

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13591

研究課題名(和文) 宇宙ジェットの加速・収束・相互作用の統一的な数値実験による全容の解明

研究課題名(英文) Unified numerical simulations on the acceleration, collimation, and interaction of astrophysical jets for a whole jet structure

研究代表者

朝比奈 雄太 (Asahina, Yuta)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：00783771

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホール近傍の降着円盤および宇宙ジェットを含むアウトフローの一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションを様々な質量降着率の降着円盤に対して実施した。ブラックホール近傍の輻射輸送をより正確に解くことのできるコードを開発し、従来の近似解法の結果と比べることで、降着円盤の回転軸など光学的に薄い領域に違いが現れることを明らかにした。また、ブラックホール近傍の結果を用いた、遠方でジェット伝播の計算を実施し、ジェットが安定に伝播できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホール近傍の輻射輸送をより正確に扱うために、輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体コードを開発した。輻射輸送方程式を直接解いたブラックホール降着流の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションは世界初である。従来採用いられていた近似解法では光学的に薄い領域で輻射の非物理的な衝突が起きてしまうが、我々の計算では非物理的な衝突は起こらず、より精緻な輻射場を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We performed general relativistic radiation magnetohydrodynamics simulations of an accretion disk and outflows including an astrophysical jet around a black hole. We developed a novel code which can solve the radiative transfer around the black hole more exactly. By comparing our results with those of an approximate method, the difference appeared around the optically thin region near the rotation axis. Next, we performed simulations of the jet propagation far from the black hole, and we showed the jet can propagate stably.

研究分野：天文学

キーワード：ブラックホール 降着円盤 宇宙ジェット 数値シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

ブラックホールなどのコンパクト天体から宇宙ジェットと呼ばれる高速なアウトフローが噴出していることが観測されている。ブラックホール周囲のガスは回転しながらブラックホールへ降着することで降着円盤を形成している。ガスが降着の際に重力エネルギーが開放され明るく輝く。また、開放された重力エネルギーの一部がジェットのエネルギー源になっていると考えられている。ブラックホール近傍で加速されたジェットは星間ガスと相互作用しながら伝播するが、空間スケールが大きく異なるため、ブラックホール近傍から星間ガスと相互作用する遠方までを一度に計算することは計算コストが非常に高くなってしまいうため難しい。ブラックホール近傍の計算とジェット伝播の計算はそれぞれ独立に実施されているため、近傍から遠方までの統一的なジェットの構造などは明らかになっていない。

### 2. 研究の目的

ブラックホール近傍の降着円盤の計算とジェット伝播の計算はこれまで別々に実施されてきたため、ジェットの統一的な構造を得ることができなかった。本研究の最初の目的は、ブラックホール近傍の降着円盤の計算を実施し、質量降着率を変化させ、ジェットなどのアウトフローの性質の依存性を明らかにすることである。また、輻射輸送の解法を従来の近似解法ではなく、直接輻射輸送方程式を解く手法を用いることで、ブラックホール近傍の物理量をより正確に求める。さらにブラックホール近傍の計算で得られた結果を用いて、計算領域を遠方まで広げたシミュレーションを実施し、遠方領域まで計算をつなげることで、ジェットのブラックホール近傍から遠方までの構造を得る。

### 3. 研究の方法

ブラックホールへのガス降着からジェットの形成・伝播までは非線形現象であるため解析的な研究は難しいことから、数値シミュレーションを実施する。降着円盤内で増幅された磁場による角運動量輸送によってガスの質量降着が起こる上、磁場によってアウトフローが加速される可能性もあるので、磁場の効果を取り入れることは重要である。また、ブラックホール近傍の計算では一般相対論的な効果も重要となる。さらに質量降着率の高い場合には開放された重力エネルギーの一部が輻射エネルギーに変換され明るく輝くため、輻射の効果も無視できない。そこで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ことが必須となる。

多くの先行研究では輻射輸送を解く際に計算コストを削減するために近似解法を用いている。ブラックホール近傍の輻射場をより正確に解くために輻射輸送方程式を直接解く数値計算コードを開発し、ブラックホール降着円盤のシミュレーションを実施する。その結果を境界条件として用いて、計算領域を拡張し、より遠方でのジェット伝播の数値シミュレーションを実施する。

### 4. 研究成果

まずは、ブラックホール近傍の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し、ジェットなどのアウトフローの性質と降着円盤の構造を調べた。ブラックホール近傍の輻射場をより正確に求めるために、輻射輸送方程式を直接解く一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA

