

12-NA15

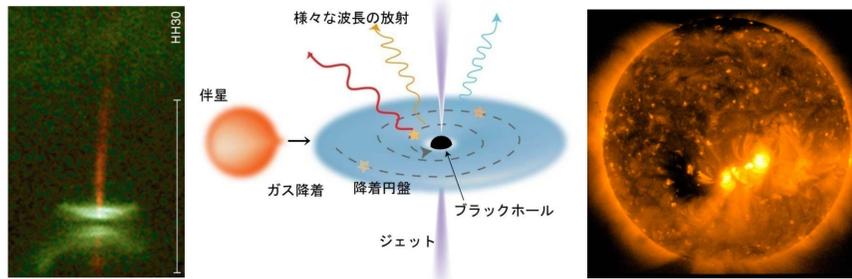
松元亮治 (千葉大学大学院理学研究科)

天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーション



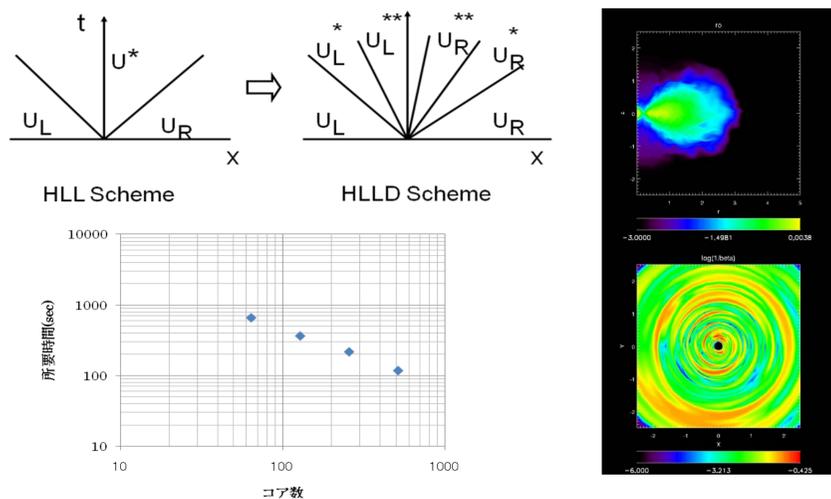
1. 研究目的

輻射と磁気流体の相互作用をシミュレートする輻射磁気流体コードを開発し、原始星円盤、ブラックホール降着円盤、太陽活動等に適用する。平成22年度に作成したHLLD法 (Miyoshi and Kusano 2005) に基づく円筒座標系3次元磁気流体コードと平成23年度に作成した1次モーメント法に基づく輻射輸送コードを結合して降着率変化に伴うブラックホール降着円盤の状態遷移シミュレーションを実施する。また、輻射輸送方程式の直接解法を太陽活動に適用する。



星形成と原始星円盤 (Burrows 1995) 降着円盤とジェット 太陽活動

2. HLLD法に基づく円筒座標系3次元磁気流体コード



HA8000に実装したHLLD法に基づく円筒座標系3次元磁気流体コードの並列効率とシミュレーション例。右図上段は密度、下段は磁気圧とガス圧の比。数値的な磁場散逸を抑制するため、メッシュ境界の物理量を空間5次精度で求めるHLLD+MP5法のコードも実装した。

3. 輻射輸送方程式の解法

1次モーメント法

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla\right) I(\mathbf{x}, t; \mathbf{n}, \nu) = \sigma_a^\nu B(\mathbf{x}, t, \nu) - \sigma^\nu I(\mathbf{x}, t; \mathbf{n}, \nu) + \sigma_s^\nu \int_{4\pi} g(\mathbf{n}, \mathbf{n}') I(\mathbf{x}, t; \mathbf{n}', \nu) d\mathbf{n}'$$

0次、1次モーメント式

$$\frac{\partial E_\nu}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_\nu = \sigma_\nu (4\pi S_\nu - c E_\nu)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_\nu}{\partial t} + c^2 \nabla \cdot \tilde{\mathbf{P}}_\nu = -c (\sigma_\nu + \sigma_{\nu,s}) \mathbf{F}_\nu$$

$$E_\nu(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

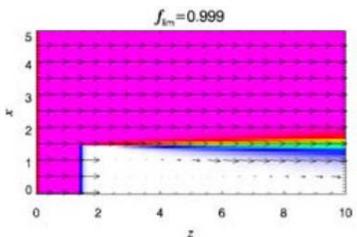
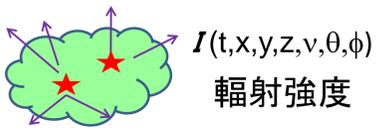
$$\mathbf{F}_\nu(t, \mathbf{r}) = \int \mathbf{n} I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

クロージャ関係

$$\tilde{\mathbf{P}}_\nu(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int \mathbf{n} \mathbf{n} I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

