

博士論文の概要

 光学的に薄い降着円盤の熱平衡解と遷音速解 (Oda et al. 2007, PASJ, 59, 457)
 光学的に薄い~厚い降着円盤の熱平衡解 (Oda et al. 2009, ApJ, in press; astro-ph.HE 0903.0477)
 光学的に薄い二温度降着円盤の熱平衡解と遷音速解

第9回高宇連研究会「宇宙ジェットの多様性と普遍性」 @愛媛大学 2009年3月17日



Hardness-Intensity ダイアグラム(の模式図)





Bright/Hard状態における光度-Ecutの反相関関係

BH候補天体 GX 339-4のスペクトル(RXTEのデータ)を cut-off power-lowでフィッティング(Miyakawa et al. 2008)



▶Low/Hard状態: E_{cut}(≒電子温度)は光度に依らず一定 ▶Bright/Hard状態: E_{cut}(≒電子温度)は光度と反相関 更に、光度は0.2L_{Edd}以上

RXTE: Low/Hard状態の高エネルギー側を詳しく解析するにはきつい… 是非Suzakuで。(MAXIでBright/Hard状態になりそうな天体を探せれば…)



Bright/Hard状態の候補:磁気圧優勢(low-ß)円盤

光学的に薄い円盤の三次元MHDシミュレーション

(Machida (Mami) et al. 2006)

<u>高温RIAF</u> → <u>低温なlow-β円盤への遷移をシミュレート</u> (加熱~移流、低光度) (加熱~放射冷却、高光度)



本研究の目的

- ●3DMHDの結果を踏まえて、<mark>磁場</mark>を考慮して一次元 定常モデルを構築、熱平衡解を求める
 - 磁気圧優勢な熱平衡解は存在するか?
 - Bright/Slow遷移、Bright/Hard状態を説明 できるか?

➡ 高降着率(高光度)でも光学的に薄い解が存在するか?

➡質量降着率(光度)と温度は反相関するか?

・ 光学的に厚い場合には?

基礎方程式

円筒座標系(ϖ,ϕ,z)

全圧: $p_{tot} = p_{gas} + p_{rad} + p_{mag}$

質量保存

 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0$

運動量保存

重力 圧力勾配力 ローレンツカ $\rho \left[\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v} \cdot \nabla) \boldsymbol{v} \right] = -\rho \nabla \psi - \nabla \left(p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}} \right) + \frac{\boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B}}{c}$

加熱冷却 $\frac{\partial \left(\rho\epsilon\right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(\rho\epsilon + p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}}\right)\boldsymbol{v}\right] - \left(\boldsymbol{v}\cdot\nabla\right)\left(p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}}\right) = q^{+} - q^{-}$

エネルギー式

磁場の誘導方程式

 $\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = \nabla \times \left(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} - \frac{4\pi}{c} \eta \boldsymbol{j} \right)$

基礎方程式

質量保存

$$\frac{1}{\varpi}\frac{\partial}{\partial\varpi}\left(\varpi\rho v_{\varpi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho v_{z}\right) = 0$$

運動量保存 ϖ -成分 $\rho v_{\varpi} \frac{\partial v_{\varpi}}{\partial \varpi} + \rho v_z \frac{\partial v_{\varpi}}{\partial z} - \frac{\rho v_{\varphi}^2}{\varpi} = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial \varpi} - \frac{\partial p_{\text{tot}}}{\partial \varpi} - \frac{\langle B_{\varphi}^2 \rangle}{4\pi \varpi}$

$$\oint - 成分 \ \rho v_{\varpi} \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \varpi} + \rho v_{z} \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial z} + \frac{\rho v_{\varpi} v_{\varphi}}{\varpi} = \frac{1}{\varpi^{2}} \frac{\partial}{\partial \varpi} \left[\varpi^{2} \frac{\langle B_{\varpi} B_{\varphi} \rangle}{4\pi} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\langle B_{\varphi} B_{z} \rangle}{4\pi} \right)$$

z-成分
$$0 = -\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{\text{tot}}}{\partial z}$$

円筒座標系(ϖ,ϕ,z)

全圧: $p_{tot} = p_{gas} + p_{rad} + p_{mag}$

エネルギー式
$$\frac{\partial}{\partial \varpi} [(\rho \epsilon + p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}}) v_{\varpi}] + \frac{v_{\varpi}}{\varpi} (\rho \epsilon + p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}}) + \frac{\partial}{\partial z} [(\rho \epsilon + p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}}) v_z] - v_{\varpi} \frac{\partial}{\partial \varpi} (p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}}) - v_z \frac{\partial}{\partial z} (p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}}) = q^+ - q^-$$

磁場の誘導方程式 $0 = -\frac{\partial}{\partial z} [v_z \langle B_{\varphi} \rangle] - \frac{\partial}{\partial \varpi} [v_{\varpi} \langle B_{\varphi} \rangle] + \{\nabla \times \langle \delta \boldsymbol{v} \times \delta \boldsymbol{B} \rangle\}_{\varphi} - \{\eta \nabla \times (\nabla \times \bar{\boldsymbol{B}})\}_{\varphi}$

