

jh160007-NAJ

次世代降着円盤シミュレータの開発

廣瀬重信（国立研究開発法人海洋研究開発機構）

降着円盤は、重力天体の周りに形成される回転ガス円盤であり、降着ガスの重力エネルギーを磁気エネルギーや輻射エネルギーに変換するエンジンとして、様々な天体活動現象を駆動している。本研究課題では、この降着円盤におけるエネルギー変換過程を第一原理から理解するために、角運動量輸送を担う乱流や、輻射輸送、一般相対論的效果など、多様な物理を統合的に扱うことのできる「次世代降着円盤シミュレータ」の開発を目指している。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学

(2) 共同研究分野

■ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

■ 全体統括（廣瀬重信・松元亮治）

■ 一般相対論的輻射磁気流体力学（大須賀健・高橋博之・朝比奈雄太）

■ 輻射スペクトル（川島朋尚・町田真美）

■ 自己重力ポアソンソルバー/陰解法（廣瀬重信・松本倫明・簗島敬・花輪知幸・中島研吾・伊田明弘・松本正晴・河合直聡）

■ コード整備（松本洋介・工藤祐己）

現行の「降着円盤シミュレータ」では、磁気流体力学シミュレーションによって磁気乱流を取り扱うことで、現象論的な角運動量パラメータを導入することなく、降着円盤の時間発展を調べることを可能にしているが、その対象は非相対論的な現象に限られていた。また、輻射輸送や熱伝導については（その時間スケールが、多くの場合、降着円盤の力学時間よりも極端に短くなるため）時間陰解法で解く必要があるが、その計算効率の向上が課題となっている。そこで、本課題では、現行の「降着円盤シミュレータ」を改訂し、その適用可能範囲を拡大するとともに、計算性能を向上させた「次世代降着円盤シミュレータ」を開発することを目的とする。

（意義）

降着円盤は、近接連星系や、活動銀河中心核、星形成領域等で観測される激しい時間変動や X 線放射、ジェット噴出などを伴う様々な活動現象を駆動している。また、太陽系をはじめとする惑星系形成の母体となる原始惑星系円盤も降着円盤の一種である。したがって、降着円盤の構造や安定性、時間変動、輻射スペクトル、ジェット噴出機構等を解明することは、理論天体物理学の中心テーマの一つである。

本課題を通して、輻射輸送、熱伝導、自己重力、一般相対論効果などを取り入れた「次世代降着円盤シミュレータ」が構築されることにより、様々な重力天体の周囲の降着円盤シミュレーションに対応できるほか、降着円盤のダイナミクスと無撞

2. 研究の目的と意義

（目的）

降着円盤は、重力天体の周りに形成される回転ガス円盤であり、降着ガスの重力エネルギーを磁気エネルギーや輻射エネルギーに変換するエンジンとして、様々な天体活動現象を駆動している。我々のグループでは、この過程を第一原理からシミュレーションするために、磁気乱流による角運動量輸送や、物質と輻射の相互作用（運動量交換とエネルギー交換）、高温領域と低温領域間での熱伝導、星形成や活動銀河核においては自己重力、ブラックホール近傍においては一般相対論的效果など、多様な物理を統合的に扱うことのできる「降着円盤シミュレータ」の開発を目指している。

着な輻射場が得られることになり、シミュレーション結果を観測結果と直接比較することが可能になる。実際、こういったシミュレーション結果の「観測的可視化」は、本格稼働を始めているアルマ望遠鏡など、精密化する観測を活かすためにも必須である。

現在、流体力学計算と組み合わせるために用いられている、角度モーメントを用いた輻射輸送解法は、クロージャ問題という本質的な問題を抱えている。これに対し、本課題の開発項目の一つである、輻射輸送方程式の直接解法はこの問題を解決する最終手段であるが、基本的に（空間 3 次元・光線方向 2 次元・振動数 1 次元の）6 次元計算となり、その計算量は膨大になる。「京」コンピュータを用いても本格的な計算は難しいが、ポスト「京」においては、むしろ本命の計算課題となることが予想される。したがって、本課題を通してそのプロトタイプを開発しておくことは、ポスト「京」に向けて、重要なステップとなる。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

