

降着円盤に魅せられて ～動的な宇宙の源を考える～



木 邑 真 理 子

〈金沢大学 先端宇宙理工学研究センター 〒920-1192 石川県金沢市角間町〉

e-mail: mariko-kimura@se.kanazawa-u.ac.jp

降着円盤を介したコンパクト天体へのガス降着は、宇宙における最も激しい突発現象の中心エンジンであると考えられています。降着の物理を調べるのに最も適した天体は、激変星やX線連星など、コンパクト天体と普通の星がお互いの周りを回りあっている連星系で、アウトバーストと呼ばれる突発的増光を起こす天体です。これらの天体は古くから研究されてきましたが、近年発見が相次いでいる多様なアウトバーストすべてを説明する大統一モデルの完成には至っていません。この記事では、この分野の研究の背景、私が多波長観測と数値シミュレーションを用いて果たしてきた役割、そして将来の展望を解説します。

1. はじめに

最初に、私を研究奨励賞に推薦して下さった 榎戸輝揚さん、野上大作さん、米徳大輔さんに感謝の意を表したいと思います。そして、私と一緒に研究をして下さっているすべての方々に感謝しています。感謝する方が多すぎて、書ききれないのが残念です。この記事の中では、私の研究生活の要所所で重要な示唆を与えて下さった方々に絞って、お名前を出させていただくことになりました。しかし、論文や学会発表の共著者になっていただいた方々はもちろんのこと、日々の研究生活の中で私と議論してくださる先輩方・同期・後輩・学生の皆様は、私の人生の宝物です。

この記事は、基本的には受賞記念講演の内容に沿って書かせていただきました。解説記事を書いた経験が豊富ではないので、わかりやすいかどうか不安ですが、講演時間の都合上、駆け足になったり省略した部分は詳細を書くように努めました。お楽しみいただけますと幸いです。

2. 宇宙物理学との出会い

まず、私の研究の背景となぜ現在のテーマを選んだかを説明したいと思います。私は2011年に京都大学理学部に入学しました。京都大学理学部では、3回生で各専攻への振り分けが行われるため、入学時は理学科で一括りされ、宇宙の詳しい勉強をするのはずっと後になってからです。しかし、私は宇宙に興味を持っていたので、京大生がほぼ全員履修することになる1回生用のポケットゼミで、「活動する宇宙」という名前のものに申し込むことにしました。そこで、柴田一成さん、嶺重慎さんに初めてお会いし、ほかの受講者とともに、なぜか大学院生用の教科書である「活動する宇宙」の輪読をすることになりました。初めて大学教授とお話する機会だったので、初回はかなり緊張していましたが、両先生とも気さくで、その温かい雰囲気にはほっとしたのを覚えています。私は特に3回生までは部活動に心血を注いできたので、成績はよくありませんでした。しか

し、宇宙物理への憧れが強く、また、他の物理系の研究室を見学した中で、宇宙物理学教室の雰囲気が一番自分の性格に合っているなど思ったので、宇宙物理学・天文学分野に進むことに決めました。4回生時点では、まだ自分のやりたい研究テーマが固まっておらず、何となく嶺重さんがいらっしゃる理論グループのゼミを選択しました。しかし、この何となくの選択が、その後の私の研究テーマに大きな影響を与えます。嶺重さんは降着円盤の専門家で、輪読ゼミでその基礎物理を叩き込まれました。

円盤を持つ天体はたくさんありますが、ここで私が指している円盤は、ブラックホール、白色矮星、中性子星といった、重力の強いコンパクト天体の周りのガス円盤のことです。この円盤のガスがコンパクト天体に吸い込まれる際、大量の重力エネルギー（最大で静止質量エネルギーの10%程度）が大量の放射エネルギーやアウトフローに変換され、激しい光の変動や高速のジェットなどが観測されます。コンパクト天体は、恒星が死んだ後の天体、いわば星の死骸です。人間の場合は死んだらそれで終わりですが、天体の場合は第二の人生があり、円盤からのガス降着を通じて華やかな天体現象を作り出すところに魅力を感じました。

