアウトバースト開始時に熱くなりきれなかったガスが照射効果によって明るい状態に遷移する、とするモデルが有利に思えます。上の例からわかるように、典型的なケースで第2極大とスーパーハンプ出現の関係を疑いなく明らかにした例はまだありません。将来のスーパーハンプの観測によって両モデルに結論を下すことができるか!? 今後の小口径望遠鏡による観測次第、と言えるでしょう。

#### 4. 可視光短時間変動

これまで扱ってきた現象はいずれも降着円盤外縁からの熱的放射でした。しかし最近、円盤外縁以外からも可視光が放射されていることが明らかになってきました。本節ではこれに関連した現象「可視光短時間変動」について紹介します。

第1節でも書いたように、可視光源が円盤外縁のみだとすると、そこはタイムスケールが長い世界なので、数秒やそれ以下の速い変光を起こすのは困難なはずですが、そんなあるはずのない可視光短時間変動ですが、実は意外に昔から存在は知られていました。1980年代前半にGX 339-4で数秒の可視光準周期的変動が報告されています<sup>14)</sup>。

この現象に興味深いのは、可視光変動がX線変動ときれいな反相関を描いたことです<sup>15)</sup>。可視光短時間変動が最近脚光を浴びるようになったのは、本稿で何度かでてきたXTE J1118+480における数秒の短時間変動の発見がNature誌で報告されたのがきっかけでした<sup>16)</sup>。GX 339-4とは違い、この可視光変動はX線の短いフレアが起こる直前にいったん減光したあと明るくなるのが特徴です。X線を放射するような高エネルギー領域で、まず可視光の変動を起こすなにかしらの現象が起きている、という発見は驚きでした。その後、2002年にはわれわれの小口径望遠鏡での観測によってV4641 Sgrで数十秒の可視光変動が検出されています。この天体では30秒以内に0.5等も明るくなるという特徴的な現象が発見されました<sup>17)</sup> (図4参照)。

ではこれらの天体の可視光短時間変動に共通する特徴は何でしょうか？ それはX線光度がいずれも低いことです。このX線光度が低い状態は、別の視点から最近注目を集めています。2001年、FenderはX線連星の光度が低いとき、電波から可視光にかけて非熱的放射であるシンクロトロン放射が卓越していることを発見しました<sup>18)</sup>。このシンクロトロン放射はブラックホール近傍から噴

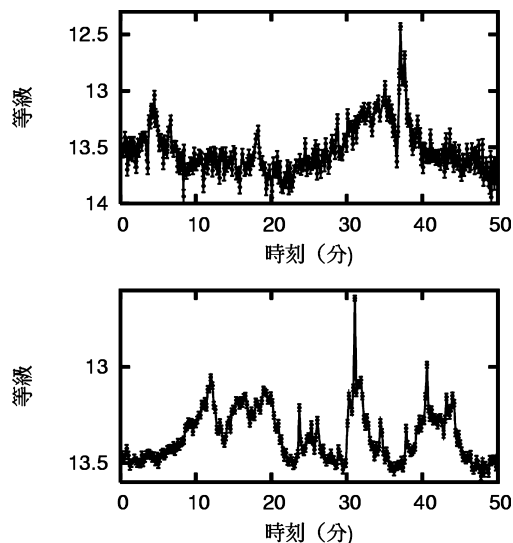


図4 ブラックホールX線新星 V4641 Sgr で観測された短時間変動。振幅が約1等と大きいことが特徴。この現象は2カ所の観測所で同時に観測され、同様の現象が2003、2004年にも観測されている。

き出るジェットが起源であると考えられています<sup>19)</sup>。

これまで観測されている可視光短時間変動はいずれもこの低光度状態で観測されているのです。これは偶然かもしれませんが、興味深いことです。短時間変動のメカニズムを考えるのに、円盤外縁の熱的成分ではなく、ブラックホール近傍のシンクロトロン放射の方が都合が良いからです。シンクロトロン放射が発生するのは、なにもジェットに限ったことではありません。光度の低い状態では、ブラックホール近傍で磁場の影響が強くなると考えられ、そのような状況でなにかしらのエネルギー解放現象が発生すれば、シンクロトロン放射や、その光子をたたきあげたコンプトン散乱による放射が可視光短時間変動の原因となる可能性があります。可視光がブラックホール近傍からも出ているかもしれない……今までX線でしか「見る」ことができないと思われていたブラックホールですが、可視光で、目で「見る」こ

