

はくちょう座 SS 星の可視光・X 線高速同時観測—天体の円盤構造の解明へ

木邑真理子
Kimura Mariko

1. はじめに

宇宙では、絶えず激しい爆発的増光現象が起こっている。そのような現象には様々な種類があるが、降着円盤という星を取り巻くガス円盤を起源とするものが多い。例えば、ブラックホール・中性子星・白色矮星といった、重力が非常に強くコンパクトな星の周囲に降着円盤が形成されている系を考えよう。円盤のガスが中心星に落ち込む際、ガスが持つ重力エネルギーが X 線から可視光まで多波長域の光として解放される。核融合以上の高効率で、ガスの質量エネルギーが放射へと変換されるのである。円盤から中心星へ降着するガスの量は時間的に一定ではなく、突然大量の物質が中心星へ落ち込むことがある。このとき、天体から放射される光の量が突如として大幅に増加し、突発的に増光現象が観測される。なぜ降着するガスの量が増えるのか、そのメカニズムを理解することが、宇宙における爆発的増光現象を網羅的に理解する鍵となる。

本稿では、はくちょう座 SS 星という矮新星の観測を紹介する。矮新星は、白色矮星と普通の恒星(伴星)がお互いの周りを回り合っている連星系である。重力の強い白色矮星が伴星のガスを引き込むことで、白色矮星の周囲に円盤が形成されている(図 1)。矮新星で起こる突発的な増光現象はアウトバーストと呼ばれ、水素の部分電離に伴う熱不安定により、円盤に貯められたガスが時折一気に白色矮星に降着することで起こると考えられている¹⁾(図 2)。このような連星系は、宇宙に存在する様々な円盤を持つ天体の中で最もシンプルで、円盤の物理を研究する

のに適した天体であると考えられている。そのため、1960 年代に発見されて以降、矮新星は観測的にも理論的にもよく研究されており、ガス降着のメカニズムについて標準的な描像(円盤不安定のモデル)が確立されてきた。しかし、近年の時間軸天文学の進展により、観測される天体数が格段に増えた結果、従来の理論モデルでは説明できないような現象が次々と発見され始めた。現在、多様なアウトバーストを統一的に説明するモデルの構築が課題となっている。また、矮新星は観測で空間分解できないほど小さい天体なので、白色矮星近傍でガスがどのように広がり(又は絞られ)、どのように回転エネルギーを失って降着していくか?についても未だよく分かっていない。

これらの問題点を解決するために重要なのが多波長観測と高速観測である。円盤の外側は低温で可視

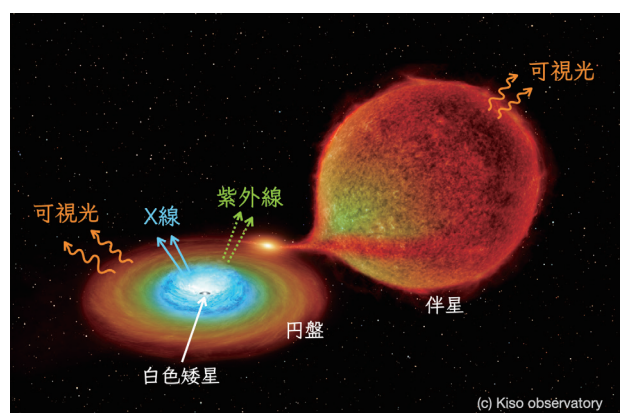


図 1 矮新星の想像図

はくちょう座 SS 星の 2020 年の状態の想像図でもある。白色矮星の近くに密度が薄く高温な X 線放射領域が存在しており、その外側に密度の濃いガス円盤が広がっている