私が本格的に研究を始めた2015年ごろ、時間軸天文学が発達し始め、突発天体の研究が盛んになってきました。突発天体とは、ある日突然明るくなるなど、光の明るさが激しく時間変動する天体のことです。色々な天体がありますが、ガンマ

線バーストや活動銀河核など、最も激しい活動現象を示す天体は、コンパクト天体+降着円盤という構造をしています（図1）。つまり、宇宙における最も激しい現象の中心エンジンは、コンパクト天体周囲の降着円盤であると考えられます。当時、私は宇宙物理学のことをほとんど何も知りませんでしたが、そんな私がたまたま興味を持ったことが、これから発展していく研究分野で重要なテーマになるというのは、本当に幸運だったと思います。

3. 激変星・X線連星のアウトバースト

大学院入試の際、嶺重さんのいらっしゃる理論グループを第一希望にしていたのですが、理論グループは人気で成績上位者しか入ることができず、最終的に私が配属されたのは、野上さんと加藤太一さんが率いる可視恒星グループでした。今では、観測のグループに入って本当によかったと思っています。現在は数値シミュレーションを用いた研究にも携わっていますが、最初から緻密な定式化やコーディングが必須の数値シミュレーションばかりだと失敗していたかもしれません。観測データの解析は、手を動かせば曲がりなりにも進むことが多く、ひとまず何でもやってみる性格の私にはぴったりでした。宇宙物理学教室の教員の方々には本当に優しく、私のような成績の悪い人にも興味のあることを自由にやらせていただきました。

京都大学では、矮新星と低質量X線連星という、アウトバーストという名前の突発的増光を起こす

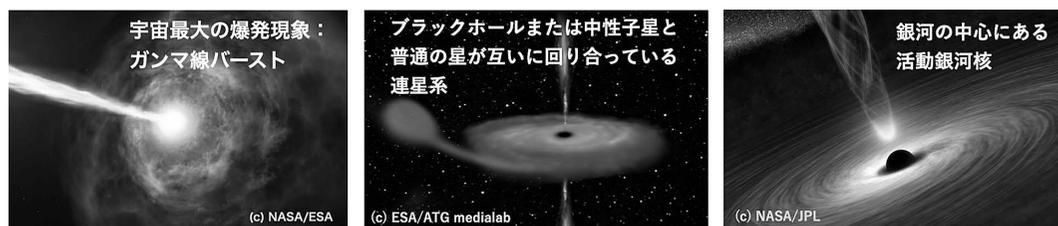
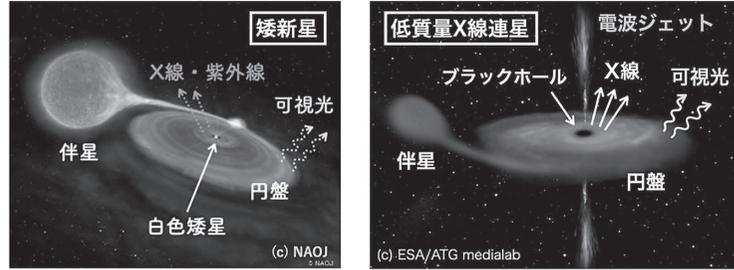


図1 コンパクト天体の周囲に円盤を持つ、様々な突発天体の想像図。

(a: 矮新星と低質量 X線連星の想像図)



(b: 円盤の熱平衡曲線とアウトバーストのメカニズム)