とができるかもしれません。

この分野はまだ観測データが必要です。X線との相関はGX 339-4とXTE J1118+480では全く異なるものですし、V4641 Sgrやその他の天体ではほとんどデータがありません。短時間変動の周期性がX線光度の推移とともにどう変化するか？ 光度の高い状態では本当に可視光短時間変動はないのか？ など、これから観測すべき点はたくさんあります。小口径望遠鏡でこれらのテーマに挑戦するにはいくつかの困難な点もあります。高い時間分解能を可能にする特別な検出器が必要なことと、その短い積分時間でも相当の光子を得ないといけないため、明るい天体しかターゲットにできないことです。一方で、後者については、V4641 Sgrという短時間変動を起こす明るい天体(8.9-13.8等級)があります。この天体は数秒から数時間の幅広いタイムスケールで変光するため、小口径望遠鏡には絶好のターゲットと言えるでしょう。

V4641 Sgr以外でも、より大きな口径の望遠鏡が突発現象に即時に対応できればこれらのテーマを切り開くことができます。広島大学では現在、国立天文台の1.5 m赤外シミュレータを譲り受け移設・改造し、大学の近くにこのような突発現象の観測に適応した新天文台を設ける計画を進めています。多色観測や偏光観測から、ブラックホール近傍で何がおこっているのか、全く新しい知見が期待できます。

## 5. おわりに

X線新星の可視光モニター観測は、古典的な熱的放射の現象でも、最近の非熱的放射の成分を研究する上でも、重要な役割を果たします。上に挙げた現象のほかにも、例えば、1992年のX線新星GRO J0422+32ではメインのアウトバーストの後に「再増光」が観測されましたが、これはX線では観測されず、可視光でしか検出されませんでした<sup>20)</sup>。この現象は可視光の観測なしでは知られ

ることがなかったでしょう。この原稿を書いていた最中にも、XTE J1118+480の再増光が2005年1月9日にアマチュア観測家のPavol A. Dubovsky氏によって発見されました。X線で活動が収まったように見えても、可視光の長期モニターを続ける重要性がわかります。

もしアウトバーストが降着円盤外縁で発生して内側へと伝播すれば、X線より先に可視光が増光するはずですが、その場合は過去に知られているX線新星はもちろん、新天体ですら可視光観測で見つけることができる可能性があります。通常の新星として記録されているものにもX線新星が紛れている可能性があり、そのようなX線新星候補の可視光モニターからも重要な成果が期待できます。本稿では小口径望遠鏡でもできるブラックホールX線新星の研究トピックスをいくつか紹介してきました。すべてのテーマで共通して言えることは、新天体が発見されたときには可能な限り早期からの密な観測を継続する必要があります。そしてそのような観測に小口径望遠鏡の活躍が必要なことです。われわれにとって貴重な新天体は、今この瞬間も、発見され、観測されるのを待っているのです。

## 謝辞

本稿をまとめるのにあたり、京都大学の加藤太一、野上大作両氏から貴重なアドバイスをいただきました。ありがとうございました。また、本文中で引用したわれわれの論文は、京都大学をはじめ、多くの研究機関の研究者、アマチュア観測家の方々との共同研究の成果です。共著の皆様は大いに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) McClintock J. E., Remillard R. A., 2004 (astro-ph/0306213)
- 2) Orosz J. A., et al., 2004, ApJ 616, 376
- 3) Casares J., et al., 2004, ApJ 613, L133
- 4) Tanaka Y., Shibasaki N., 1996, ARA&A 34, 607

- 5) Osaki Y., 1985, A&A 144, 369
- 6) Mineshige S., Hirose M., Osaki Y., 1992, PASJ 44, L15
- 7) Uemura M., et al., 2002, PASJ 54, 285
- 8) Kato T., et al., 2003, MNRAS 339, 861
- 9) Uemura M., et al., 2005, A&A, in press
- 10) O'Donoghue D., Charles P. A., 1996, MNRAS 282, 191
- 11) Truss M. R., 2002, MNRAS 337, 1329
- 12) Uemura M., et al., 2004, PASJ 56, S147
- 13) King A. R., Ritter H., 1998, MNRAS 293, L42
- 14) Motch C., Ilovaisky S. A., Chevalier C., 1982, A&A 109, L1
- 15) Motch C., et al., 1983, A&A 119, 171
- 16) Kanbach, G., et al., 2001, Nature 414, 180
- 17) Uemura M., et al., 2004, PASJ 56, S61
- 18) Fender R. P., 2001, MNRAS 322, 31
- 19) Markoff S., Falcke H., Fender, R., 2001, A&A 372, L25
- 20) Shrader C. R., et al., 1997, ApJ 487, 858

## Topics on Black Hole X-Ray Binaries with Small Telescopes

Makoto UEMURA

*Hiroshima Astrophysical Science Center,  
Hiroshima University, Kagamiyama 1-3-1,  
Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan*

Abstract: X-ray binaries give us a number of important hints to study black holes, accretion flows, and jets. While studies with X-ray satellites are a main approach for them, we have many chances to see interesting phenomena with small optical telescopes. In this article, first, I introduce classical studies of several phenomena originated at an outermost part of an accretion disk. Then, I show recent results about optical rapid fluctuations from black hole X-ray binaries.