

## 一般相対論的輻射磁気流体計算によるブラックホール降着円盤及びアウトフローの研究

### General relativistic radiation magnetohydrodynamics simulations of black hole accretion flows and outflows

朝比奈雄太  
筑波大学

#### 1. 研究目的

本プロジェクトの目的は、一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションを駆使し、降着円盤、ジェット、円盤風といったブラックホール近傍の構造とその物理を解明することである。

X線連星や活動銀河核など、コンパクトな高エネルギー天体のエネルギー源は、ブラックホールとそれを取り巻く降着円盤であると考えられている。降着円盤では、ブラックホールに落下するガスの重力エネルギーが解放されることで、強力な放射やジェット、円盤風が生じる。このような計算をするためには一般相対論的輻射磁気流体力学計算が必要である。しかしながら、一般相対論的輻射磁気流体力学計算は物理素過程が難解で、しかも計算量が膨大である。このため、世界的に見ても未だ黎明期にある。

一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションを実施するため開発を行ってきた、M1-closure と呼ばれる輻射モーメント式を近似的に解く手法を採用した UWABAMI (Takahashi et al. 2016) を用いてブラックホール周囲の降着円盤の構造やガス噴出流のメカニズムについて研究する。

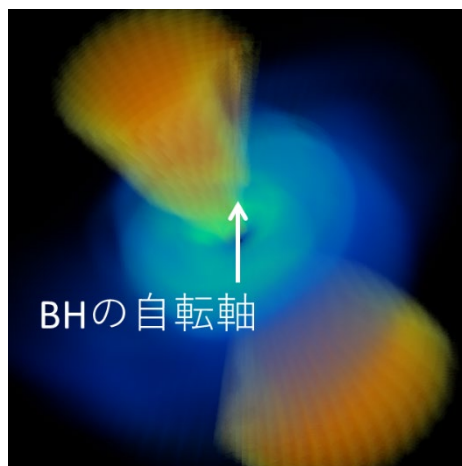
#### 2. 研究成果の内容

本年度は主に、①ブラックホールのスピンパラメータを変化させた2次元シミュレーション、②中性子星への超臨界降着の2次元シミュレーション、及び③ブラックホールの自転軸と降着円盤の回転軸が一致しない歳差運動する降着円盤の3次元シミュレーションを実施した。

①ではブラックホールのスピンパラメータの絶対値が大きいほど Blandford-Znajek 機構(Blandford & Znajek, 1977)によってパワフルなジェットが形成されることを示した。その結果をまとめた論文が *Astrophysical Journal* で出版された。

②では中性子星への質量降着の計算を実施し、観測されている熱放射温度を説明しうることを示した。また、中性子星のスピンアップ率を観測と比較し中性子星の持つ磁場強度を推定した。これらの結果をまとめた論文を *Astrophysical Journal* に登校中である。

③ではブラックホールの自転軸と降着円盤の回転軸の不一致による一般相対論的な時空の引きずりの効果によって、降着円盤が歳差運動する様子を計算することができた。また、アウトフローや輻射は主に降着円盤の回転軸方向に噴出されること、降着円盤の歳差運動に伴ってそれらの噴出方向も歳差運動することを示し、観測されている準周期的な光度変動や歳差運動する宇宙ジェットの原因となり得ることを示した。図はシミュレーション結果で青色が降着円盤、オレンジ色がアウトフローを表している。アウトフローがブラックホールの自転軸ではなく降着円盤の回転軸方向に噴出していることがわかる。



### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

前述したとおり一般相対論的輻射磁気流体力学計算は計算量が膨大である。さらにブラックホールのスピンパラメータや質量降着率の依存性を調べるためにパラメータサーベイのため多くのシミュレーションが必要になる。歳差運動する降着円盤のシミュレーションでは非軸対称な計算が必須のため、3次元計算をする必要がある。さらに歳差運動の周期が質量降着の時間スケールより非常に長いため、長時間計算しなくてはならない。このような計算コストの高いシミュレーションは本共同利用課題の計算リソースにより実現できたと考える。

### 4. 今後の展望

①については初期の磁場強度を変えた計算を実施し、磁場が非常に強い状況での降着円盤やアウトフローの構造を調べる予定である。さらにブラックホールのスピン依存性についても調べる。

②については中性子星の磁場の形状を四重極磁場を考慮したものに変更し、現在仮定している双極子磁場との違いを調べ、観測で得られている中性子星のスピンアップ率などと比較する予定である。

