

13-NA25

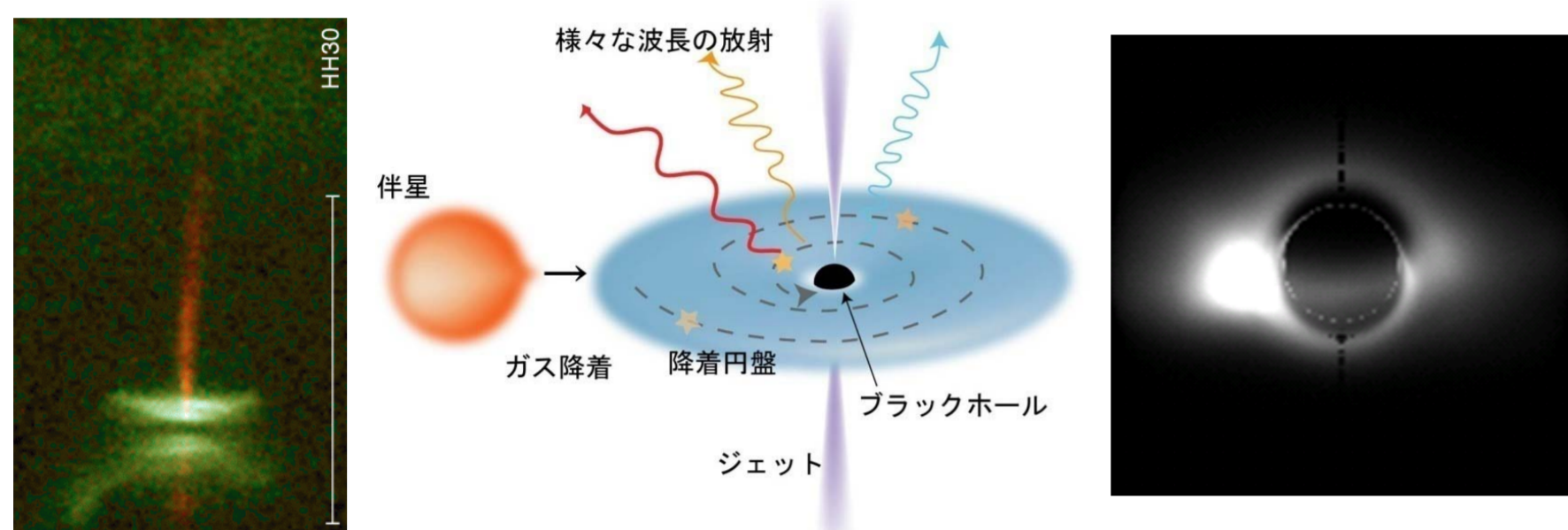
松元亮治(千葉大学大学院理学研究科)

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

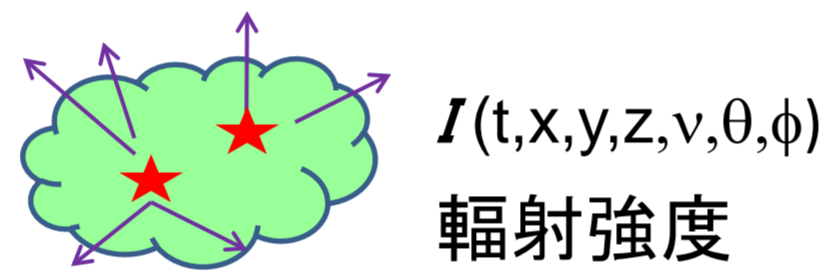
輻射の吸収、放射、散乱等を記述する輻射輸送方程式を、加熱・冷却、輻射圧加速等を考慮した磁気流体方程式と連立させて解く輻射磁気流体コードを超並列計算機に実装して天体活動現象の大規模シミュレーションに適用する。原始惑星系円盤など、輻射の時間スケールが系の力学的時間スケールに比べて短い系では輻射場の計算に陰的差分を用いるため、大規模な連立方程式を解く必要がある。この部分の並列性能向上をはかる。



星形成と原始星円盤 (Burrows 1995) 降着円盤とジェット ブラックホール

2. 輻射輸送方程式の解法

1次モーメント法



$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla \right) I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) = -\sigma_{\nu} I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) + \sigma_{\nu} S_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) + \sigma_{\nu, s} \int g(\mathbf{n}, \mathbf{n}') I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}') d\mathbf{n}'$$