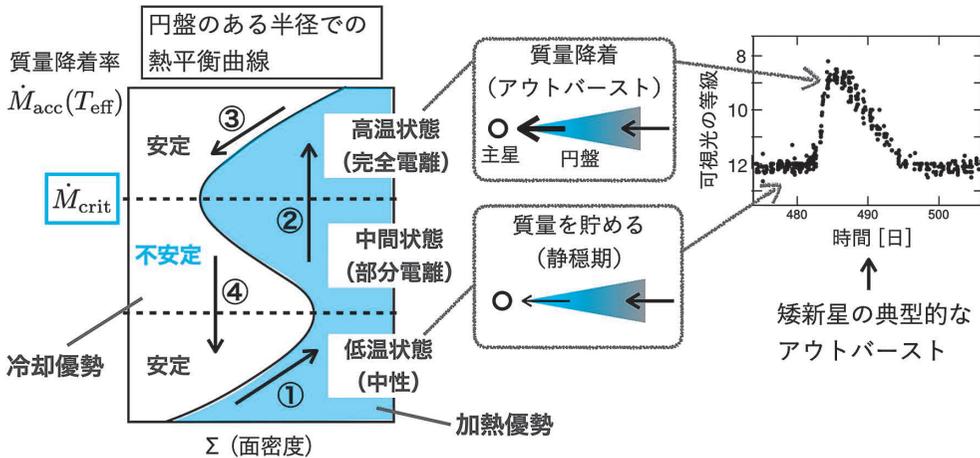


図2 (a) 矮新星と低質量X線連星の想像図, (b) 典型的なアウトバーストの光度曲線と、円盤のある半径での熱平衡曲線(面密度 Σ vs. 質量降着率 \dot{M}_{acc} または有効温度 T_{eff})。水素の部分電離により、負の傾きを持つ熱的に不安定なブランチが現れる。円盤が低温状態にある時は、コンパクト天体への質量降着率が低く、円盤にガスが貯まる状態(①)。面密度が閾値を超えると安定な解がなくなり、別の安定解である高温状態へ遷移する(②)。その後、質量降着率が高い状態を維持し(③)、円盤のガスが降着によって失われると、再び安定な解がなくなり、低温状態へ戻る(④)。このリミットサイクル不安定を繰り返すことで、不定期にアウトバーストが起こる。伴星からの質量輸送率は変化せず、円盤からコンパクト天体への質量降着率が変化する。

天体の可視光観測に従事しました(図2(a))。これらは降着円盤を持つ天体の中で一番シンプルな構造をしており、基礎的な物理現象を理解するのに最適です。矮新星は、白色矮星(主星)と恒星(伴星)から成る近接連星系である激変星の一種、低質量X線連星はブラックホールまたは中性子星(主星)と恒星(伴星)から成る近接連星系であるX線連星の一種で、それぞれ別のカテゴリに分類されています。しかし、主星の種類が異なるということ以外、構造に大きな違いはなく、アウトバーストの性質も似通っています。なので私は、これらの天体は同じ軸で研究できると考えていま

す。

アウトバーストは、水素の部分電離に伴う熱不安定により、円盤にガスが貯まる暗い状態と、ガスが中心星に降着する明るい状態を交互に繰り返すことで起こると考えられています。このモデルを、円盤不安定モデルと呼びます([1], 図2(b))。最初は、伴星からの質量輸送率が変化することでアウトバーストが起こるのではないかと考えられていたのですが、これまでに多数の観測的研究、理論的研究が行われ、円盤不安定モデルの正しさが証明されてきました。まず、矮新星の分野で円盤不安定モデルが確立