③については初期の密度分布やブラックホールの自転軸と降着円盤の回転軸の傾き角、質量降着率などを変化させ、歳差運動の周期やアウトフロー構造、光度変動等の依存性を調べる予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. “General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Black Hole Accretion Disks: Comparison of Methods Based on Variable Eddington Tensor and Based on M1 Closure”, Asahina, Yuta; Ohsuga, Ken, 2022, *Astrophysical Journal*, 929, 93
2. “Investigating the Disk-Jet Structure in M87 through Flux Separation in the Linear and Circular Polarization Images”, Tsunetoe, Yuh; Mineshige, Shin; Kawashima, Tomohisa; Ohsuga, Ken; Akiyama, Kazunori; Takahashi, Hiroyuki R., 2022, *Astrophysical Journal*, 931, 25
3. “Component of Energy Flow from Supercritical Accretion Disks Around Rotating Stellar Mass Black Holes”, Utsumi, Aoto; Ohsuga, Ken; Takahashi, Hiroyuki R.; Asahina, Yuta, 2022, *Astrophysical Journal*, 935, 26
4. “Diverse Polarimetric Features of AGN Jets from Various Viewing Angles: Towards a Unified View”, Tsunetoe, Yuh; Mineshige, Shin; Kawashima, Tomohisa; Ohsuga, Ken; Akiyama, Kazunori; Takahashi, Hiroyuki R., 2022, *Galaxies*, 10, 103
5. “3D photon conserving code for time-dependent general relativistic radiative transfer: CARTOON”, Takahashi, Mikiya M.; Ohsuga, Ken; Takahashi, Rohta; Ogawa, Takumi; Umemura, Masayuki; Asahina, Yuta, 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 517, 3711-3722
6. “Structure of the super-Eddington outflow and its impact on the cosmological scale”, Botella, Ignacio; Mineshige, Shin; Kitaki, Takaaki; Ohsuga, Ken; Kawashima, Tomohisa, 2022, *Publications of the Astronomical Society Japan*, 74, 384-397
7. “Large-scale outflow structure and radiation properties of super-Eddington flow: Dependence on the accretion rates”, Yoshioka, Shogo; Mineshige, Shin; Ohsuga, Ken; Kawashima, Tomohisa; Kitaki, Takaaki, 2022, *Publications of the Astronomical Society Japan*, 74, 1378-1395
8. “QWIND3: UV line-driven accretion disc wind models for AGN feedback”, Quera-Bofarull, Arnau; Done, Chris; Lacey, Cedric G.; Nomura, Mariko; Ohsuga, Ken, 2023, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518, 2693-2711

(2) 学会発表

1. 朝比奈雄太; 大須賀健, “歳差運動する超臨界降着円盤の一般相対論的輻射磁

- 気流体計算”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 12/21 - 12/23, 2022
2. 朝比奈雄太; 大須賀健, “大局的な降着円盤計算に向けた Adaptive Time Stepping 法の実装”, CfCA ユーザーズミーティング, 国立天文台/オンライン, 01/26 - 01/27, 2023
  3. 朝比奈雄太; 大須賀健, “歳差運動する超臨界降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 03/01 - 03/02, 2023
  4. 朝比奈雄太; 大須賀健, “歳差運動する超臨界降着円盤の光度変動”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 03/13 - 03/16, 2023
  5. 小川拓未; 朝比奈雄太; 大須賀健; 高橋博之; 川島朋尚, “ボルツマン輻射輸送によるコンプトン冷却を考慮した輻射非効率降着流の電子温度計算”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 12/21 - 12/23, 2022
  6. 高橋芳太; 梅村雅之; 大須賀健; 朝比奈雄太; 竹田麟太郎; 高橋幹弥; 川中宣太 相対論的流体中から放出された光子の多重散乱効果 日本天文学会 2022 年秋季年会 新潟大学 (五十嵐キャンパス) 09/13 - 09/15 2022
  7. 大野翔大; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太; 内海碧人, “一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによる降着円盤の最内縁付近の調査”, 天体形成研究会 2022, 筑波大学/Online, 11/04 - 11/05, 2022
  8. 内海碧人; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “カー・ブラックホール周りの超臨界降着円盤からのエネルギー解放; 超高光度 X 線源との比較”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 12/21 - 12/23, 2022
  9. 島田悠愛; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “突発的超臨界降着現象における降着衝撃波の研究”, 第 35 回理論懇シンポジウム コラッセふくしま/オンライン, 12/21 - 12/23, 2022
  10. 高橋幹弥; 大須賀健; 高橋芳太; 小川拓未; 梅村雅之; 朝比奈雄太, “光子数保存を保証する空間 3 次元一般相対論的輻射輸送コードの開発”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 12/21 - 12/23, 2022
  11. 井上壮大; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによる超高光度 X 線パルサーのスピンアップレート”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 12/21 - 12/23, 2022
  12. 井上壮大; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “磁化中性子星への超臨界降着流の一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション”, CfCA ユーザーズミーティング, 国立天文台/オンライン, 01/26 - 01/27, 2023
  13. 大野翔大; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太; 内海碧人, “一般相対論的輻射磁

気流体力学計算による亜臨界降着円盤の内縁構造とブラックホールスピンの研究”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 03/01 - 03/02, 2023