定常を仮定、方位角方向に平均







* 3DMHD(Machida et al. 2006)の結果を踏襲

冷却不安定による円盤収縮時: 冷却時間 << 磁束が抜ける時間

→方位角方向の磁束を保存しながら鉛直方向に収縮

その際、磁気応力は全圧に比例

→ガス圧は弱まるが、**磁気圧は増加**

* Note: 従来のモデルは<mark>ガス圧+輻射圧</mark>に比例

温度低下→ガス圧、輻射圧低下→磁気応力減少

(後述するが、加熱率も減少)

 \bigcirc

 \bigcirc

 \bigcirc

 \bigcirc

 \bigcirc

 $oldsymbol{\Theta}$

 $oldsymbol{\Theta}$

BH

キーポイント



ダイナモ、磁気拡散項=0なら磁束降着率は半径に依らず一定だが…

これらの項は三次元効果が重要なのでシミュレーションしてみないと解らない

*3DMHD(Machida et al. 2006)の結果を踏襲

磁束降着率の半径依存性をくでパラメータ化

$$\dot{\Phi}(\varpi;\zeta,\dot{M}) \equiv \dot{\Phi}_{\rm out}(\dot{M}) \left(\frac{\omega}{\omega_{\rm out}}\right)$$

Note: β ≡ (p_{gas} + p_{rad})/p_{mag} 固定の場合 温度及び、(ガス圧+輻射圧)の低下→磁気圧の低下 3DMHDの結果と相反する♪ 少なくとも冷却不安定で円盤が鉛直方向に 収縮すると**磁気圧は強まる**。





 $\overline{\mathbf{D}}$

ITANT of $\frac{\dot{M}}{2\pi\varpi^2} \frac{W_{\text{gas}} + W_{\text{rad}}}{\Sigma} \xi = Q^+ - Q_{\text{rad}}^ \overleftarrow{\nabla} \pi \text{tr} \rho T \frac{ds}{dt} = q^+ - q^-$

*加熱率 $Q^+ = \int_{-H}^{H} \left[\frac{\langle B_{\varpi} B_{\varphi} \rangle}{4\pi} \varpi \frac{d\Omega}{d\varpi} \right] dz = -\alpha W_{\text{tot}} \varpi \frac{d\Omega}{d\varpi}$ キーポイント * ガス圧、輻射圧が低くても、磁気圧が高ければ加熱率は大きい

* 放射冷却率 $Q^- = \frac{16\sigma I_N T_0^4}{3\tau/2 + \sqrt{3} + \tau_{abs}^{-1}}$ $\left(\tau_{abs} = \frac{Q_{thin}^-}{Q_{thick}^-} = \frac{6.2 \times 10^{20}}{16\sigma} \frac{I_{2N+1/2}}{2I_N^3} \frac{\Sigma^3}{H} T_0^{-7/2}\right)$ (e.g., Hubeny 1990; Narayan & Yi 1995; Abramowicz et al. 1996)

* 光学的に厚い極限: 黒体放射 $Q_{\text{thick}}^{-} = \frac{16\sigma I_N T_0^4}{3\tau/2}$

* 光学的に薄い極限: 制動放射 $Q_{\text{thin}}^- = \int_{-H}^{H} 6.2 \times 10^{20} \rho^2 T^{1/2} dz = 6.2 \times 10^{20} \frac{I_{2N+1/2}}{2I_N^2} \frac{\Sigma^2}{H} T_0^{1/2}$

*移流項

- * エントロピー勾配: ξ=1 (3DMHD(Machida et al. 2004)の結果から)

 - * ξ<0:熱移流は加熱として働く







エネルギー式



)従来モデル: $Q^+ = -\alpha \left(W_{\text{gas}} + W_{\text{rad}} \right) \varpi \frac{d\Omega}{d\varpi}$

➡Q_{rad}と釣り合うQ⁺は無い

 $\Rightarrow \Box : Q^{+} = -\alpha \left(W_{\text{gas}} + W_{\text{rad}} + W_{\text{mag}} \right) \varpi \frac{d\Omega}{d\varpi}$

➡磁気圧が大きければ Q^+ は

Qradと釣り合う 数

補足: 熱平衡解の半径依存性の求め方





低降着率:

どの半径にもRIAF解が存

高降着率:

外側から RIAF 解が無くな りLow-β解へ遷移 [内側ほど磁束大(ζ=0.6)] 光学的に**薄い**Low-β [磁束一定(ζ=0)] 光学的に**厚い**Low-β $(T_{\rm eff} \propto \overline{\omega}^{-3/4})$



光学的に薄い磁気圧優勢円盤: Bright/Hard状態、Bright/Slow遷移





光学的に厚い磁気圧優勢円盤: DiskBlackBody成分として観測





まとめ

●3DMHDの結果に基づき、磁場を考慮して一次元定常モ デルを構築、熱平衡解を求めた

▶ 磁気応力(従って加熱率)を全圧に比例

▶ (βではなく)磁束降着率の半径依存性を規定することで磁場を決める

光学的に薄い~厚い領域を繋ぐ磁気圧優勢な熱平衡解が

存在

・光学的に薄い磁気圧優勢円盤

✓ 高降着率でも存在、温度は降着率と反相関 → Bright/Slow遷移、Bright/Hard 状態を説明

ト光学的に厚い磁気圧優勢円盤

 ✓ 有効温度の半径依存性が標準円盤と同じ
 → DBB成分の起源?
 → Slim円盤⇔光学的に厚い磁気圧優勢円 盤のリミットサイクル?