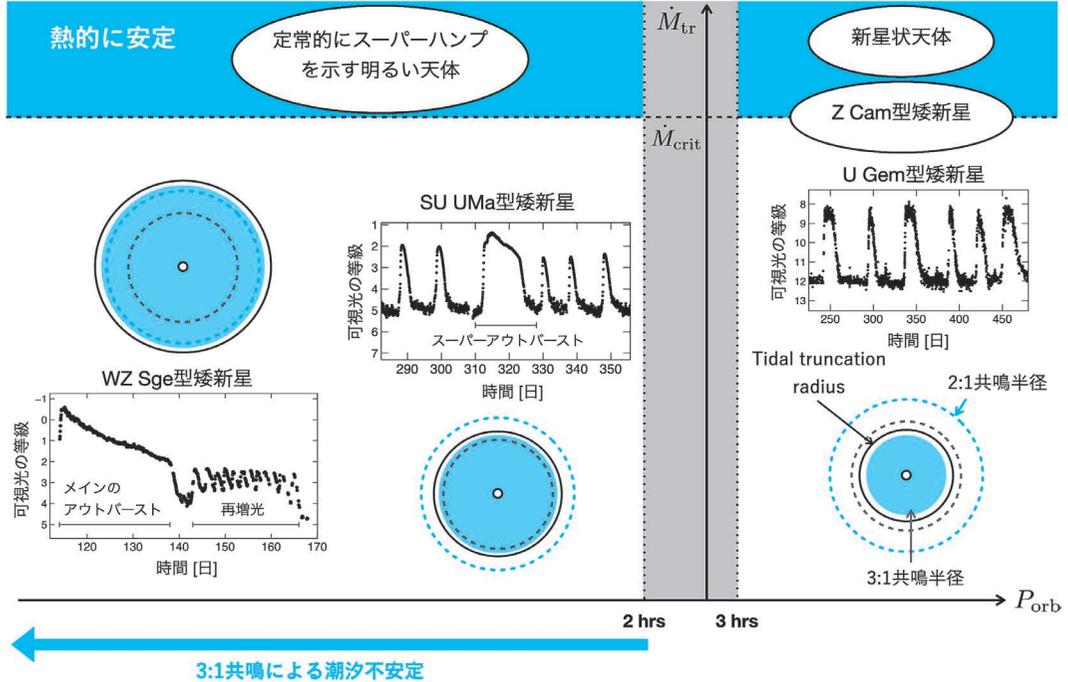
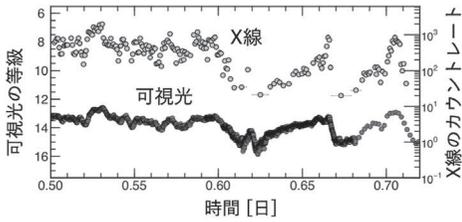


図3 2000年代までに提唱された、矮新星アウトバーストの統一モデル。質量輸送率 (\dot{M}_{tr}) が \dot{M}_{crit} より低い場合に熱不安定が起こり、アウトバーストが起こる。基本的に、連星の軌道周期 (P_{orb}) が短いほど歳を取った連星となり、連星質量比が小さい。 $P_{orb} \lesssim 2 \text{ hrs}$ の場合、tidal truncation radius が 3:1 共鳴半径よりも外側にあり、アウトバースト中、円盤半径が 3:1 共鳴半径を超える場合がある。その際、伴星の潮汐力により潮汐不安定がトリガーされ、角運動量の引き抜きの効率が格段に上がるため、振幅が大きく継続時間の長いスーパーアウトバーストが観測される。連星質量比が極端に小さい天体は WZ Sge 矮新星と呼ばれる。これらの天体では、アウトバースト中、円盤半径が常に 3:1 共鳴半径を越え、2:1 共鳴半径まで達する場合が多い。アウトバーストは常にスーパーアウトバーストとなる。

し、低質量 X 線連星への応用が進みました [2-5]。そして 2000 年代までに、特に矮新星の分野で図 3 に示すような統一モデルが完成しました [6, 7]。様々なタイプの矮新星は、横軸が連星の軌道周期、縦軸が伴星からの質量輸送率の図で統一的に説明できます。まず、軌道周期が 3 時間以上の天体 (図の右側) に注目します。質量輸送率が \dot{M}_{crit} より大きい場合は、円盤は常に熱的に安定で、アウトバーストを起こさない新星状天体となります。質量輸送率が \dot{M}_{crit} より小さい場合、熱不安定によりアウトバーストを繰り返す U Gem 型矮新星となります。質量輸送率が \dot{M}_{crit} 付近にある場合、アウトバーストと光度一定の時期を交互に