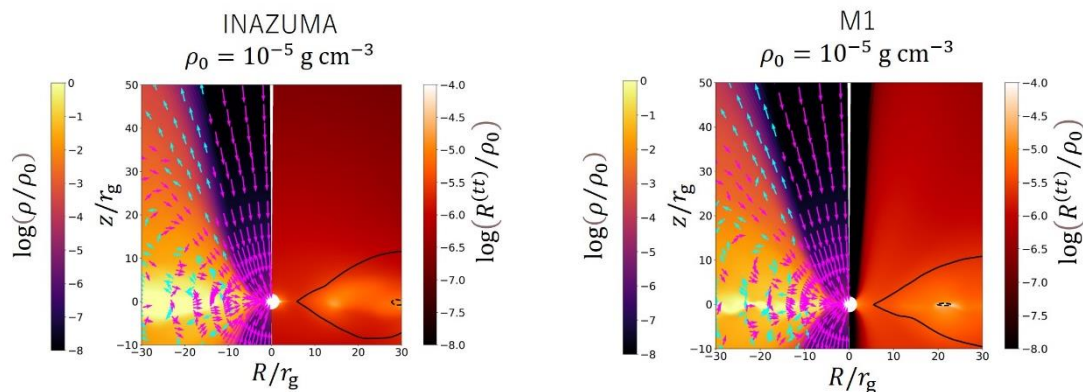


図1 質量降着率の低い降着円盤の計算結果。左図が INAZUMA コードの結果、右図が近似解法である M1 法の結果を示している。色は右側が密度、左側が輻射エネルギー密度を表しており、矢印は速度ベクトル、黒線は光学的に厚い降着円盤を表している

を開発した。ビーム交差や散乱体との相互作用、衝撃波管問題など基本的なテスト計算を実施し、近似解法である M1 法に比べて、より正確に輻射を取り扱えることを示した。この成果は The Astrophysical Journal に掲載された (Asahina, Y., Takahashi R. H., Ohsuga K., 2020)。

次に開発した INAZUMA コードをブラックホール降着円盤のシミュレーションに適用し、近似解法である M1 法と比較した。初期状態に仮定する平衡トーラスの密度を変えることで、様々な質量降着率の降着円盤のシミュレーションを実施した。図 1 はシミュレーション結果の一例を表している。赤道面付近に光学的に厚い降着円盤が形成され、斜め方向に光速の 30% 程度の速度を持つアウトフローが形成された (図の右側)。また降着円盤からの輻射が計算領域を満たしていることがわかる (図の左側)。INAZUMA では回転軸付近まで輻射エネルギー密度が満たされているのに対して、M1 法では輻射エネルギー密度が小さくなっている。これは輻射が非物理的な衝突をしてしまうため回転軸まで到達できないことが原因である。このように INAZUMA と M1 の間で、密度や速度に大きな違いは現れなかったが、回転軸付近の輻射エネルギー密度の違いが現れることを示すことができた。また、速度や密度に大きな違いはないため、アウトフローの質量流出率や運動エネルギーフラックスにも大きな違いは見られなかった。輻射光度についても、輻射フラックスに数倍程度の違いは現れるものの、時間変動による分散の方が大きいため、有意な違いは現れなかった。

図 2 は輻射ストレステンソルと輻射エネルギー密度の比であるエディントンテンソルの  $rr$  成分の質量降着率依存性を表している。光学的に厚い領域に関しては INAZUMA と M1 法に大きな違いは見られないが (図中の青点と緑点)、光学的に薄い領域である回転軸付近では M1 法の方が値が大きくなっている。これは光学的に薄い領域で輻射が非物理的な衝突を起こし、 $r$  方向に輻射が曲げられてしまうためである。このように降着円盤の回転軸付近の輻射場を正確に解くためには INAZUMA コードを用いる必要があることがわかった。以上の成果は The Astrophysical Journal に掲載された (Asahina Y., Ohsuga K., 2022)。

最後に、以上のブラックホール近傍の計算結果を用いてより遠方のジェット伝播のシミュレーションを実施した。図 3 の左図はブラックホール近傍のシミュレーション結果、右図はより遠方のジェット伝播のシミュレーション結果を表している。降着円盤の回転軸付近に密度の低いジェットが形成されており、その領域で輻射エネルギー密度が高くなっていることがわかる。遠方の計算を実施することで、このような密度、輻射エネルギー密度構造が回転軸方向に伸びることを示すことができた。また、斜め方向にはやや密度の高い円盤風が噴出しており、円盤風も遠方まで伝播していることがわかる。このときのジェットの速度は光速の約 50% 程度で、円盤風は光速の 20-30% 程度であった。以上のようにブラックホール近傍で発生したアウトフローが遠方まで伝播していく様子を計算することに成功した。