降着円盤のシミュレーションでは、典型的に回転周期の数百倍の時間発展を追う必要があり、そのための時間ステップは数百万ステップに及ぶ。そのため、上記の多様な物理プロセスを取り入れた、本格的な 3 次元プロダクトランには「京」コンピュータでの計算が必須となる。そこで、東京大学情報基盤センターの FX10 を用いて、「京」の利用に向けたコードの開発・最適化およびテスト計算を行う。

また、上述のように、輻射輸送や熱伝導を陰解法で解く場合や、自己重力を考慮する場合は、行列反転を高速に行うことが課題である。現在は、ガウスザイデル法+マルチグリッド法の組み合わせを適用しているが、必ずしも効率が良いとは言えない。そこで、東京大学情報基盤センターの中島研吾氏のグループと協力し、マルチグリッド法の代わりに、クリロフ部分空間法を適用することによりコードの高速化が可能か検証を行う。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

A) 一般相対論的輻射磁気流体力学コードの開発

我々はこれまで特殊相対論的輻射磁気流体コードを用いて超臨界（Eddington 降着率を超える）降着円盤からのアウトフロー加速について研究を行ってきた。しかし、この計算ではブラックホールによる重力を、ニュートン近似を用いて扱ってきた。従ってブラックホール周りの重力による光線の曲がりや、ブラックホールの回転といった効果を無視していた。また、計算は軸対称を仮定していたため、円盤内のダイナモ機構を追う事が出来ないといった課題が残っていた。

これらの問題を解決すべく我々は 3 次元一般相対論的輻射磁気流体コードを構築した。基礎方程式は以下である。

$$\begin{aligned}\partial_t(\sqrt{-g}\rho u^t) + \partial_j(\sqrt{-g}\rho u^j) &= 0 \\ \partial_t(\sqrt{-g}T_v^{\mu t}) + \partial_j(\sqrt{-g}T_v^{\mu j}) &= \sqrt{-g}T_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda + \sqrt{-g}G_\nu \\ \partial_t(\sqrt{-g}R_v^{\mu t}) + \partial_j(\sqrt{-g}R_v^{\mu j}) &= \sqrt{-g}R_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda - \sqrt{-g}G_\nu \\ \partial_t(\sqrt{-g}B^i) + \partial_j[\sqrt{-g}(b^j u^i - b^i u^j)] &= 0\end{aligned}$$

上から順に質量保存、磁気流体・輻射のエネルギー運動量保存式、誘導方程式である。 $g_{\mu\nu}, \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda$ はメトリックの行列式とクリストッフェル記号で重力やブラックホールの回転の効果を表す。

輻射場は輻射強度を運動量空間で積分したモーメント量 によって定式化され、M1 クロージャを用いることで方程式を閉じる。輻射とガスは吸収・散乱過程により輻射 4 元力 を通じてエネルギー・運動量のやり取りを行う。従ってこれらの式を解くことでガスと輻射を無矛盾に決定する事が出来る。本計算ではガスと輻射の相互作用として電子散乱と自由-自由吸収を考慮した。

このコードを用いて計算を行った結果、降着円盤内縁半径が従来の理論的考察よりも外側にあること、ブラックホールが高速回転している場合に円盤内縁の温度が無回転の場合よりも高温になることなど、一般相対論的効果が重要となる、新しい結果が得られている。

B) 角度モーメントを用いない輻射輸送コードの開発

A) の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーショ

ンにより得られたブラックホール超臨界降着流の輻射スペクトルを計算するために、モンテカルロ法に基づく輻射スペクトル計算コード開発を進めている。前年度には 5 次および 8 次の embedded Runge-Kutta 法 (adaptive stepsize control アルゴリズムにより、積分のステップ幅を変化させながら計算する Runge-Kutta 法) を用いた測地線方程式ソルバーを作成した。さらに、磁場の方向を考慮したシンクロトロン放射・吸収の計算モジュールを作成した。

