

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23451

研究課題名（和文）マルチスケール手法を用いた高温降着流における乱流加熱研究

研究課題名（英文）A multiscale approach for prescribing turbulent heating in hot accretion flows

研究代表者

川面 洋平（Kawazura, Yohei）

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：80725375

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：高温降着円盤におけるイオンと電子のエネルギー配分を求めるために、大スケールは電磁流体力学（MHD）を用い、小スケールはジャイロ運動論を用いて数値シミュレーションを行った。ジャイロ運動論の結果として、イオンと電子の加熱比は圧縮的揺動とAlfven的揺動の比の増加関数となることが分かった。次にMHDの結果として、降着円盤の方位角方向に背景磁場が存在するときは、圧縮的揺動とAlfven的揺動の比がおよそ2になることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Event Horizon Telescope (EHT) によってM87ブラックホールシャドウの観測が行われたが、その結果の解釈のためにはイオンと電子のエネルギー配分を知る必要がある。本研究では、大スケールと小スケールをコンシステントに解くマルチスケール手法を用いたことで、これまででない精度で降着円盤におけるイオンと電子のエネルギー配分を得ることができた。この結果は今後EHTの観測結果をより精度良く解釈する上で重要となる。

研究成果の概要（英文）：To obtain the energy partition between ions and electrons in hot accretion disks, we conducted two types of numerical simulations: magnetohydrodynamics (MHD) for large scales and gyrokinetics for small scales. For the results of gyrokinetic simulations, we found that ion-to-electron heating is an increasing function of the compressive-to-Alfvenic energy flux ratio. For the MHD results, we found that when there is a mean azimuthal magnetic field, the compressive-to-Alfvenic energy flux ratio is almost two.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：降着円盤 プラズマ乱流 ジャイロ運動論 電磁流体力学

1. 研究開始当初の背景

国際プロジェクト Event Horizon Telescope (EHT) によって M87 のブラックホールシャドーが観測され、観測天文学が大きく進展したが、観測結果から実際にブラックホール周辺で何が起こっているかを解釈するためには、理論・シミュレーションとのすり合わせが必須である。直接計測ができない物理量は、観測と矛盾しない理論モデルから推測する必要がある。そのためここ数年、電磁流体力学(MHD)の数値シミュレーションによる研究が精力的に行われてきた[Chael et al. 2019 等]。しかしこれらの MHD 研究ではイオンと電子の温度比を適当なモデルで仮定している。今回 EHT が観測した降着円盤におけるプラズマは、クーロン衝突頻度が低い無衝突状態にある。無衝突プラズマでは電子・イオン間の熱緩和が無いため、重力ポテンシャルの解放による加熱は電子とイオンの間で等配分されない。この電子とイオンの加熱比が、放射を決定するために不可欠である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、M87 降着円盤のような、無衝突プラズマにおけるイオンと電子の加熱比の値を算出することである。この値が得られれば、加熱比を仮定するという恣意性を排除した正確な放射分布を予測することが可能になる。

3. 研究の方法

本研究では、プラズマ加熱メカニズムのうち、乱流の散逸に焦点を絞る。まず、乱流は降着円盤の厚み程度のサイズを持った大スケールにおいて磁気回転不安定性(MRI)によって駆動され、イオンの回旋半径程度の小スケールにおいて散逸される。しかし、MHD が成立するのは大スケールのみであるので、本研究では大スケールの解析には MHD を、小スケールの解析にはジャイロ運動論を用いる。その後、それぞれのスケールで得た結果を組み合わせることで加熱比を求める。以下、それぞれのスケールで何を明らかにするかを示す。

大スケールで明らかにすること(MHD を用いる)

大スケールでは MRI によって乱流が駆動される。このとき Alfvén 的 (=横波的)揺動と圧縮的 (=縦波的)揺動が同時に駆動され、それぞれの揺動は相互作用をしている。この揺動は乱流の非線形効果によって、より小さいスケールへ伝わっていく(カスケード)。ある程度小スケールにカスケードすると Alfvén 成分と圧縮成分は相互作用をしなくなる[Schekochihin et al. 2009]。本研究では MHD シミュレーションを用いて、相互作用をしなくなるスケールにおける Alfvén 成分と圧縮成分のエネルギーフラックス(D_{AW} と D_{compr})を算出する。

小スケールで明らかにすること(ジャイロ運動論を用いる)

更に小スケールへカスケードすると、イオンの回旋半径程度で Alfvén 成分と圧縮成分は再び相互作用をし始め、最終的に回旋半径以下のスケールで波動粒子相互作用によってイオン加熱(Q_i)と電子加熱(Q_e)になる。本研究では、 D_{AW} と D_{compr} をパラメータとしてジャイロ運動論シミュレーションを行い、イオン・電子の加熱比 Q_i/Q_e を算出する。

最終的に MHD 計算で得た(D_{AW} 、 D_{compr})とジャイロ運動論計算で得た Q_i/Q_e を組み合わせることで、降着円盤におけるイオン・電子加熱比を決定することができる。

4. 研究成果

(1) ジャイロ運動論による成果

- 圧縮的駆動と Alfvén 的駆動を併用したジャイロ運動論の乱流シミュレーションを行い、イオンと電子の加熱比が D_{compr}/D_{AW} の増加関数となることを示した(図1)。
- D_{compr}/D_{AW} が 1 を超えると、イオンが選択的に加熱される。
- 電子が選択的に加熱されるのは、圧縮的駆動が全く存在せず、かつ強磁場下にあるときのみである。