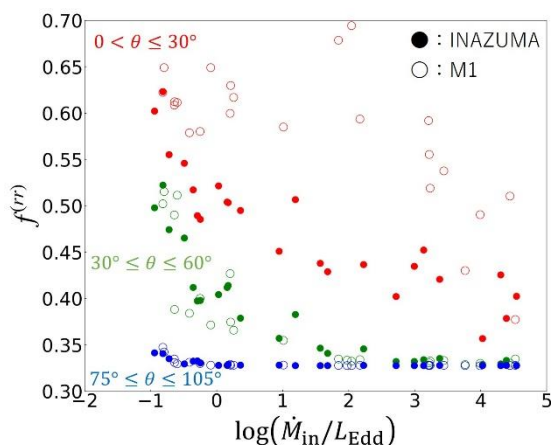


図 2 エディントンテンソルの  $rr$  成分の質量降着率依存性。塗りつぶされた点が INAZUMA の結果を表し、塗りつぶされていない点が M1 法の結果を表している。色は赤が回転軸付近、緑が斜め方向のアウトフロー領域、青が赤道面付近の降着円盤領域を表している

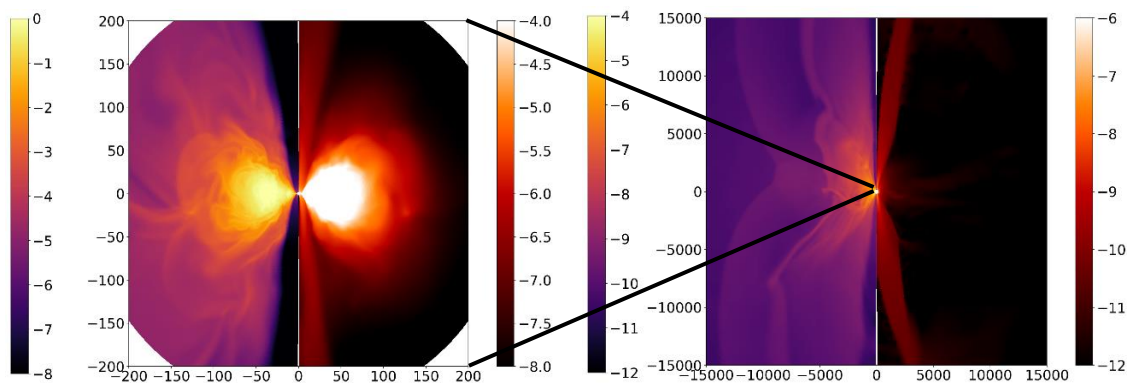


図 3 左図はブラックホール近傍の降着円盤シミュレーションの計算結果、右図は計算領域を拡大したジェット伝播シミュレーションの計算結果である。図の左側が密度分布、右側がエネルギー密度分布を表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Asahina Yuta, Ohsuga Ken	4. 巻 929
2. 論文標題 General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Black Hole Accretion Disks: Comparison of Methods Based on Variable Eddington Tensor and Based on M1 Closure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 93 ~ 93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac5d37	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Asahina Yuta, Takahashi Hiroyuki R., Ohsuga Ken	4. 巻 901
2. 論文標題 A Numerical Scheme for General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Based on Solving a Grid-based Boltzmann Equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 96 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abaf51	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計44件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 高橋博之, 大須賀健, 川島朋尚, 朝比奈雄太, 内海 碧人, 井上 壮大
2. 発表標題 超臨界降着流の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション
3. 学会等名 W50/SS433研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, 川島朋尚
2. 発表標題 磁化中性子星への超臨界降着流によるアウトフロー ; 駆動機構とその温度について
3. 学会等名 中性子星研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川拓未, 朝比奈雄太, 大須賀健, 高橋博之
2. 発表標題 Boltzmann法によるカー・ブラックホール近傍の輻射輸送
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太
2. 発表標題 磁化中性子星への超臨界降着流によるアウトフロー; 駆動機構とその温度について
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚, 野村真理子, 嶺重慎, 朝比奈雄太, 内海碧人
2. 発表標題 ブラックホール降着流・噴出流の研究~これまでの成果と今後の課題~
3. 学会等名 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性I
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 測地線に沿った空間3次元一般相対論的輻射輸送コードの開発
3. 学会等名 第34回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太
2. 発表標題 一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションで探る超臨界降着円盤
3. 学会等名 第34回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝比奈雄太, 高橋博之, 大須賀健
2. 発表標題 GR-RMHDコードINAZUMAによるブラックホール降着円盤シミュレーション: スピン依存性
3. 学会等名 第34回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太
2. 発表標題 一般相対論的輻射磁気流体計算を用いたカー・ブラックホール周りの超臨界降着流の研究
3. 学会等名 令和3年度 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太
2. 発表標題 一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションで探る超臨界降着円盤のブラックホールスピン依存性
3. 学会等名 ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朝比奈雄太, 高橋博之, 大須賀健
2. 発表標題 輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMAによるブラックホール降着流計算
3. 学会等名 ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太
2. 発表標題 磁化中性子星への超臨界降着流によるアウトフローについて
3. 学会等名 ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋博之, 大須賀健, 川島朋尚, 朝比奈雄太, 内海碧人, 井上壮大
2. 発表標題 ブラックホール降着円盤の数値シミュレーション; 研究の今後と発展
3. 学会等名 ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太
2. 発表標題 一般相対論的輻射磁気流体計算で探る、カー・ブラックホール周りの超臨界降着円盤
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 芳太, 梅村 雅之, 大須賀 健, 朝比奈 雄太
2. 発表標題 相対論的流体中での因果律を保った光子多重散乱効果
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川 拓未, 朝比奈 雄太, 大須賀 健, 高橋 博之, 川島 朋尚
2. 発表標題 Boltzmann輻射輸送によるCompton冷却を考慮したRIAF円盤の電子温度計算
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内海 碧人, 大須賀 健, 高橋 博之, 朝比奈 雄太
2. 発表標題 一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションで探る超臨界降着円盤のブラックホールスピン依存性
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 測地線に沿った一般相対論的輻射輸送コードの開発と適用
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会2022
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 高橋 芳太, 梅村 雅之, 大須 賀健, 朝比奈 雄太
2. 発表標題 相対論的流体中での因果律を保った光子多重散乱効果