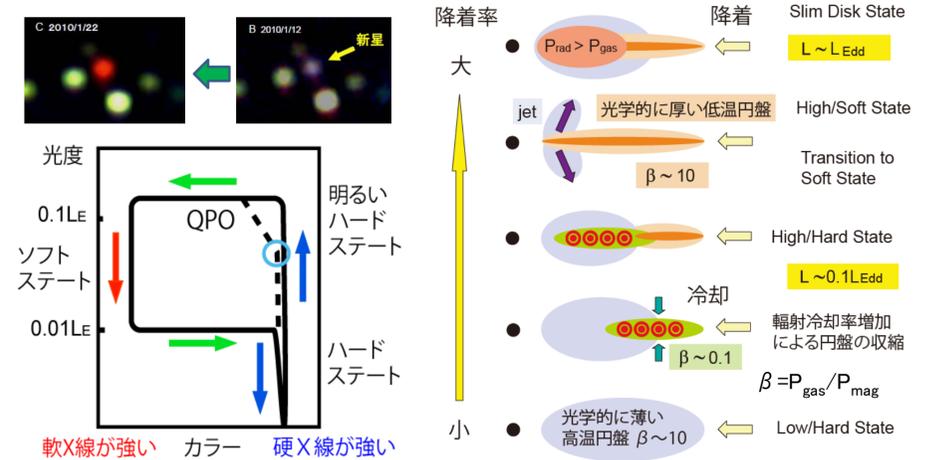
$$= \left(\frac{1-\chi}{2} \tilde{\mathbf{I}} + \frac{3\chi-1}{2} \mathbf{nn} \right) E_\nu$$

$$\chi = \frac{3+4f^2}{5+2\sqrt{4-3f^2}} \quad f = \frac{|\mathbf{F}_\nu|}{cE_\nu}$$



1次モーメント法のテスト結果 (影形成)。カラーは輻射エネルギー密度。矢印は輻射流束

4. ブラックホール候補天体への適用

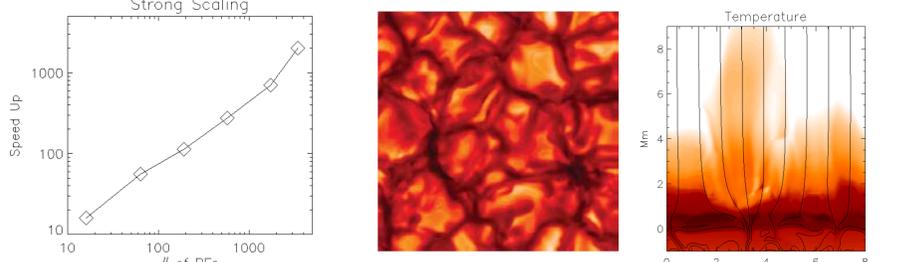


国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」搭載の全天X線監視装置MAXIで観測されたブラックホール候補天体XTE J1752-223の状態遷移 (Nakahira et al. 2010) とその理論モデル。輻射と物質の相互作用が重要になる $L > 0.1 L_{\text{Edd}}$ の計算には輻射磁気流体コードが必要。磁気流体コードにくらべて計算量が約10倍になるため、大局的な3次元計算にはPFLOPS級の計算機を要する。FX10に実装した輻射磁気流体コードの実効効率を高め、平成24年度中にシミュレーションを実施したい。

5. 輻射輸送直接解法の太陽活動への適用

各光線方向について以下の輻射輸送方程式を解き、右図の各格子点上の輻射強度を数字の順番に求めていく (短い特性曲線法)

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \rho \kappa_\nu B_\nu(T) - \rho \kappa_\nu(\rho, T) I_\nu$$



FX10の並列性能テスト結果 (196 × 196 × 388グリッド) 太陽表面对流計算 (輻射強度分布) 太陽表面ジェット。実線は磁力線。

6. 共同研究メンバーと役割分担

松元亮治 (千葉大)	研究統括、降着円盤シミュレーションの実施
廣瀬重信 (JAMSTEC)	陰的差分を用いた輻射磁気流体コードの並列性能向上、原始惑星系円盤への適用
横山央明 (東大)	輻射磁気流体シミュレーションエンジンの実装
大須賀健 (国立天文台)	輻射磁気流体コードの実装、降着円盤へ適用
花輪知幸 (千葉大)	1次モーメント法に基づく輻射流体コード実装
松本倫明 (法政大)	AMR法に基づく自己重力磁気流体コードの並列性能向上、星形成領域への適用
町田真美 (九州大)	降着円盤、銀河ガス円盤シミュレーション実施
中村賢仁 (九州産業大)	熱伝導モジュールの並列性能向上
富田賢吾 (プリンストン大)	輻射磁気流体コードの並列性能向上
高橋博之 (国立天文台)	相対論的輻射磁気流体コードの実装
川島朋尚 (千葉大)	超臨界降着流の輻射磁気流体計算の実施
小田 寛 (国立天文台)	降着円盤状態遷移シミュレーションの実施
松本洋介 (千葉大)	輻射磁気流体コードのチューニング
朝比奈雄太 (千葉大)	相対論的輻射磁気流体コードの適用
堀田英之、島海森、飯島陽久 (東大)	輻射により駆動される太陽対流と磁場との相互作用シミュレーション、輻射輸送直接解法
中島研吾、片桐孝洋 (東大)	陰的差分を用いた輻射磁気流体コードの連立一次方程式解法の開発、並列性能向上