繰り返す Z Cam 型矮新星になります。次に、軌道周期が 2 時間以下の天体 (図の左側) に着目します。軌道周期が短くなると、連星質量比 (主星に対する伴星の質量比) が小さくなり、円盤が 3:1 共鳴半径を超えて広がるようになります。その際、伴星の潮汐力により潮汐不安定がトリガーされ、光度の微小変動であるスーパーハンプが観測されます。また、角運動量の引き抜きの効率が格段に上がるため、振幅が大きく継続時間の長いスーパーアウトバーストが起こるようになります。質量輸送率が \dot{M}_{crit} より大きい場合、定期的スーパーハンプを起こす明るい天体となります。質量輸送率が \dot{M}_{crit} より小さい場合は、熱不

(a: V404 Cygの2015年のアウトバースト中の短時間変動)



(b: 連星系の円盤の半分を真横から見た想像図)

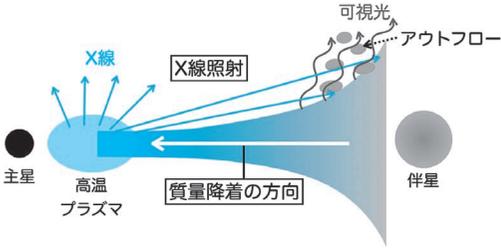


図4 (a) ブラックホール低質量X線連星V404 Cygの2015年のアウトバースト中に見えた、30分から数時間で規則的なパターンを持つ短時間変動。(b) 連星系の半分を真横から見た模式図。X線照射(高温の降着流と円盤から出たX線が、低温の円盤外側を照射し、可視光が再放出される放射機構)により、円盤の外側でアウトフローがトリガーされる。

多大なサポートがあったからです。特に、第二著者として観測、論文執筆からプレスリリースの準備まで、様々な場面で活躍して下さった磯貝桂介さん、研究の方向性を指導して下さった加藤さん、野上さん、上田佳宏さん、X線データを解析して下さった志達めぐみさん、中平聡さん、堀貴郁さん、榎戸さんに改めて感謝いたします。また、世界中のアマチュア天文家の方々との協力観測により、当時のブラックホール連星の観測データとしては世界最高密度のものを集めることができました。天文学分野では観測装置の大型化が進んでいますが、数10 cmクラスの望遠鏡でも、大量の時系列データを集めることで大きな科学成果に結びつくことを多くの方に知っていただけたらと思います。

V404 Cygの研究をきっかけに、X線照射がアウトバーストに与える影響についても様々な研究

が進みました。例えば、X線照射は円盤外側のガスを温めますが、温められたガスの速度が脱出速度を超えて飛んでいくことがあります。このようなアウトフローを熱駆動風と呼びます [9, 10]。アウトフローにより、円盤の角運動量が引き抜かれると、それがアウトバーストの光度変動にも影響します。低質量X線連星のアウトバーストの可視光での減光が円盤不安定モデルの数値シミュレーションの予想より緩やかであるというのは長年の未解決問題ですが、最近の研究により、X線照射とアウトフローを考えると観測の光度変動に近づくことがわかってきました [11]。

しかし、X線照射だけではアウトバースト後期の可視光・紫外線の光度をすべて説明できないということも、私達の研究によりわかってきました [12]。伴星による円盤の潮汐加熱により、円盤外縁部がより高温になることを考慮する必要があるかもしれません。矮新星の中でも極めて連星質量比が小さいWZ Sge型矮新星では、熱不安定のほかに潮汐不安定という別の不安定性が効いてきます(図3, [6])。これまで、低質量X線連星の分野では潮汐不安定はほとんど考慮されてきませんでした。ブラックホールが主星の場合は連星質量比が小さくなりやすいので、潮汐不安定は必ず起こります。現に、ブラックホールが主星の低質量X線連星とWZ Sge型矮新星のアウトバーストには類似点が沢山あります。例えば、メインのアウトバースト終了後の再増光(図3)やスーパーハンプと呼ばれる光度の微小変動などです。

私は学生時代、WZ Sge型矮新星の観測を多数行っていたため、WZ Sge型矮新星とブラックホールX線連星のアウトバーストの振る舞いが似ていることは自明でしたが、X線連星の研究者にはまだあまり認知されていないようです。これまでは低質量X線連星の研究はX線のみで行われることが多かったと思います。しかし、多波長天文学の発達により、可視光・近赤外線の同時観測の機会が増えています。円盤全体の物理現象を多波