(2) MHD による成果

- 降着円盤の方位角方向に背景磁場が存在する状況に限定してシミュレーションを行い、非線形カスケードが線形効果による圧縮的揺動と Alfvén 的揺動のカップリングを上回るスケールまで解像した。
- プラズマのパラメータによらず D_{compr}/D_{AW} は 2 である(図2)。

以上の(1)と(2)をまとめて、イオンと電子の加熱比は

$$Q_i/Q_e = 35/[1+(\beta_i/15)^{-1.4}\exp(-0.1T_e/T_i)]+2$$

となることを導いた。ただし β_i はイオンの圧力と磁気圧の比、 T_e/T_i は電子とイオンの背景温度比。

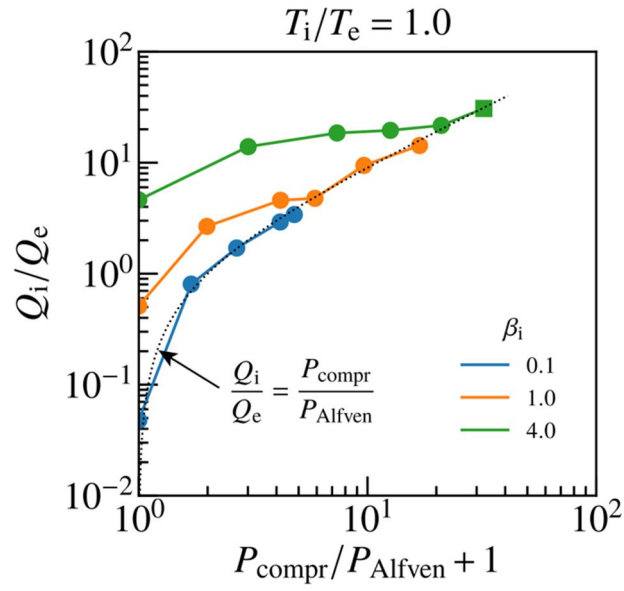


図 1:イオンと電子の加熱比と圧縮的揺動と Alfvén 的揺動の比の関係 (Kawazura et al., Phys. Rev. X 2020 より)

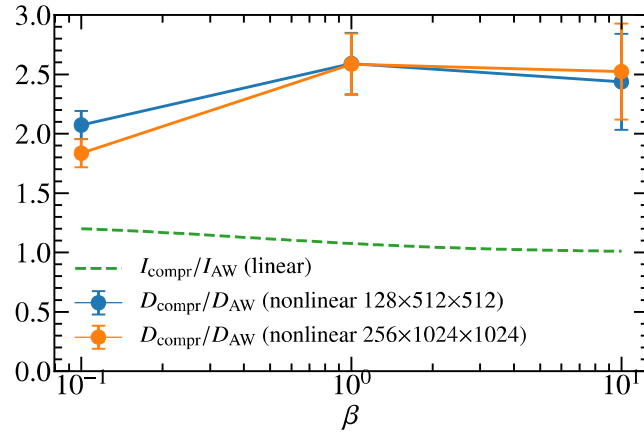


図 2:降着円盤の方位角方向に背景磁場が存在するときの圧縮的揺動と Alfvén 的揺動の比。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Y. Kawazura, A.A. Schekochihin, M. Barnes, J.M. TenBarge, Y. Tong, K.G. Klein, and W. Dorland	4. 巻 10
2. 論文標題 Ion versus Electron Heating in Compressively Driven Astrophysical Gyrokinetic Turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 41050
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevX.10.041050	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 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 川面洋平, Michael Barnes, Alexander Schekochihin
2. 発表標題 ジャイロ運動論的乱流散逸によるイオン・電子加熱比
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 Yohei Kawazura, Alex Schekochihin, Michael Barnes, Steve Balbus, Bill Dorland
2. 発表標題 Alfvénic vs compressive fluctuations in turbulence driven by MRI
3. 学会等名 Arcetri 2019 Workshop on Plasma Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Kawazura, George Miloshevich, and Philip J. Morrison
2. 発表標題 Action principles for relativistic extended magnetohydrodynamics: A unified theory of magnetofluid models
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Kawazura, Michael Barnes, Alex Schekochihin, Steven Balbus, Yuguang Tong, J. M. TenBarge, Kris Klein, Bill Dorland
2. 発表標題 A multiscale study of turbulent heating in hot accretion flows
3. 学会等名 AGN Jet Workshop 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川面洋平, A. Schekochihin, M. A. Barnes, W. Dorland, S. A. Balbus
2. 発表標題 MRI 乱流における Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の散逸比
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川面洋平, A.A. Schekochihin, M. Barnes, J.M. TenBarge, Y. Tong, K.G. Klein, and W. Dorland
2. 発表標題 圧縮的に駆動されたジャイロ運動論的乱流におけるイオン・電子の加熱比
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川面洋平, A. Schekochihin, M. Barnes, S. Balbus, W. Dorland
2. 発表標題 ほぼトロイダルな外部磁場を持つMRI乱流におけるAlfvénic揺動と圧縮性揺動の比
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川面洋平, A.A. Schekochihin, M. Barnes, J.M. TenBarge, Y. Tong, K.G. Klein, and W. Dorland
2. 発表標題 ジャイロ運動論を用いた天体プラズマにおける乱流加熱シミュレーション
3. 学会等名 第26回NEXT(数値トカマク)研究会(招待講演)(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kawazura, A.A. Schekochihin, M. Barnes, J.M. TenBarge, Y. Tong, K.G. Klein, and W. Dorland
2. 発表標題 Ion versus Electron Heating in Compressively Driven Astrophysical Gyrokinetic Turbulence
3. 学会等名 International Conference on HIGH ENERGY DENSITY SCIENCE 2021(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------