

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03634

研究課題名(和文) 相対論的磁気流体シミュレーションで迫る活動銀河核ジェット形成と伝搬・放射の物理

研究課題名(英文) Physics of active galactic nuclear jet formation, propagation and emission by relativistic magnetohydrodynamic simulations

研究代表者

水田 晃 (Mizuta, Akira)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員

研究者番号：90402817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：一般相対論的磁気流体計算によるブラックホール降着流のシミュレーションを行い、規格化されたブラックホールスピンの系、系の時間変動性の相関を調べた。より速いブラックホールスピンでは降着円盤最内縁半径が小さくなるため、系の特徴的な時間変動性の原因となる磁気回転不安定性の成長の時間スケールが短くなる。そのため、ブラックホールスピンの小さい場合に比べてより短時間の時間変動性が含まれる傾向が見られた。また、より計算が安定な一般相対論的磁気流体コードの開発を行い、特殊相対論的磁気流体、メトリック固定での一般相対論的磁気流体計算に関しては1次元のテスト計算で既存のコードと同程度の精度が出ていることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河中心の超巨大ブラックホールの極近傍を解像する観測が可能な時代となり、ブラックホール降着流の物理、相対論的ジェット形成の理論モデルを検証可能となりつつある。一方でこれらのイメージだけではブラックホールの基本パラメータであるスピンの計測、決定はまだまだ困難である。ブラックホール降着流では降着円盤内部で磁場増幅、飽和、散逸が繰り返され、その特徴的時間スケールとブラックホールスピンの大きさの相関を考慮することで、将来の観測からブラックホールスピンの大きさに制限を与えることが可能か理論的に検討を行った。

研究成果の概要(英文)：We have performed general relativistic magnetohydrodynamic simulations of accretion flows onto black holes. We investigate the correlation between the normalised black hole spin and the time variability of the system. For faster spinning black hole case, innermost radius of the accretion disk is smaller, which leads to a shorter timescale for the growth of the magnetorotational instability which is responsible for the time variability of the system. Therefore, the system tends to include shorter time variability than for smaller black hole spins. We are developing a new general relativistic magnetohydrodynamic code. We confirmed that the code to be as accurate as existing codes in test calculations for special relativistic magnetohydrodynamics and for 1-dimensional problems of general relativistic magnetohydrodynamic calculations with fixed metric.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ブラックホール 降着円盤 一般相対性理論 磁気流体力学 宇宙ジェット

1. 研究開始当初の背景

銀河中心の超巨大ブラックホールからは銀河のスケールを超える伝搬距離を持つこともある活動銀河核ジェットが観測されることもあり、その流速はバルクローレンツ因子が10のオーダーのほぼ光速の流れである。ジェットは中心のブラックホールとそれに落ち込んでくる降着円盤からの降着流との相互作用によって形成されていると考えられるが、その形成機構の完全な理解には至っていない。一方で近傍の超大質量ブラックホールの直接撮像がイベントホライズン望遠鏡によってなされ、ジェットの形成現場の詳細観測が可能となりつつある。

このような系の理解にはブラックホール降着流がなす、降着円盤内部での磁場の振る舞い、特に磁場増幅、飽和、散逸の繰り返しの理解が重要である。降着円盤内部で増幅された磁場はやがて円盤内縁を通過し、ブラックホールのイベントホライズン近傍でその一部が外向きの流れとなり、ジェットを形成すると考えられている。そのため、磁場の効果、ブラックホールによる一般相対論的效果を取り入れた3次元の一般相対論的磁気流体シミュレーションが威力を発揮する問題である。

2. 研究の目的

ブラックホールを囲む降着円盤内部では磁気回転不安定性と呼ばれる機構によって、指数関数的に磁場が増幅することが知られている。増幅された磁場は磁気圧が熱圧程度にまで増幅すると飽和し、磁気再結合などを経て散逸する。しかし、一部残った磁場を種磁場として、やがて次の磁場増幅期となる。Mizuta et al. (2018)では、規格化されたブラックホールスピン0.9の場合に関して、降着円盤内部での一連の磁気活動(増幅、飽和、散逸)の準周期的な繰り返しを確認し、その時間変動性が、ブラックホールへの質量降着率の時間変動、極軸方向に現れる低密度のポインティング流束が優勢なアウトフロー領域での時間変動としても現れることを確認した。そのタイムスケールは降着円盤内縁半径の少し外側での磁場増幅などの時間スケールが最短のものとして現れることを示した。そこで、系の時間変動性に関して、観測での決定が難しいブラックホールスピンパラメータ依存性を調べ、時間変動のタイムスケールがそれぞれのスピンパラメータに呼応した、最内縁半径のやや外側の時間スケールと一致するかを調べていく。

