

熱的に不安定な降着円盤の 3 次元磁気流体数値実験

Three-dimensional MHD Simulations of Thermally Unstable Accretion Disks

○松元亮治, 千葉大理, 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33, E-mail: matumoto@astro.s.chiba-u.ac.jp

町田真美, 国立天文台, 〒181-8588 東京都三鷹市大沢, E-mail: mami@th.nao.ac.jp

小田 寛, 千葉大自然, 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33, E-mail: oda@astro.s.chiba-u.ac.jp

Ryoji Matsumoto, Faculty of Science, Chiba University, 1-33 Yayoi-Cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

Mami Machida, National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Hiroshi Oda, Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-Cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

We analysed the results of three-dimensional global magnetohydrodynamic (MHD) simulations of black hole accretion disks including optically thin radiative cooling and found that the disk approaches to a new thermal equilibrium state supported by magnetic pressure. The magnetically supported disk is created when the disk shrinks in the vertical direction by radiative cooling. Numerical results resolved the puzzle why black hole candidates stay in X-ray hard state even when their luminosity much exceeds the critical luminosity above which a gas pressure dominated optically thin disk becomes thermally unstable.

1. はじめに

近年、回転しながらブラックホールに落下するガスが作る円盤（降着円盤）の時間発展を 3 次元磁気流体（MHD）コードを用いてシミュレートすることにより、ブラックホール候補天体の時間変動を再現することが可能になってきた。我々はブラックホール候補天体で観測される状態遷移のメカニズムを解明するため、輻射冷却を含めた大局的な 3 次元 MHD シミュレーションを実施している。昨年度の年会ではその予備的な計算結果を紹介した⁽¹⁾。今回は、シミュレーション結果をより詳細に解析した結果をもとに、状態遷移中の円盤の進化について議論する。

2. 従来のアウトバーストモデルの問題点

銀河系内のブラックホール候補天体では X 線強度が急激に増大した後、しばらく明るい状態が続き、再び暗くなるという時間変化が観測され、アウトバーストと呼ばれる。アウトバーストは X 線スペクトルがハードで暗い状態 (low/hard state) から始まり、ハードな (硬 X 線放射の強い) スペクトルを保ったまま光度が増大する。光度がエディントン光度と呼ばれる臨界光度 L_{edd} の 10 % 程度に達すると X 線スペクトルがソフト (黒体放射的) な状態 (high/soft state) に遷移する。X 線スペクトルがハードな状態は光学的に薄い高温降着円盤に対応する。

従来のモデルでは、質量降着率の増加にともなって円盤の表面密度が臨界値を越えると輻射冷却が加熱を凌駕し、円盤が熱的に不安定になって急激に冷え、光学的に厚いソフトステートの円盤に遷移すると考えられていた。モデル計算によれば、この遷移はエディントン光度の 1 % 以下の光度で起こるはずである。ところが、観測されるブラックホール候補天体では光度がエディントン光度の 10 % 程度に達するまでハードな X 線放射が卓越しており、円盤は光学的に薄い状態に保たれているらしい。なぜ円盤が収縮して光学的に厚い状態に遷移してしまわないのか謎だった。

3. シミュレーションモデルと結果

我々は初期に弱い方位角方向の磁場に貫かれた回転トーラスから降着円盤が形成される過程を大局的な 3 次元 MHD シミュレーションによって調べた。ランダム摂動を与えてシミュレーションを開始すると、磁気回転不安定性によって円盤内部で磁気乱流が発達し、マクスウェルストレスによって角運動量を失っ

たトーラス物質が落下して降着円盤を形成する。系が準定常状態に至ったところで熱制動放射による放射冷却を加えた。このときの円盤密度が臨界値より大きい場合、輻射冷却が卓越して熱不安定性が成長し、円盤温度が低下した。

熱不安定性の成長に伴って円盤が鉛直方向に収縮すると方位角方向の磁束の一部は磁気リコネクションによって失われるが、残った磁場が円盤の収縮とともに強まり、円盤は磁気圧によって支えられてそれ以上、収縮しなくなった。この状態は回転のタイムスケールにくらべて十分長い期間保たれ、円盤は光学的に薄くクールな準定常状態に至った。

4. 降着円盤の第 3 の熱平衡ブランチ

従来の降着円盤理論では力のつりあいの式に磁気圧が含まれていなかった。そこで、方位角方向の磁場による磁気圧を含めてモデルを再構築した。方位角方向の磁場の強さを B 、円盤の厚さを H 、動径方向の速度を v_r とするとき、 $v_r B H \propto r^{-q}$ と置き、円盤中の加熱、動径方向の移流による熱輸送、輻射冷却がつりあう定常解を求めた。角運動量輸送率はストレンソルの $r\varphi$ 成分 $T_{r\varphi}$ がガス圧と磁気圧の和に比例すると仮定し、 $T_{r\varphi} = \alpha(P_{gas} + P_{mag})$ とした。その結果、光学的に薄く移流優勢な高温円盤の解は、熱不安定なブランチを経て、光学的に薄く磁気圧優勢でクールな円盤の定常解につながり、表面密度と温度の面上で熱平衡曲線が逆 S 字形になることがわかった。磁気圧優勢なブランチは熱的に安定であり、熱不安定性の成長後、円盤が磁気圧優勢な準定常状態に至ったというシミュレーション結果とコンシステントである。

5. まとめ

我々がみつけた磁気圧優勢で光学的に薄い降着円盤の定常解は光学的に薄い円盤の定常解と光学的に厚い円盤の定常解の間のミッシングリンクを埋める。ブラックホール候補天体のアウトバースト中、円盤がこの状態に遷移することにより、ハードな X 線放射の光度はエディントン光度の 10 % に達することができる。数値計算には国立天文台の VPP5000 を使用した。

参考文献

- (1) 町田真美, 中村賢仁, 松元亮治, "光学的に薄いブラックホール降着円盤の 3 次元 MHD 数値実験: 輻射冷却の効果", 日本流体力学会年会 2004 (2004), pp.604-605