C) 行列反転コード (熱伝導・輻射拡散などの陰解法や自己重力ソルバ) の高効率化

昨年度は、東京大学情報基盤センターの中島研吾氏らによって開発された差分法向けに最適化された行列解法ライブラリを、熱伝導問題に適用するための基本的なコード開発を行った。一方で、熱伝導のタイムスケールが降着円盤の力学時間に比べてそれほど短くない場合には、Super-time stepping 法がむしろ有効であることを確かめた。

5. 今年度の研究成果の詳細

A) 一般相対論的輻射磁気流体力学コードの開発

昨年度に引き続き、実用問題を通して、コードの適用範囲拡大を進めている。以下に、本年度の科学的成果をまとめる。

昨年度までの計算では超臨界降着円盤の中心天体としてブラックホールを想定していた。しかし 2014 年に、これまでブラックホール超臨界降着円盤が中心エンジンであると考えられてきた超高光度 X 線源 (ULX) の 1 つが中性子星である (ULX パルサー) ことがわかった。つまり、ブラックホールと異なり硬い表面を持つ中性子星でも大量のガス降着が可能であることが示された。

そこで、今年度前期では、我々は中性子星への超臨界降着が本当に可能か、そして降着に付随するアウトフローや光度はブラックホールと異なるのかを調べた。この目的のため、まずは簡単のために中性子星の磁場は十分に弱く、無視できると仮定した。計算は昨年度と同様、一般相対論的輻

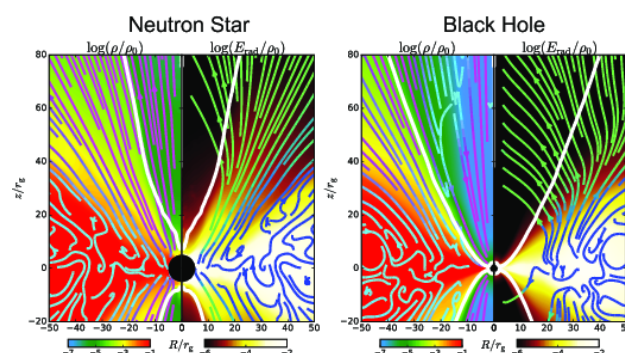


図 1 中性子星(左)とブラックホール(右)へのガス降着の様子。カラーはガス密度(左)と輻射エネルギー密度(右)、線はガス(左)と輻射(右)の流線、白線は光球面を示す。

射磁気流体コードを用いるが、ガスと輻射の相互作用として電子散乱と自由-自由吸収の他に熱的 Compton 散乱も考慮した。

図 1 にその結果を示す。中性子星近傍でのガス降着率は Eddington 降着率の 100 倍程度であり、中性子星へのガス降着が可能であることがわかる。しかし中心天体近傍を見ると中性子星とブラックホールで結果が異なる。ブラックホールの場合、ガスや輻射エネルギーは中心天体へと吸い込まれるため、ブラックホールへの流入口とアウトフローによる放出口の場所がはっきりと異なる。一方で中性子星の場合はガスやエネルギーを吸い込むことができないため、中性子星近傍にガスと質量が溜まっているのがわかる。この貯められたエネルギーによって非常に強いアウトフローを作ることがわかった。200 重力半径でのパワーを見積も