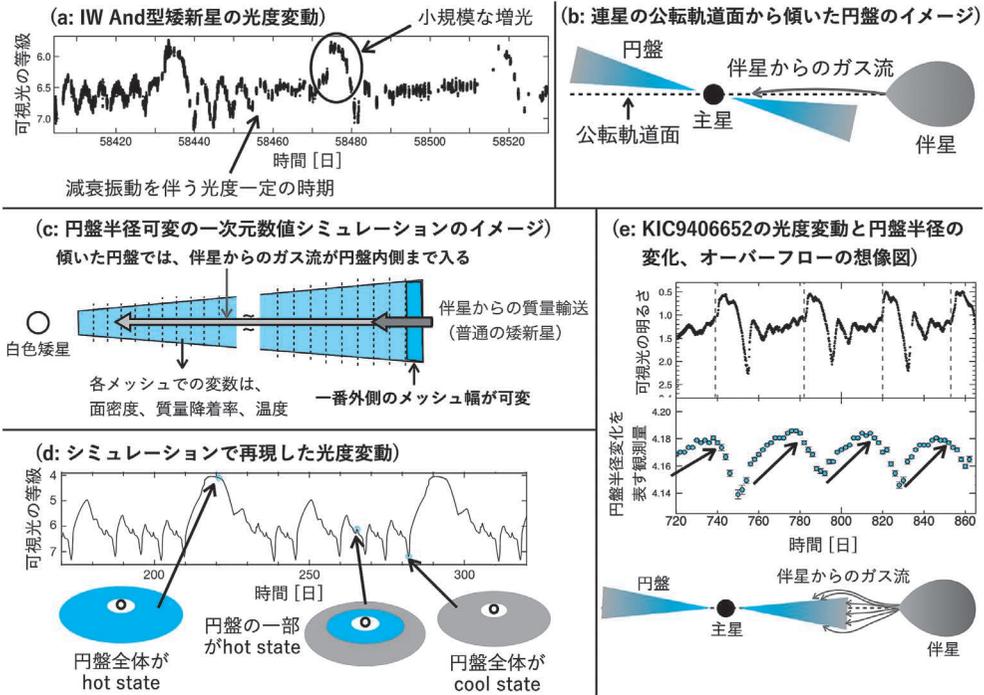


図5 (a) IW And型矮新星に特徴的な光度変動。小振幅の変動を伴う平均光度一定の時期と小規模な増光を繰り返す。増光後、急激な減光を伴う場合がある。(b) 連星系の公転軌道面から傾いた円盤のイメージ図。円盤が公転方向と逆方向に歳差運動するため、伴星からのガス流が円盤内側にも流れ込む。(c) 円盤半径可変の数値シミュレーションのイメージ図。動径方向にメッシュを区切り、質量保存、角運動量保存、エネルギー保存を解くことで、面密度、質量降着率、温度の時間進化を追う。円盤全体の角運動量保存を考えると、一番外側のメッシュの幅が変化し、幅に合わせてメッシュを足したり引いたりすることで、円盤半径が可変になる。普通の連星系では、円盤の外側にのみガス流が流れ込むが、傾いた円盤のシミュレーションでは、伴星からのガス流が円盤内側にも流れ込むようにした。(d) 数値シミュレーションで再現した光度変動。光度が高い時期は円盤全体が高温状態にあるが、中間的な光度の時期では円盤内側のみが高温状態にある。光度が低い時期は、円盤全体が低温状態にある。(a) の観測の光度変動とよく似た現象を再現できた。(e) IW And型矮新星の一つ、KIC 9406652の光度変動と円盤半径の変化。矢印で示したように、中間的な光度の状態では円盤半径が徐々に拡大しており、シミュレーションの予想とは逆であった。この問題を解決するためには、一番下に示したように、円盤の傾き角が小さく、伴星からのガス流がオーバーフローしている状態を考える必要があるかもしれない。