吸収 放射 散乱

0次、1次モーメント式

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

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

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

輻射エネルギー密度

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

輻射流束

クロージャ関係

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

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

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

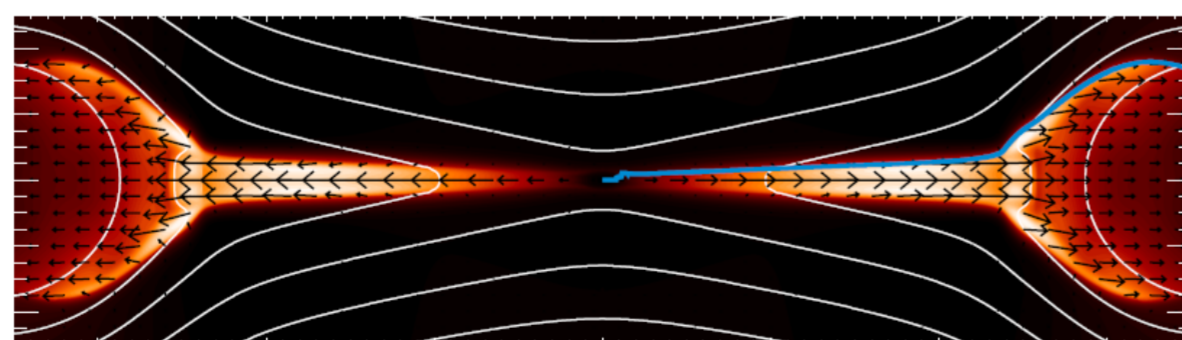


1次モーメント法によるテスト結果 (影形成)。カラーは輻射エネルギー密度。

相対論化

$$T_{\text{rad}, \nu}^{\mu\nu} = -G^{\mu\nu}$$

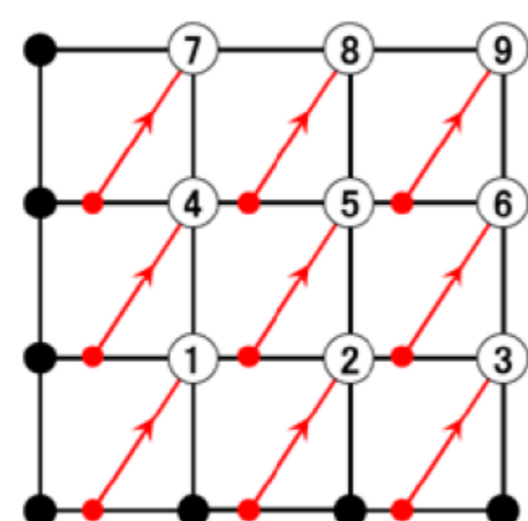
$$T_{\text{rad}} = \begin{pmatrix} E_r & F_r \\ F_r & P_r \end{pmatrix}$$