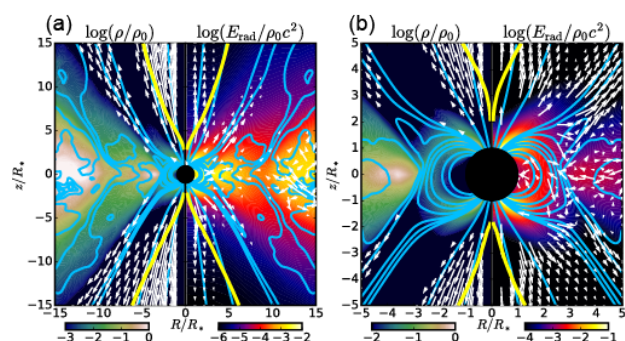


図 2 双極磁場を持つ中性子星への超臨界降着の様子。カラーは密度(左)と輻射エネルギー(右)、矢印は速度場(左)と輻射フラックス(右)、青線は磁力線を示す。

ると、ブラックホールでは輻射による光度が最も大きく、Eddington 光度を超えるが、運動エネルギーのパワーは Eddington 光度を下回る。一方で中性子星では運動エネルギーによるパワーが最も大きく、その次に輻射光度が大きい。このように同程度の降着率でもアウトフローの組成はブラックホールと中性子星で異なることがわかった。さらに全アウトフロー強度(輻射+運動エネルギー)も中性子星の方が大きい。したがって観測される ULX のある程度の割合は中性子星で説明することが可能であることがわかった。

本年度後期では、強磁場中性子星を想定し、中性子星の持つ双極磁場と円盤の相互作用を調べるために同様の 2 次元計算を行った。前期の研究との大きな違いは中性子星が 10^{10} Gauss の双極磁場を持つこと、また、強磁場中性子星を考えているため、シンクロトロン放射を考慮したことである。この結果を図 2 に示す。

中性子星より遠方では双極磁場のエネルギーは非常に小さいため、弱磁場中性子星の場合同様、超臨界降着円盤が形成される。しかし中性子星近傍 ($R=3R_*$, $R_*=10\text{km}$ は中性子星半径) では円盤が途切れていることがわかる。これは双極磁場による磁気圧が卓越することで、円盤による降着が遮られるためである。従って円盤が途切れる半径 $=3R_*$ は円盤の輻射圧と双極磁場の磁気圧が釣り合う半径で決まる。この半径より内側では磁場が卓越する磁気圏が形成される。

磁気圏より遠方では磁気回転不安定性によって角運動量が外側へ輸送され、その結果ガス降着が起こる。しかし磁気圏半径付近では磁場が強く、磁気回転不安定性は働かない。しかしこの半径では双極磁場による磁気トルクが非常に効率的に働くために角運動量は内側へと輸送され、ガス降着が起こる。その結果、磁気圏内ではガスは磁力線に沿って中性子星の磁極に向かって降着し、中性子星表面に降着柱を形成する。また、双極磁場によって引き抜かれた角運動量は最終的に中性子星へと渡され、中性子星のスピンアップに繋がる。本計算で見積もられたスピンアップ率は 10^{-11} s

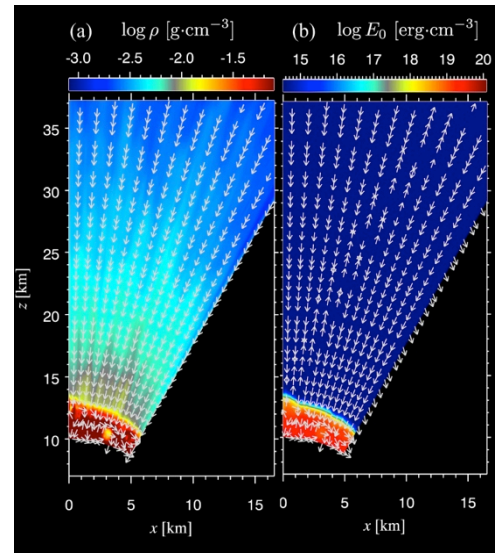


図 3 中性子星への柱状の超臨界降着の様子。(a)質量密度分布(色)とガス速度の向き(矢印)。(b)輻射エネルギー密度分布(色)と輻射フラックスの向き(矢印)。

s^{-1} となり、これは観測される ULX パルサーと同程度であることがわかった。

また、本年度前期では、上記の研究で示されるような中性子星極冠へと落下するガスの輻射流体シミュレーションを実施している(図3)。その結果、輻射は柱状の超臨界降着流の側面から抜け出し、Eddington 光度のおよそ 100 倍に到達できることを明らかにした。これはパルスを示す ULX の 1 つである M82 X-2 の光度をよく再現している。この輻射流体シミュレーションによって「中性子星への柱状の超臨界降着が ULX の莫大な光度とパルス放射の両方を説明可能である」ことを示し、プレスリリースを行った。