小さい場合に起こる、伴星からのガス流のオーバーフローを考える必要があるようです。

IW And型矮新星の研究をきっかけに、実際に自分で観測した現象を数値シミュレーションで再現するという、観測と理論の両輪の研究ができるようになりました。例えば、直近では矮新星 SS Cyg の 2021 年の異常な光度変動の X 線・可視光同時観測を行い、この天体の円盤の粘性が一時的

に上昇している可能性を示唆しましたが、実際に円盤の粘性を上げた数値シミュレーションで、似た光度変動が再現できました [19, 20]。円盤半径可変の数値計算コードは珍しく、これまでのシミュレーションでは出てこなかった現象も再現できる可能性があります。X線連星や活動銀河核、原始惑星系円盤など、他天体にも応用できるポテンシャルがあるため、現在も数値計算コードの改

る世代の方々にも、この分野の面白さを知っていただけたらと思います。

謝 辞

最後に、私の家族に感謝の意を表したいと思います。まず、仕事と子育てを両立する同志である夫に。あなたのおかげで私は孤独を感じずに家事育児ができますし、安心して研究ができます。次に、私を母にしてくれた長女に。最初は私が育てるものだと意気込んでいたけれど、気がつけばあなたに助けられています。そして、新しく家族に加わってくれた次女に。すくすく成長してくれてありがとう。お姉ちゃんのよい遊び相手になってあげてください。

参考文献

- [1] Osaki, Y., 1996, PASP, 108, 39
- [2] Hōshi, R., 1979, Prog. Theor. Phys., 61, 1307
- [3] Mineshige, S., & Osaki, Y., 1985, PASJ, 37, 1
- [4] Mineshige, S., & Wheeler, J. C., 1989, ApJ, 343, 241
- [5] Lasota, J. P., 2001, New A Rev., 45, 449
- [6] Osaki, Y., 1989, PASJ, 41, 1005
- [7] Osaki, Y., 2005, Proceedings of the Japan Academy, Series B, 81, 291
- [8] Kimura, M., et al., 2016, Nature, 529, 54
- [9] Shidatsu, M., et al., 2016, ApJ, 823, 159
- [10] Done, C., et al., 2018, MNRAS, 473, 838
- [11] Tetarenko, B., et al., 2018, MNRAS, 480, 2
- [12] Kimura, M., & Done, C., 2019, MNRAS, 482, 626
- [13] Kimura, M., et al., 2015, PASJ, 67, 101
- [14] Kato, T., 2019, PASJ, 71, 20
- [15] Gies, D. R., et al., 2013, ApJ, 775, 64
- [16] Ichikawa, S., & Osaki, Y., 1992, PASJ, 44, 15
- [17] Kimura, M., et al., 2020a, PASJ, 72, 22
- [18] Kimura, M., et al., 2020b, PASJ, 72, 94
- [19] Kimura, M., et al., 2021, PASJ, 73, 1262
- [20] Kimura, M., & Osaki, Y., 2023, PASJ, 75, 250
- [21] Noda, H., & Done, C., 2018, MNRAS, 480, 3898
- [22] Scaringi, S., et al., 2023, MNRAS, 525, L50
- [23] Kimura, S. S., et al., 2015, ApJ, 806, 159

Fascinated by Accretion Disks—Considering the Origin of the Active Universe— Mariko KIMURA

Advanced Research Center for Space Science and Technology, College of Science and Engineering, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

Abstract: Gas accretion onto compact objects via accretion disks is considered to be the central engine of the most violent transients in our universe. The best objects for investigating the accretion physics are binary systems, such as cataclysmic variables and X-ray binaries, in which a compact object and a normal star orbit each other, producing sudden brightening of the accretion disk known as outbursts. These objects have been studied for a long time, but a grand unified model explaining the variety of outbursts has not yet been established. In this article, I describe the background of this research field, the role I have played using multi-wavelength observations and numerical simulations, and future prospects.