

輻射圧優勢降着流の輻射磁気流体シミュレーション

Radiation MHD Simulation of Radiation-dominated Accretion Flow

○廣瀬重信, 海洋研究開発機構, 横浜市金沢区昭和町, Email: shirose@jamstec.go.jp

Krolik, J. H., JHU, Baltimore MD

Blaes, O.M., UCSB, Santa Barbara CA

Hirose, S., JAMSTEC, Showamachi Kanazawa-ku Yokohama

Krolik, J. H., JHU, Baltimore MD

Blaes, O.M., UCSB, Santa Barbara CA

Three dimensional radiation magnetohydrodynamics (MHD) simulation is used to explore radiation-dominated MHD accretion flows around black holes. The local shearing box approximation is employed to simulate a radial slice of geometrically thin and optically thick accretion disk. Magnetorotational instability due to the velocity shear drives MHD turbulence, which dissipates to produce thermal energy. A dynamical and thermal equilibrium state that lasts for at least dozens of thermal times is established in the simulation box. In the dynamical equilibrium, the gravity is compensated by the gradient of radiation pressure near the midplane and by that of magnetic pressure in the upper region. On the other hand, not only radiative diffusion but also radiative advection associated with magnetic buoyancy transport the dissipated thermal energy to the disk surface to achieve the thermal equilibrium.

1. はじめに

Shakura & Sunyaev (1973)⁽¹⁾ によって提案された幾何学的に薄く光学的に厚い降着円盤モデルは、標準モデルとしてこれまで多くの理論・観測の礎となっている。このモデルでは、二つの平衡

- 力学平衡 $-(dP/dz) + \rho\Omega^2 z = 0$
- 熱的平衡 $Q_{\text{vis}} - dF_{\text{rad}}/dz = 0$

が局所的に成り立つと仮定しているが、これらの平衡状態が安定であるかどうかは未だ議論の対象となっている。それは、これまで円盤内部での粘性の起源が不明であったため、その粘性によるエネルギー散逸率 Q_{vis} を適当に仮定せざるを得なかったことに因る。

近年、降着円盤の速度シアに起因した磁気回転不安定性 (Magneto-Rotational Instability)⁽²⁾ による磁気乱流が、降着円盤の粘性の起源として有力視されている。そこで、われわれは、このような MRI によって駆動された降着流について、エネルギー散逸率を 3 次元輻射磁気流体力学シミュレーションを用いて求めることにより、その力学および熱的平衡状態とその安定性について調べている。

ここでは、特に、輻射圧勾配によって力学平衡が成り立っている降着流に着目する。降着円盤の中心天体に近い（より多くのエネルギー散逸が起きている）部分は、このような輻射圧優勢降着流になっていると考えられている。この場合、力学平衡から輻射流束が決まるので ($F_{\text{rad}} = c\Omega^2 z/\chi_{\text{es}}$)、熱的平衡が成り立つための粘性値 $\eta = 4Q_{\text{vis}}/9\Omega^2$ はユニバーサルな定数 $4c/9\chi_{\text{es}}$ でなければならないことが大きな特徴である⁽³⁾。

2. 計算結果

本研究では、降着円盤の一部＝動径方向のスライスを計算領域として設定し、降着円盤の回転に乗った系でシミュレーションを行っている。シミュレーションにおけるパラメータは、表面密度 Σ (計算領域内のガスの総量に相当) と角速度 Ω (動径方向の速度シアの強さと垂直方向の重力の強さに相当) である。以下に示すのは、 $\Omega = 190[\text{s}^{-1}]$ (中心天体からの距離が 30 重力半径に相当)、 $\Sigma = 53239[\text{g}/\text{cm}^2]$ (標準モデルでのパラメータ $\alpha = 0.025$ に相当) の場合の結果である。初期条件として、計算領域内にガスと輻射エネルギーを適当に分布させ、さらに MRI の種となる弱い磁場も挿入する。

計算が始まると、動径方向の境界条件として与え続けている速度シアによって（主に赤道面近傍で）MRI が成長し、それにより MHD 乱流が発達する。磁場に関しては、(1)MRI による生成、(2) 磁気浮力による上昇、(3) ジュール散逸、が繰り返される。この結果、計算領域内には力学および熱的平衡状態が達成され、この平衡状態は熱的時間の 10 倍以上安定に存在することが観測された。

- 力学平衡: 垂直方向の重力に対して、ガスは赤道面近傍では輻射圧によって支えられるが、より上方では磁気圧勾配によって支えられる。
- 熱的平衡: MHD 乱流の散逸によって生じた熱エネルギーは即座に輻射エネルギーに変換される。変換された輻射エネルギーは、基本的には輻射散逸 $-\nabla \cdot \mathbf{F}$ によって円盤表面まで運ばれるが、上に挙げたユニバーサルな粘性率に相当するエネルギー散逸率 $9\eta_{\text{universal}}\Omega^2/4$ を超えた分（今回用いたパラメータでは、10% 程度超過する）は、輻射移流 $-E_{\text{v}}$ が運ぶことで熱的平衡が保たれる。この輻射移流は、磁気浮力による上昇流に伴うものであると考えられる。

以上の結果より、磁場は MRI を通じて、降着円盤における角運動量輸送とエネルギー散逸という従来の粘性の役割だけではなく、降着円盤の力学平衡と熱的平衡を達成するためにも重要な役割を果たしていると言える。

参考文献

- (1) Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, *Astron. & Astrophys.* 24, 337
- (2) Balbus, S. A. & Hawley, J. F. 1998, *Rev. Mod. Phys.* 70, 1
- (3) Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1976, *Mon. Not. R. astr. Soc.* 175, 613
- (4) Stone, J. M., & Norman, M. L., 1992, *Astrophys. J. Suppl.* 80, 753
- (5) Hirose, S., Krolik, J. H., & Stone, J. M. 2006, *Astrophys. J.* 640, 901