相対論的輻射磁気流体コードの適用例。カラーは輻射エネルギー密度、実線は磁力線 (Takahashi and Ohsuga 2013)。

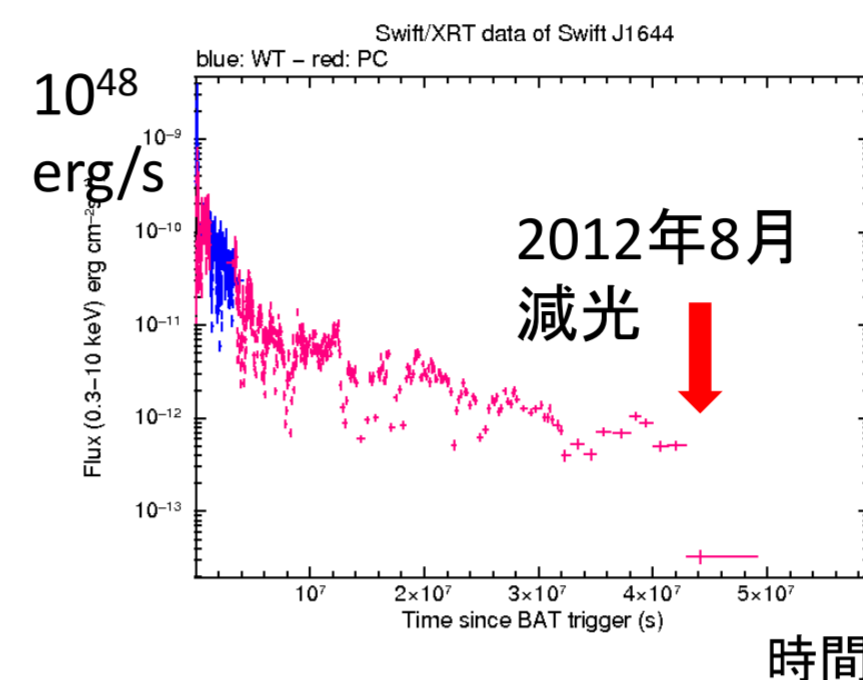
輻射輸送方程式の直接解法

散乱が無視できる場合、各光線方向について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解法(短い特性曲線法)を実装済み。今後、散乱項を含む場合に拡張していく。

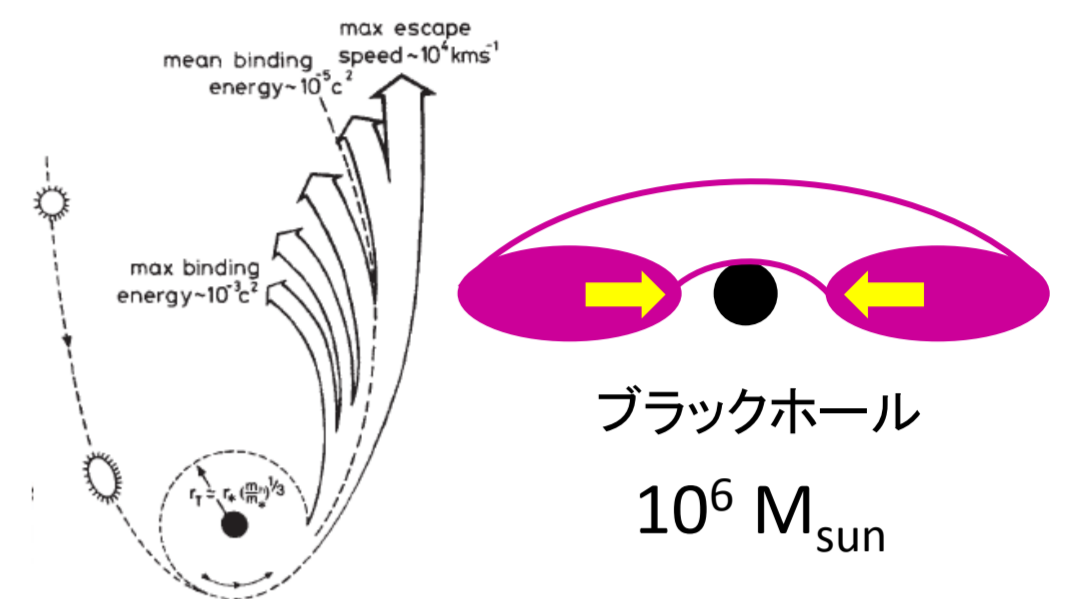


3. ブラックホール候補天体への適用

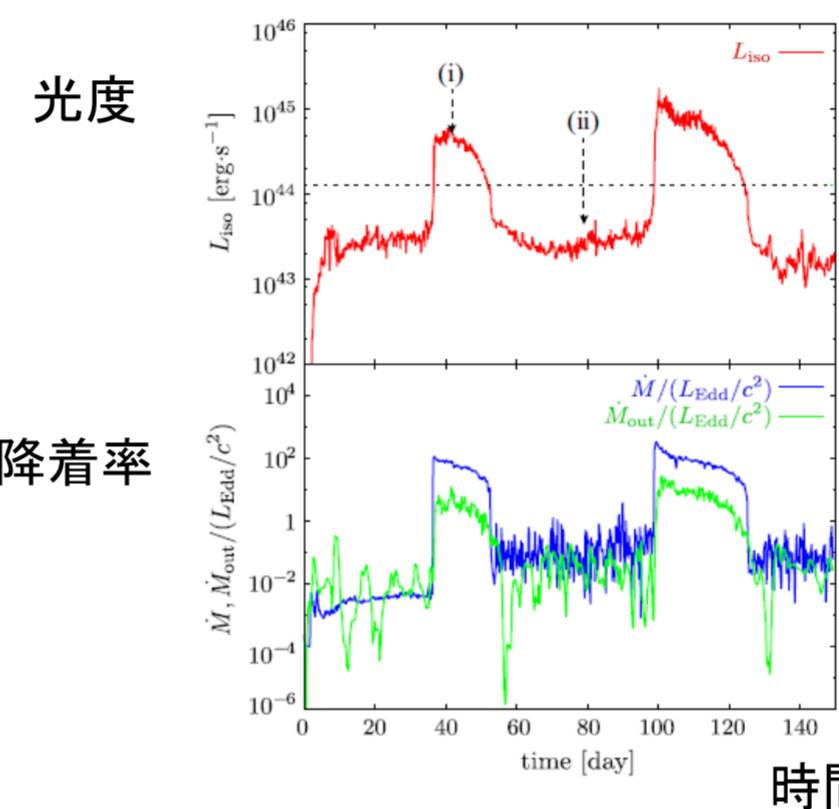
2011年3月28日に赤方偏移z=0.35にある銀河の中心核が突然増光。光度は球対称降着流の上限界光度であるエディントン光度の1万倍に達した。この銀河中心にある巨大ブラックホールによって恒星が潮汐破壊されたと考えられている。