14. 内海碧人; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “カー・ブラックホール周りにおける Magnetically Arrested Supercritical Disk の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 03/01 - 03/02, 2023
15. 井上壮大; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “磁化した中性子星への超臨界降着流の一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 03/01 - 03/02, 2023
16. 島田悠愛; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “突発的超臨界降着現象における降着衝撃波の研究”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 03/01 - 03/02, 2023
17. 内海碧人; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “カー・ブラックホール周りにおける Magnetically Arrested Supercritical Disk の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 03/13 - 03/16, 2023
18. 大野翔大; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太; 内海碧人, “一般相対論的輻射磁気流体力学計算による亜臨界降着円盤の内縁構造とブラックホールスピンの研究”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 03/13 - 03/16, 2023
19. 島田悠愛; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “突発的超臨界降着流の一般相対論的輻射磁気流体計算: 降着構造と衝撃波について”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 03/13 - 03/16, 2023
20. 井上壮大; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによる超高光度 X 線パルサーのスピンアップレート”, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (五十嵐キャンパス), 09/13 - 09/15, 2022
21. 朝比奈雄太; 大須賀健, “回転軸が傾いた降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション”, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (五十嵐キャンパス), 09/13 - 09/15, 2022
22. 大野翔大; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太; 内海碧人, “一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによる降着円盤の最内縁構造の調査”, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (五十嵐キャンパス), 09/13 - 09/15, 2022
23. 内海碧人; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “カー・ブラックホール周りの超臨界降着円盤からのエネルギー解放; 超高光度 X 線源との比較”, 日本天文

- 学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (五十嵐キャンパス), 09/13 - 09/15, 2022
24. 小川拓未; 朝比奈雄太; 大須賀健; 高橋博之; 川島朋尚, “ボルツマン輻射輸送によるコンプトン冷却を考慮した輻射非効率降着流の電子温度計算”, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (五十嵐キャンパス), 09/13 - 09/15, 2022
  25. 島田悠愛; 大須賀健; 高橋博之; 朝比奈雄太, “突発的超臨界降着現象における輻射性衝撃波の研究”, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (五十嵐キャンパス), 09/13 - 09/15, 2022
  26. 朝比奈雄太; 大須賀健; 高橋博之; 内海碧人; 井上壮大; 高橋幹弥, “輻射磁気流体力学計算によるブラックホール近傍のプラズマ降着流・噴出流のダイナミクス”, 第 152 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会, 相模原市立産業会館/神奈川, 11/04 - 11/07, 2022
  27. 大須賀健; 高橋博之; 川島朋尚; 野村真理子; 北木孝明; 水本岬希; 嶺重慎; 朝比奈雄太; 小川拓未; 荻原大樹; 井上壮大; 内海碧人; 高橋幹弥; 尾形絵梨花; 武者野拓也 都丸亮太, “ブラックホール降着円盤およびガス噴出流の理論; これまでの進展と今後の課題”, 銀河・銀河間ガス研究会 2022, 釧路ロイヤルインホテル / オンライン, 08/08 - 08/12, 2022
  28. Asahina, Yuta, “Simulations of black hole accretion flows using GR-RMHD code INAZUMA”, The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba, Epochal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 10/13 - 10/14, 2022
  29. A. Utsumi; K. Ohsuga; H. R. Takahashi; Y. Asahina      General relativistic radiation-MHD simulations of supercritical accretion around rotating black holes 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9) Tenbusu Naha, Okinawa, Japan 09/26 - 09/30 2022
  30. A. Inoue; K. Ohsuga; H. R. Takahashi; Y. Asahina, “General relativistic radiation-MHD simulations of super-Eddington accretion flows and powerful outflows around neutron stars with dipole magnetic fields”, 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Tenbusu Naha, Okinawa, Japan, 09/26 - 09/30, 2022
  31. M. Takahashi; K. Ohsuga; R. Takahashi; T. Ogawa, M.; Umemura; Y. Asahina, “Development of Novel General Relativistic Radiative Transfer Code; CARTOON”, 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Tenbusu Naha, Okinawa, Japan, 09/26 - 09/30, 2022
  32. A. Inoue; K. Ohsuga; H. R. Takahashi; Y. Asahina, “General relativistic

magneto-hydrodynamic simulations of super-Eddington accretion flows and powerful outflows around neutron stars with dipole magnetic fields”, Magnetism & Accretion, Cape Town, South Africa, 01/16 - 01/19, 2023

33. A. Inoue; K. Ohsuga; H. R. Takahashi; Y. Asahina, “General relativistic radiation-MHD simulations of super-Eddington accretion flows onto neutron stars: spin-up rate of ULX pulsars”, Black hole astrophysics with VLBI 2023, Online/NAOJ, 02/06 - 02/08, 2023

(3) その他

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Wisteria/BDEC-01	○	45,000	0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			