以上では、降着ガスは柱状の領域内を自由に動くことが可能であると想定したが、さらに磁場が強い状況では完全に双極磁場に沿った方向にしかガスの運動が許されないと考えられる。そこで、本年度後期では、ガスの運動方向を制限した状況での輻射流体シミュレーションへとコードの改良を行った。プレリミナリーな結果は得られつつあり、柱状であった構造が大幅に変わることがわかった。ガスは柱の外壁に沿って降着するものの、柱内部のガスが吹き飛ばされるため、中の抜けた筒状の構造になることがわかった。この場合でも

光度はエディントン光度を超え、ULX パルサーのモデルとなり得ることがわかった。

C) 行列反転コード（熱伝導・輻射拡散などの陰解法や自己重力ソルバ）の高効率化

本年度は、特に輻射輸送問題の陰解法に対して、これまでのフルマルチグリッド法の代わりに、前処理付き BiCGSTAB 法の適用を試みた。具体的には、

- ・ガスエネルギー式（非線形項）
- ・輻射エネルギー式（非線形項＋線形拡散項）

の二本の方程式を連立させて、時間陰的に解く。つまり、非線形方程式を解くニュートン・ラプソン法の反復ループの内側で、線形問題（拡散方程式の陰解法）を解くことになる。

この線形問題を解くのに、これまでフルマルチグリッド法のサイクルを 1～2 回決め打ちで繰り返し、その結果を外側のニュートン・ラプソン法の反復ループに返していた。したがって、必ずしも線形問題を厳密に解いていたわけではなかったが、結果的に、（最終的に解きたい）非線形問題のニュートン・ラプソン法のループは数回～数十回の反復で収束していた。

今年度前期では、このフルマルチグリッド法をそのまま、前処理付き BiCGSTAB 法に置き換えた。BiCGSTAB 法では前処理が重要であるが、まず手始めに、簡単のため、SOR 法あるいはガウスザイデル法（決め打ちで 20 回反復）を前処理に用いることにした。

このように作成したコードを用いて、具体的な問題として、原始惑星系円盤における輻射輸送問題を解いてみた結果（テスト計算のため手元のパソコンで 1 コアを用いたもの）を以下の表に示す。このテスト結果からは、特に今回の問題（ニュートン・ラプソン法の反復ループ内の近似解を求める問題）に対しては、前処理付き BiCGSTAB 法は有

効と認められないという結果になった。

今年度後期では、

- BiCGSTAB 法の代わりに GCR 法を用いる
 - BiCGSTAB 法の前処理に GCR 法を用いる
- という方法も試みたが、いずれも、外側の非線形問題（ニュートン法）の反復がある程度進むと、内側の線形問題（GCR 法または BiCGSTAB 法）が収束しなくなる、という結果になった。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

A) 一般相対論的輻射磁気流体力学コードの開発

2014 年に中性子星への超臨界降着現象が観測的に指摘され、2016 年には同様の現象が他の 2 つの天体でも観測された。これら ULX パルサーと呼ばれる天体はコンパクト天体の観測分野で非常にホットな話題となっている。しかしその一方で、理論は進んでおらず、特にシミュレーション研究はその難しさから全く研究がなされてこなかった。今年度に行った双極磁場を持つ中性子星への超臨界降着の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションは理論研究のマイルストーンとなる研究と考えている。

その一方でこの研究では回転軸対称を仮定していること、磁場強度が観測から示唆されている値よりも 2-3 桁小さい、という問題がある。前者の仮定は円盤降着の場合は比較的よい近似となりうるが、3 次元効果を考慮した場合、磁気圏半径で非軸対称不安定性が成長するため、今後詳細な研究が必要である。また磁場強度についてもより広いパラメータ空間で計算し、観測との比較が必要となる。

B) 角度モーメントを用いない輻射輸送コードの開発

観測との比較においては、一般相対論的輻射輸送計算コードの開発を進めている。歪んだ時空中

	線形計算 L2 ノルム	BiCGSTAB 法反復数	Newton 法反復数	計算時間(秒)
Full MG	0.1-0.5 (FMG サイクル 1 回)	N/A	15	15
BiCGSTAB	0.0001	80-100	9	400
	0.5	10-40	18	164