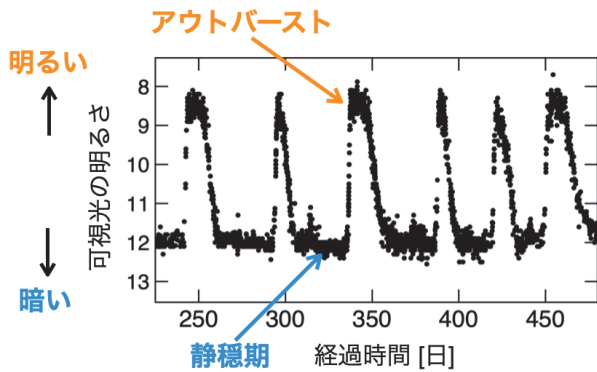


図2 はくちょう座SS星の普通の状態での光度曲線

アウトバーストをおよそ1か月おきに繰り返す

光を放出し、内側は高温で紫外線を放出する。そして、白色矮星近傍の希薄なガスの温度は1億℃にも上り、X線を放出する。円盤から白色矮星にどのようにガスが降着するのか、その全貌を知るためには、X線から可視光までのあらゆる波長域の光を同時に観測する必要がある。また、白色矮星近傍から出る光は秒スケールで変動しているため、高時間分解能の観測が必要である。しかし、特に可視光観測の分野では、突発的に発生する秒スケールの光の変動を観測するために適した装置が不足しており、多波長高速観測を実施することが困難な状態が続いていた。

2. Tomo-e Gozen の登場と NICER

このような状況の中、2019年に東京大学木曾観測所の Tomo-e Gozen が本格稼働したことで、状況は一変した。Tomo-e Gozen は、口径 1.05 m 木曾シュミット望遠鏡に搭載された CMOS カメラによる広視野ビデオサーベイであり、0.2 ミリ秒の絶対時刻精度を持つ観測装置である。普段は 0.5 秒の時間分解能で全天をスキャンし、可視光で突発的に明るくなる天体(突発天体)を探しているが、あるターゲット天体に対して秒以下の時間分解能での高速観測を行うこともできる。常時望遠鏡に取り付けられている装置のため、矮新星のような突発天体の観測に適している。Tomo-e Gozen により、今まで見過ごされてきた秒スケールの突発的な光度変動の研究が飛躍的に進んでいくと考えられる^{2,3)}。

一方、X線では古くから高速観測が可能な装置が存在していたが、矮新星のほとんどは可視光では明るいもののX線で暗く、観測が難しかった。しかし、

2018年に国際宇宙ステーションに搭載されたX線望遠鏡 NICER が稼働したことにより、矮新星のX線観測のチャンスが広がった。NICER は 0.2 keV から 12 keV までの軟 X 線に高感度を持つ観測装置であり、300 ナノ秒の絶対時刻精度を持つ⁴⁾。また、望遠鏡の向きを素早く変更できるため、多数の天体の観測スケジュールをフレキシブルに組むことができる。つまり、Tomo-e Gozen と同様、突発天体の観測に適している。Tomo-e Gozen と NICER、この2つの観測装置の台頭により、矮新星の秒スケールの光度変動を可視光と X 線で同時観測できる土壌が整ったのである。

3. はくちょう座SS星の観測

2020年の秋から冬にかけて、筆者らは Tomo-e Gozen と NICER を用いて、はくちょう座SS星から来る秒スケールの光の変動を可視光と X 線で同時観測した⁵⁾。はくちょう座SS星は、多波長域で一番明るい矮新星であり、可視光では100年以上、X線では20年以上もモニタリングされてきた。その間、およそ1か月おきにアウトバーストを繰り返してきた典型的な矮新星である(図2)。ところが、2019年8月から、徐々に静穏期の光度が可視光・X線で上がり始め、アウトバーストを頻繁に起こすようになった。更に、2021年2月には静穏時の光度が5倍以上上昇し、アウトバーストの振幅が非常になくなったため、静穏時とアウトバースト時の区別がつかなくなるという異常な状態になった(現在はこの状態は落ち着いている)。なぜこのような状態になったのか、それを考えることは、矮新星の光度変動の標準的な理論モデルを多様な光度変動を説明できるように改良する上でも重要である。

2020年の時点では、まだこの天体が2021年に異常な振る舞いを示すということは分かっていなかったが、その前兆となる静穏期の光度上昇には気がついていていた。そこで筆者らは、この天体の静穏期の観測を Tomo-e Gozen と NICER を用いて行い、はくちょう座SS星では初となる、可視光と X 線の高速同時観測のデータを手に入れた。図3は観測によって得られた光度曲線の一例である。可視光と X 線で共に10秒程度のタイムスケールの変動を示しており、しかも両者の変動がよく相関していることが見て取