また、降着円盤の問題では初期磁場の配位などの依存性が強い問題と言われている、初期値の依存性がなるべくなくなるように、長時間計算が必要となってくる。そのため、より安定に計算ができる一般相対論的磁気流体コードの開発も行う。

3. 研究の方法

ブラックホールのスピンパラメータを固定し、それを囲む静水圧平衡のトラスを初期条件として用意する。この円盤内部に閉じたポロイダル方向の弱磁場を与え、系の平衡を破り系の時間進化を見ていく。初期のプラズマベータ値(熱圧/磁気圧)の最小値が100とした。ブラックホールスピンは0.1, 0.3, 0.5, 0.7とし、スピンパラメータを0.9としたMizuta et al. (2018)とも比較する。極座標系を用い、各方向のメッシュ数 $[N_r, N_\theta, N_\phi] = [124, 252, 60]$ を用いた。赤道面付近では磁気回転不安定性を解像できるように不等間隔のメッシュを採用し、赤道面付近では高解像度($r \sim H/100$, H は円盤の厚み)を確保している。動径方向もブラックホール近傍が密になるように取っている。ゴドノフタイプの数値流束を用いる有限体積法によってメトリック部分は時間進化しない一般相対論的磁気流体方程式を解く。回転するブラックホール周りの真空解であるカー時空、特にイベントホライズンでメトリックが発散しないKerr-Schildメトリックを用いる。理想磁気流体を仮定し、磁気拡散は陰的に数値磁気拡散として取り込まれる。比熱比一定($\gamma=4/3$)の理想気体の状態方程式を用いて連立偏微分方程式系を閉じさせる。メトリックを固定し、自己重力を無視した一般相対論的磁気流体方程式では、空間、時間が GM/c^2 , GM/c^3 でスケールされ、 $GM=c=1$ の単位系をとる(ここで G は重力定数、 M はブラックホール質量、 c は光速の大きさ)。降着円盤内部では磁場が増幅され、飽和、散逸のサイクルを繰り返すようになる。規格化した時間で数千〜一万経過したところで、イベントホライズンに落ち込むガスの質量降着率、極軸方向に現れるポインティング流束の時間変動などを見る。

4. 研究成果

全てのモデルで初期磁場が増幅され、やがてプラズマベータ値が1のオーダーになると、飽和し、散逸をした後、再び磁場増幅期となり系はこれを繰り返した。図1はスピンパラメータ0.1の場合に対する、時刻 $6000 GM/c^3$ でのプラズマベータ値(熱圧/磁気圧)の逆数(赤道面)、密度(xz 面)、磁気圧(yz 面)である。各軸 $60 GM/c^2$ までのスケールを示している。中心(ブラックホール近傍)でプラズマベータ値は1のオーダーとなり、円盤の最内縁付近で磁場がよく増幅されていることが分かる。また、いくつかのスパイラル構造が見え、非軸対象モードが発達している。円盤内部では磁気圧が層状化し、磁気回転不安定性の特徴の一つであるチャンネルフローが発達している。密度コンターで赤い円盤領域の外側には重力の束縛を逃れた円盤風が見られ、極軸

回りには低密度の領域が現れている。図 2(上)は、最内縁半径付近、赤道面で平均化した磁場のトロイダル成分、トロイダル成分の時間進化、図 2(下)は、イベントホライズンで評価した質量降着率の時間進化である。磁場増幅と減衰に呼応して、質量降着率も増減を繰り返す。繰り返しの時間スケールはスピンパラメータが大きい場合に比べて徐々に長くなっており、円盤最内縁付近の磁場の回転不安定性の理論モデルで予測される増幅の時間スケールとも合う結果となっている。

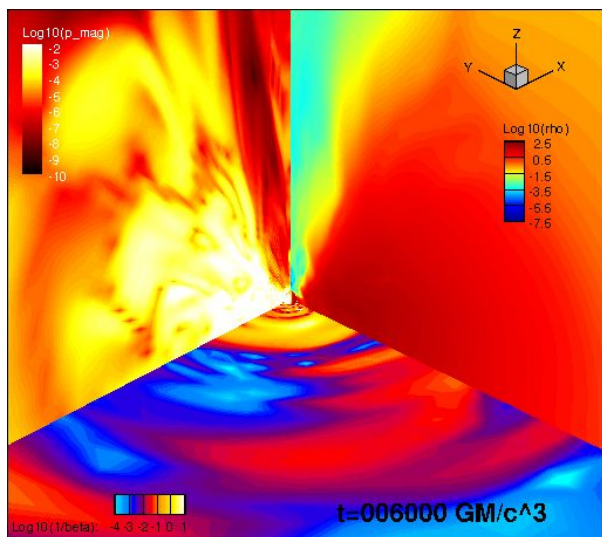


図 1 ブラックホールスピンパラメータ 0.1 の場合の時刻 6000 GM/c^3 のプラズマベータ値(熱圧/磁気圧)の逆数(赤道面)、密度(xz 面)、磁気圧(yz 面)。