での光の伝搬および電子と光子の散乱のテスト計算についてはすでに成功している。今後は実用化に向けたチューニングを行う計画である。

加えて、これまで採用してきた近似法である M1-closure 法を変動エディントン因子法へと発展させることで、より精緻な輻射流体シミュレーションを行うことも必要である。この新たなコードの開発も進める計画である。

C) 行列反転コード（熱伝導・輻射拡散などの陰解法や自己重力ソルバ）の高速化

本項目では、昨年度まで用いていた、フルマルチグリッド法の代わりに、前処理付き BiCGSTAB 法を用いる方法を試すことができた。これまで、本項目の進捗の障壁となったのは、既存の行列反転ライブラリを用いるためには、線形拡散方程式の拡散係数から行列要素データを作成しなければならない点である。特に、ここで対象としている問題はデカルト座標を用いているが、そのうち x 方向にずれ周期境界を用いているため、行列が複雑な非対称行列となり、かつ、その「ずれ」の量が毎時間ステップ異なるため、行列要素データの作成が非常に煩雑になる。さらに、ガウス・ザイデル法を用いていたユーザー側が、行列要素データの取扱いに慣れていないという点も、実際上大きな問題であった。

今年度は、東京大学情報基盤センターの河合直聡氏の監修のもと、BiCGSTAB 法のアルゴリズムでは、行列が常に「行列とベクトルの積」で現れることに着目し、その部分の計算を既存のガウス・ザイデル法のコード（の再利用）で実行するプログラムを作成した。実際、こうすることで、ユーザー側からは、行列を意識せずに BiCGSTAB 法を用いることが出来る他、ずれ周期境界を含め、複雑な境界条件にも柔軟に対応できるというメリットがある。

ただし、前節で示した通り、テスト計算の結果では、今回作成した、前処理付き BiCGSTAB 法の有効性は認められなかった。その理由は今後の検討課題であるが、今回の問題では、行列反転があく

までニュートン・ラブソン法の反復ループ内で有効な近似解を求める手段に過ぎない、という点がポイントであると思われる。今後の展望としては、今年度は完成に至らず試すことができなかったが、マルチグリッド法を前処理とした BiCGSTAB 法、および、ニュートン・クリロフ法の有効性をぜひ確かめたいと考えている。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- Kawashima, T., Matsumoto, Y., Matsumoto, R., ‘A Possible Time-Delayed Brightening of the Sgr A* Accretion Flow after the Pericenter Passage of G2 Cloud’, Publications of the Astronomical Society of Japan, in press
- Ogawa, T., Mineshige, S., Kawashima T., Ohsuga, K., Hashizume, K., ‘Radiation hydrodynamic simulations of a super-Eddington accretor as a model for ultra-luminous sources’, Publications of the Astronomical Society of Japan, in press
- Nomura, M., Ohsuga, K., ‘Line-driven disc wind model for ultrafast outflows in active galactic nuclei – scaling with luminosity’, 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 465, 2873
- Takahashi, H.R., Ohsuga, K., ‘Formation of Overheated Regions and Truncated Disks around Black Holes: Three-dimensional General Relativistic Radiation-magnetohydrodynamics Simulations’, 2016, The Astrophysical Journal, 826, 23
- Kawashima T., Mineshige S., Ohsuga K., Ogawa T., ‘A radiation-hydrodynamics model of accretion columns for ultra-luminous X-ray pulsars’, 2016, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, 83