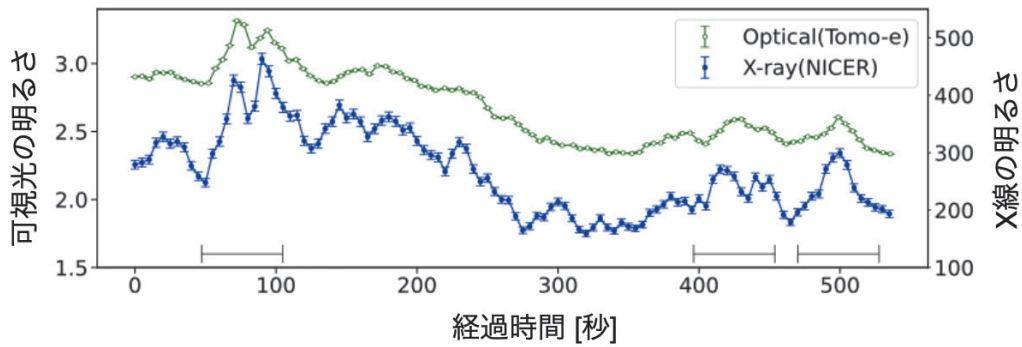


図3 可視光と X 線の同時観測の結果得られた光度曲線の例

緑が可視光、青が X 線の光度曲線である。文献 5) の Fig.1 の一部

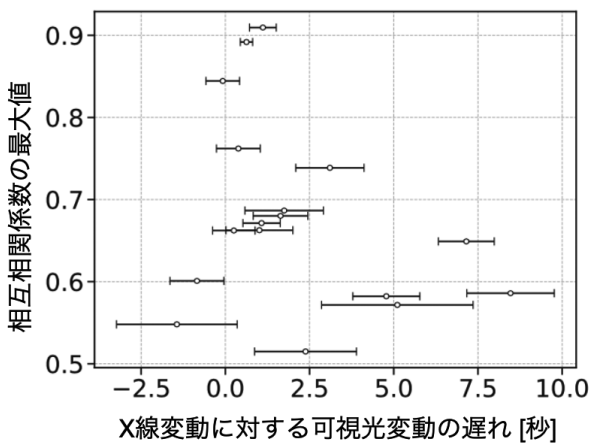


図4 各ショットのペアについて、相互相関関数を描いた際の係数の最大値と時間遅れの対応を表したもの

文献 5) の Fig.2 を改変

れる。このような高い相関を持つ変動が発見されたのは、はくちょう座 SS 星では初めてのことであった。

筆者らは、この光度曲線から 1 つひとつのショット（急激な光度変動のおよそ一山に対応する）を切り出し、それぞれのショットに対して可視光と X 線の相関を調べた。また、X 線の変動に対して可視光の変動がどの程度遅れて発生しているのかを測定した。その結果、相関の高いショットのほとんどでは、可視光が X 線に対して 1~2 秒程度遅れて変動していることが分かった（図 4）。過去の観測からは、X 線が可視光に対して数百秒遅れて変動するだろうと予想されていたため、驚きの結果であった。

なぜこのような結果になったのか、この結果が何を表しているかを考える。まず、X 線変動に対する可視光変動の遅延時間は、白色矮星近傍から放射された X 線が円盤の外側や伴星のガスに吸収され、

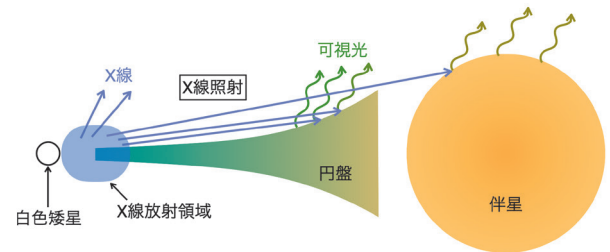


図5 矮新星の円盤の半分と伴星を真横から見た模式図

可視光が再放出されると考えると説明できる。なぜなら、円盤のサイズはおおよそ 5000 km で、光子が光速でその距離を進む時間がおおよそ 1 秒だからである（図 5）。このような現象は X 線照射と呼ばれ、円盤の外側や伴星の一部は、白色矮星近傍で起きている現象を写す鏡のような役割を担っていると考えられる。ここで、過去の普通の静穏期の観測では、X 線照射の観測的証拠は得られていない⁶⁾。つまり、筆者らの解釈が正しいとすると、2020 年の静穏期では、過去に比べて X 線照射の効果が大きくなっていたということになる。