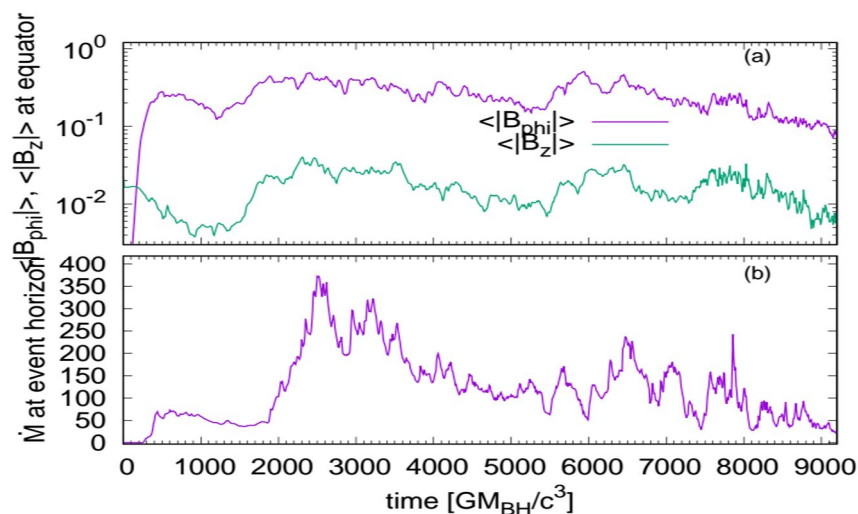


図 2 ブラックホールスピンパラメータ 0.1 を仮定したシミュレーションでの(a)磁場の時間変化と(b)イベントホライズンでの質量降着率の時間進化。磁場は円盤最内縁半径付近、赤道面で回転各方向に平均したもの

参考文献

Mizuta et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 479, Issue 2, p.2534-2546 (2018)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 水田晃
2. 発表標題 コラプサーからの相対論的ガンマ線バーストジェット伝搬の3次元流体シミュレーション
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水田晃
2. 発表標題 コラプサーからの相対論的ガンマ線バーストジェット伝搬の3次元流体シミュレーション
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 水田晃
2. 発表標題 コラプサーからの相対論的ガンマ線バーストジェット伝搬の3次元流体シミュレーション
3. 学会等名 国立天文台天文シミュレーションプロジェクトユーザーズミーティング
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akira Mizuta
2. 発表標題 Astrophysical plasma jet
3. 学会等名 Workshop on Laboratory Astrophysics: Novel Development in Nonlinear Plasma Physics with Lasers (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水田晃
2. 発表標題 ブラックホール降着流シミュレーションのためのGRMHDコードの開発
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Mizuta
2. 発表標題 Alfven pulses from black hole accretion disk into jets via 3D global GRMHD simulations
3. 学会等名 CHALLENGES AND INNOVATIONS IN COMPUTATIONAL ASTROPHYSICS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水田晃
2. 発表標題 相対論的ジェットの物理
3. 学会等名 宇宙惑星ジェットの数理 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Mizuta
2. 発表標題 BH spin parameter dependence for episodic Alfven pulse generation from BH accretion disks
3. 学会等名 Workshop to bring together experts on High Energy Astrophysics from Japan and Israel (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Mizuta
2. 発表標題 Relativistic Alfvén pulse emission from black hole accretion disk and particle acceleration via wake fields in relativistic jets
3. 学会等名 High Energy Density Laboratory Astrophysics (HEDLA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水田晃
2. 発表標題 ”ブラックホール降着円盤から放出されるアルフヴェンパルスとジェット
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水田晃
2. 発表標題 ブラックホール降着円盤から放出される大強度アルフヴェンパルスとジェット
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水田晃
2. 発表標題 大質量ブラックホール降着円盤から放出される大強度アルフヴェンパルスとジェット
3. 学会等名 宇宙線研究所共同利用小研究会 「高エネルギー天体現象の多様性」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Mizuta
2. 発表標題 Production of intense episodic Alfvén pulses: GRMHD simulation of black hole accretion discs
3. 学会等名 East-Asia AGN Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水田晃
2. 発表標題 ブラックホール降着流の 3D GRMHD シミュレーション
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会2019
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