

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

川面洋平 (東北大学)

利用カテゴリ XC-B+

1 研究背景

放射非効率降着流 (RIAF) ではプラズマは高温・希薄であり、無衝突状態になっていると考えられる。そのため電磁流体力学 (MHD) だけでは不十分であり、運動論効果を取り入れる必要がある。本研究では運動論効果が重要となる現象の中でも、乱流の散逸によるプラズマの加熱に着目する。特にイオンと電子の加熱比を明らかにすることを目標とする。降着円盤におけるイオン・電子の加熱比問題はQuataert (1999)で提唱されて以来、長年未解決の問題であった。Event Horizon Telescopeによって得られたM87降着円盤の放射分布(EHT collaboration 2019)を物理的に解釈する上で、イオン・電子の加熱比は必須のパラメータであるため、本課題の解決は重要である。

2 手法

本研究では、3次元運動論的乱流のシミュレーションを行うために、ジャイロ運動論モデルを用いる。ジャイロ運動論は核融合プラズマおよび太陽風プラズマの研究で広く用いられているモデルであるが、降着円盤を対象に用いられたことはない。本研究ではAstroGKコード(Numata et. al., 2010; Kawazura & Barnes 2018)を用いてシミュレーションを行った。今回のシミュレーションではイオンのジャイロ半径の10倍から0.1倍程度のスケールを解く。降着円盤ではこのスケールでの不安定性はないと考えられる¹ため、乱流は大きいMHDスケールで磁気回転不安定性 (MRI) によって駆動された乱流がカスケードすることによって駆動させる。そのため、大スケールからカスケードしてくる揺動を外力でモデル化し、イオンスケールの乱流を駆動する。この際、外力の入れ方として、Alfvén-wave-likeな場合とslow-wave-likeな場合の二種類が考えられる。我々の先行研究ではAlfvén-wave-likeな場合のみを考えていたが(Kawazura et. al., 2019)、本研究では新たにslow-wave-likeな駆動を導入した。

¹温度非等方性由来の不安定性及び高周波な不安定性はここでは考えない。

3 結果

図 1 にジャイロ運動論シミュレーションから得られたイオン・電子の加熱比 Q_i/Q_e のイオンベータ値 β_i 、イオンと電子の背景温度比 T_i/T_e 、slow-wave-like な駆動と Alfvén-wave-like な駆動のパワー比 $P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}}$ に対する依存性を示す。 β_i 、 T_i/T_e の値によらず Q_i/Q_e は $P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}}$ の増加関数となることが見て取れる。 β_i が小さいときは、常に $Q_i/Q_e = P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}}$ となる。これは先行研究による理論予測と合致する (Schekochihin et. al., 2019)。また低 β_i でなくても、 $P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}}$ が十分大きいところでは $Q_i/Q_e \approx P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}}$ に漸近することが分かった。これはすなわち、 $P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}}$ が十分大きければ、大スケールにおける Alfvén-wave-like な揺動は全て電子加熱になり、slow-wave-like な揺動は全てイオン加熱になるということを意味する。また、 T_i/T_e にはほとんど依存しないことも分かった。今回得られた Q_i/Q_e は

$$\frac{Q_i}{Q_e}(\beta_i, T_i/T_e, P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}}) = \frac{35}{1 + (\beta_i/15)^{-1.4} e^{-0.1/(T_i/T_e)}} + \frac{P_{\text{compr}}}{P_{\text{AW}}} \quad (1)$$

というシンプルな公式でフィッティングできる。この公式はジャイロ運動論近似が成立するあらゆる無衝突プラズマ乱流に適用できる。

以上の結果は論文投稿済みである (Kawazura et. al., arXiv:2004.04922)。また、MRI 乱流における $P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}}$ を決めるために、MHD シミュレーションを現在行っている。

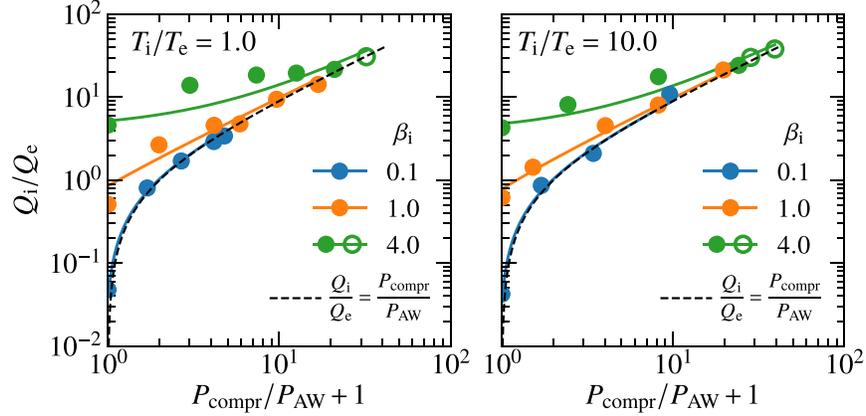


Figure 1: イオン・電子加熱比 Q_i/Q_e の β_i 、 $P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}}$ に対する依存性。(左)背景のイオンと電子の温度比 $T_i/T_e = 1$ 、(右) $T_i/T_e = 10$ 。 $P_{\text{compr}}/P_{\text{AW}} = 0$ のときは Kawazura et. al., (2019) の結果になる。実線は公式 (1) を表す。