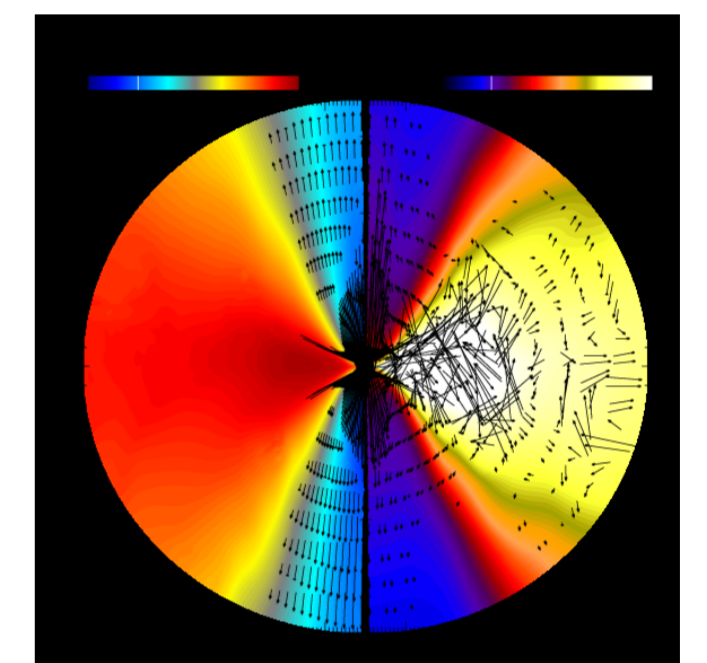
Swift衛星によって観測された光度変化。http://www.swift.ac.uk/xrt_curves/00450158/



巨大ブラックホールによる恒星の潮汐破壊事象 (Rees 1988) 降着円盤の形成と進化を探ることができる貴重な機会



拡散近似(FLD法)に基づく軸対称2次元輻射流体シミュレーション結果 (Kawashima et al. 2013)。粘性パラメータ $\alpha=0.01$ のとき、2013-2014に再増光することが期待される。



1次モーメント法に基づく相対論的輻射磁気流体コードを用いた軸対称2次元計算結果。左図: 密度と速度、右図: 輻射エネルギー密度と輻射流束。増光時にジェットが噴出している。減光、再増光を再現することが課題。

4. 陰的解法の効率改善

輻射場の計算に陰的差分を適用する際にあらわれるマトリクスソルバーの高速化を試みている。線形ソルバーとして前処理付きKrylov法の一種であり安定性に優れたFlexible GMRES法を実装。係数行列保存形式としてDIA形式を採用。

5. 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
大須賀健(国立天文台)	輻射輸送直接解法の実装、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
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
高橋博之(国立天文台)	相対論的輻射磁気流体コードの適用
小田 寛(JAXA)	降着円盤状態遷移シミュレーションの実施
川島朋尚(上海天文台)	超臨界降着流の輻射スペクトル計算
朝比奈雄太(千葉大)	相対論的輻射磁気流体コードの適用
工藤祐己(千葉大)	陰的差分を用いた熱伝導モジュール実装
堀田英之(東大)	ダイナモ計算への適用
飯島陽久(東大)	輻射輸送方程式直接解法の実装
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