- Dwarf nova outbursts with magnetorotational turbulence, M. S. B. Coleman, I. Kotko, O. Blaes, J.-P. Lasota, S. Hirose, Mon Not R Astron Soc (2016) 462 (4): 3710-3726.
- Convective quenching of field reversals in accretion disc dynamos, Matthew S. B. Coleman, Evan Yerger, Omer Blaes, Greg Salvesen, Shigenobu Hirose, Mon Not R Astron Soc (2017) 467 (3): 2625-2635.
- The contribution of bulk Comptonization to the soft X-ray excess in AGN, J. Kaufman, O. M. Blaes, S. Hirose, Mon Not R Astron Soc (2017) 467 (2): 1734-1747.
- Gravito-turbulence in irradiated protoplanetary discs, Shigenobu Hirose, Ji-Ming Shi, Mon Not R Astron Soc stx824. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx824>
- Matsumoto, T., Machida, M. N, Inutsuka, S-I., 'Circumstellar disks and outflows in turbulent molecular cloud cores: possible formation mechanism for misaligned systems', The Astrophysical Journal, 839:69 (14pp), 2017 April 10
- March 3-4, 2017 (招待講演)
- Kawashima T., 'Radiation Hydrodynamic Models for ULXs and ULX-pulsars', Ultra-Luminous X-ray Source 研究会 - 多波長で探る降着系の統一描像、口頭発表, Kanagawa (Japan), March 3-4, 2017 (招待講演)
- Kawashima T., 'A possible time-delayed brightening of the Sgr A* accretion flow after pericenter passage of G2', Challenges of AGN Jets、口頭発表, Tokyo (Japan), January 17-20, 2017 (招待講演)
- Ohsuga, K. 'Theory of ultra-luminous X-Ray sources', Breaking the Limits: Super-Eddington Accretion on Compact Objects, Sardinia (Italy), September 19-23, 2016 (招待講演)
- Takahashi, H. R. 'Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks', East Asian Numerical Astrophysics Meeting, Beijing (China), October 24-28, 2016 (招待講演)
- Takahashi H. R. 'Accretion and outflows observed in GRRMHD Simulations', ULXs and their environments, Strasbourg (France), June 13-16 (口頭発表)
- Takahashi H. R. "Relativistic Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks", International Congress on Plasma Physics, Takao (Taiwan), June 27-July 1, 2016 (招待講演)
- "Thermal equilibrium curves obtained by radiation MHD simulations", Shigenobu Hirose, in Simulations and Modelling of Relativistic MHD Accretion Disks, Oxford University, July 10-15, 2016 (招待講演)
- "Gravito-turbulence in irradiated protoplanetary disks", Shigenobu Hirose, in "Confronting MHD Theories of Accretion Disks with Observations", Kavli Institute

(2) 国際会議プロシーディングス

N/A

(3) 会議発表(口頭, ポスター等)

国際会議発表

- Takahashi H. R., 'General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Disk Accretion onto a Black Hole or a Neutron Star', The US-Japan Workshop and School on Magnetic Reconnection, Ehime (Japan), March, 19-23, 2017 (招待講演)
- Takahashi H. R., 'Black Hole and Neutron Star Accretion Disk', Ultra-Luminous X-ray Source 研究会 - 多波長で探る降着系の統一描像、口頭発表, Kanagawa (Japan),