過去の観測では、X 線を出す白色矮星近傍の領域は非常に小さく、円盤の厚みを超える高さがないと考えられていた。しかし、X 線照射の効果を大きくするためには、何らかの理由で X 線を出すガスの厚みが大きくなっている必要があるだろう（図 1 の青色の領域を参照）。したがって筆者らは、「可視光

と X 線の光度変動に高い相関があり、可視光が X 線に比べて遅れて変動しているのは、X 線放射領域の厚みが大きくなり、X 線照射の効果が高くなったことが原因である」と結論付けた。実は、この結果が出る前に、X 線のエネルギースペクトルの解析から 2020 年から 2021 年にかけてこの天体では X 線放射領域が大きく広がっていたのではないかと予想があり⁷⁾、筆者らの観測結果はこの結果をサポートする形となった。筆者らの研究が行われる前は、X 線放射領域の構造を議論するためには X 線のエネルギースペクトルの解析が必要であると考えられていたが⁸⁾、筆者らは光度変動の観測だけで矮新星の円盤と X 線放射領域の幾何学構造に制限をつけられることを示した。

4. 将来計画

矮新星の研究は、2000 年前後に 1 度ピークを迎えた。しかし、2010 年以降、天文の観測技術は目覚ましい進化を遂げ、次々と新しい天体が見つかり始めたことにより、研究者たちはまだ発生メカニズムの分かっていない光度変動がたくさんあるということに気付かされた。矮新星の研究は新時代に突入し、更にこれからも発展していこう。可視光と X 線の高速同時観測に関してだけでも、次々と新装置が開発されている。例えば、Tomo-e Gozen と同様 CMOS カメラを用いた観測装置である TriCCS (Tricolor CMOS Camera and Spectrograph) が、京都大学岡山天文台のせいめい望遠鏡に取り付けられている。更に、X 線衛星 XRISM も JAXA の主導により開発が進み、2023 年に打上げ予定である。これらの観測装置により、高時間分解能の光度曲線に加え、エネルギースペクトルも得られるようになると、

白色矮星近傍の円盤内縁部、そして X 線放射領域の温度や密度、空間構造について定量的な議論が可能になるだろう。

1 章でも述べたように、矮新星は円盤を持つ天体として最もシンプルなものである。そのため、矮新星の研究で円盤の純粋な物理を理解すると、他のより大きく複雑な円盤を持つ天体の理解も深まるだろう。例えば、銀河の中心には巨大なブラックホールとその周りを取り巻くガス円盤が存在する。タイムスケールは全く異なるが、光度変動はよく似ている⁹⁾。降着によって巨大ブラックホールがどのように成長してきたか？は天文学分野における最大の難問の 1 つである。一見関係がないように思える矮新星の研究も、ゆくゆくはこのような問題を考えるのに役立つであろう。

参考文献

- 1) Osaki, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **26**, 429-436 (1974)
- 2) Sako, *et al.*, *Proc. SPIE.*, **10702**, 17 (2018)
- 3) Beniyama, *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **74**, 4 (27pp) (2022)
- 4) Gendreau, *et al.*, *Proc. SPIE.*, **9905**, 99051H (2016)
- 5) Nishino, *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **74**, 3 (6pp) (2022)
- 6) Balman & Revnivtsev, *Astronomy & Astrophysics*, **546**, A112 (2012)
- 7) Ishida, *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **61**, S77-S91 (2009)
- 8) Kimura, *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **73**, 5 (18pp) (2021)
- 9) Noda & Done, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **480**, 3 (9pp) (2018)

(理化学研究所)