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会2023
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朝比奈 雄太, 高橋 博之, 大須 賀健
2. 発表標題 ブラックホール降着流の一般相対論的輻射磁気流体計算: 質量降着率依存性
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝比奈 雄太, 高橋 博之, 大須 賀健
2. 発表標題 輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMAによるブラックホール降着流計算
3. 学会等名 第33回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝比奈 雄太, 高橋 博之, 大須 賀健
2. 発表標題 一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMAを用いたブラックホール降着流シミュレーション
3. 学会等名 令和2年度 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 GR-RMHDコードINAZUMAによるブラックホール降着流シミュレーション
3. 学会等名 ブラックホール降着流ミニ研究報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 一般相対論的輻射磁気流体コードINAZUMAによるブラックホール降着流シミュレーション
3. 学会等名 第4回FORCE研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 輻射輸送方程式を解くGR-RMHDコードINAZUMAによるブラックホール降着流シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Asahina, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga
2. 発表標題 GRRMHD simulations of black hole accretion flows solving Boltzmann equation
3. 学会等名 Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Asahina, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga
2. 発表標題 GR-RMHD simulations of black hole accretion flows
3. 学会等名 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 ポルツマン方程式を解くGRRMHDコードの開発と降着円盤への適用
3. 学会等名 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第6回ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 ポルツマン方程式を解くGRRMHDコードの開発と降着円盤への適用
3. 学会等名 銀河系中心部研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Asahina, Hiroyuki Takahashi, Ken Ohsuga
2. 発表標題 General relativistic RMHD simulations of accretion flows
3. 学会等名 9th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (EASW9) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 超臨界降着流の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Asahina, Hiroyuki Takahashi, Ken Ohsuga
2. 発表標題 General relativistic radiation MHD simulations of supercritical accretion flows
3. 学会等名 11th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Asahina, Hiroyuki Takahashi, Ken Ohsuga
2. 発表標題 Development of a general relativistic radiation magnetohydrodynamical code based on solving the Boltzmann equation
3. 学会等名 The cosmos at high energies: exploring extreme physics through novel instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 ボルツマン方程式を解く超臨界降着流の一般相対論的MHDシミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝比奈雄太、野村真理子、大須賀健
2. 発表標題 活動銀河核アウトフローによる星間空間フィードバック
3. 学会等名 銀河系中心部研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 ボルツマン方程式を解いた一般相対論的輻射磁気流体コードの開発
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 ボルツマン方程式を解いた一般相対論的輻射磁気流体コードの開発
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 Development of a general relativistic radiation magnetohydrodynamical code based on solving Boltzmann equation
3. 学会等名 AAPPS-DPP (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 ボルツマン方程式を解いた一般相対論的輻射MHDコードの開発
3. 学会等名 第31回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 ボルツマン方程式を解く一般相対論的磁気流体コードの開発
3. 学会等名 CfCAユーザーズミーティング
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 General relativistic radiation magnetohydrodynamic simulations of accretion flows
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 Development of a GR-RMHD code based on solving the Boltzmann equation
3. 学会等名 Radiation Hydrodynamic Approaches to the Study of Black Hole Accretion and Outflows
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 ポルツマン方程式を解く降着円盤のGR-RMHDシミュレーション
3. 学会等名 ブラックホール降着流ミニワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健
2. 発表標題 ポルツマン方程式を解く一般相対論的磁気流体コードによる超臨界降着流シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関