- for Theoretical Physics, Jan 9 - Mar 30, 2017 (招待講演)
 - Matsumoto, R., 'Magnetic Field Amplification and Magnetic Energy Release in Astrophysical Objects', The US-Japan Workshop and School on Magnetic Reconnection, Matsuyama (Japan), March 19-March 23, 2017 (招待講演)
 - Matsumoto, R., 'Plasma Dynamics in Accretion Disks', 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, Tsukuba (Japan), July 11-July 16, 2016 (招待講演)
 - Matsumoto, T., 'Theoretical Models of Protostellar Binary and Multiple Systems with AMR Simulations', East-Asian Numerical Astrophysics Meetings (EANAM7), Beijing (China), October 24, 2016 (招待講演)
 - Matsumoto, T., 'Theoretical Models of Protostellar Binary and Multiple Systems with AMR Simulations', ASTRONUM 2016, Monterey (USA), June 9 2016 (招待講演)
 - Matsumoto, T., 'A dynamical model of the heliosphere with the adaptive mesh refinement', JpGU2016, Makuhari (Japan), May 23 2016 (口頭発表)
- 国内会議発表
- 高橋博之 '双極子磁場を持つ中性子星への超臨界降着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, 九州大学, 9 月 15 日-19 日(口頭発表)
 - 川島朋尚 '強磁場中性子星の超臨界降着柱の構造', 日本天文学会春季年会, 九州大学, 9 月 15 日-19 日(口頭発表)
 - 高橋博之 'ブラックホール・中性子星降着円盤とアウトフロー', 理論懇シンポジウム第 29 回 理論懇シンポジウム「重力が織りなす宇宙の諸階層」, 東北大学, 2016 年 12 月 20-22 日 (招待講演)
 - 川島朋尚 'Radiation-hydrodynamic simulations of super-critical accretion columns onto neutron stars', 理論懇シンポジウム第 29 回 理論懇シンポジウム「重力が織りなす宇宙の諸階層」, 東北大学, 2016 年 12 月 20-22 日(ポスター発表)
 - 大須賀健 '超臨界降着による巨大ブラックホールの成長について', 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第 4 回ワークショップ、東京大学天文学教育研究センター, 2016 年 12 月 9-10 日(招待講演)
 - 川島朋尚 '中性子星極冠への超臨界降着の輻射流体シミュレーション', 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第 4 回ワークショップ、東京大学天文学教育研究センター, 2016 年 12 月 9-10 日(口頭発表)
 - 高橋博之 '輻射磁気流体シミュレーションによる降着円盤とアウトフロー研究', 高エネルギー宇宙物理学研究会 2016, 青山大学, 2016 年 11 月 30 日-12 月 2 日(招待講演)
 - 高橋博之 'Super Critical Accretion Onto Weakly Magnetized Neutron Star', Workshop on Theoretical Astronomy 2016, 富山大学, 2016 年 11 月 14 日-16 日(口頭発表)
 - 高橋博之 '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', CfCA ユーザーズミーティング, 国立天文台, 2016 年 11 月 29 日-30 日(口頭発表)
 - 高橋博之 '降着円盤の輻射磁気流体シミュレーション', 日本物理学会 2016 秋季年会、金沢大学, 9 月 13 日-15 日(招待講演)
 - 高橋博之 '弱磁場中性子星への超臨界降着の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション', 流体力学会年会 2016, 名古屋工業大学, 9 月 26 日-28 日(口頭発表)
 - 朝比奈雄太, 野村真理子, 大須賀健, '活動銀河核アウトフローによる星間ガスへのフィードバックの磁気流体計算', 日本天文学会 2016 年秋季年会, 愛媛大学, 2016 年 9 月 15 日(口頭発表)

- 朝比奈雄太, 野村真理子, 大須賀健, ‘宇宙ジェットによる非一様な星間空間へのフィードバックの磁気流体シミュレーション’, 日本流体力学会年会 2016, 名古屋工業大学, 2016 年 9 月 28 日(口頭発表)
- 川島朋尚, 嶺重慎, 大須賀健, 小川拓未 ‘強磁場中性子星極冠への超臨界降着柱の輻射流体シミュレーション:ULX パルサーへの応用’, 日本天文学会 2016 年秋季年会, 愛媛大学, 2016 年 9 月 16 日(口頭発表)
- 川島朋尚, 嶺重慎, 大須賀健, 小川拓未 ‘強磁場中性子星への超臨界降着柱の輻射流体シミュレーション’, 日本流体力学会年会 2016, 名古屋工業大学, 2016 年 9 月 28 日(口頭発表)
- "中心星の照射を受ける原始惑星系円盤における重力乱流", 廣瀬重信, Ji-Ming Shi, 日本天文学会秋季年会, 愛媛大学, 2016 年 9 月 16 日(口頭発表)
- "矮新星降着円盤の「第一原理」熱平衡曲線", 廣瀬重信, 連星・変光星・低温度星 研究会 2016, 慶應義塾大学, 2016 年 10 月 31 日(口頭発表)

(4) その他(特許, プレス発表, 著書等)

- 川島朋尚, 嶺重慎, 大須賀健 ‘横顔が輝く宇宙灯台: 謎の超高輝度 X 線パルサーの正体をスパコンがあばく’ 2016 年 9 月 8 日 (プレスリリース)