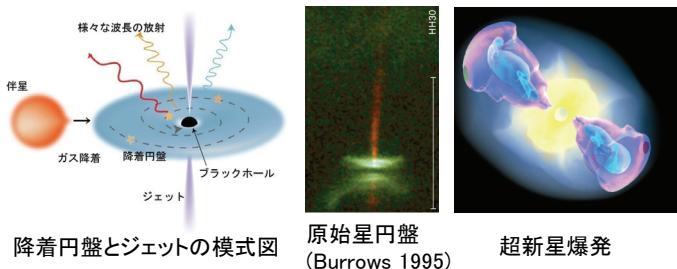


# 天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーション



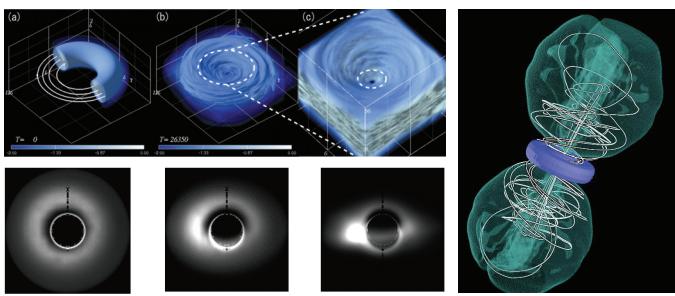
## 1. 研究目的

様々な天体现象で重要な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の並列効率を高め、超並列計算機を用いた宇宙現象の大規模シミュレーションに適用することを目的とする。



輻射と磁気流体の相互作用が重要な天体现象の例

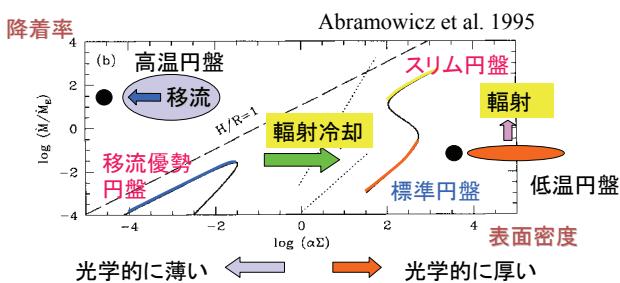
## 2. 降着円盤の大局的3次元磁気流体数値実験



ブラックホール降着円盤の3次元磁気流体シミュレーション結果。円筒座標  $250 \times 64 \times 384$  格子点。画像提供:町田真美、M. Bursa 氏

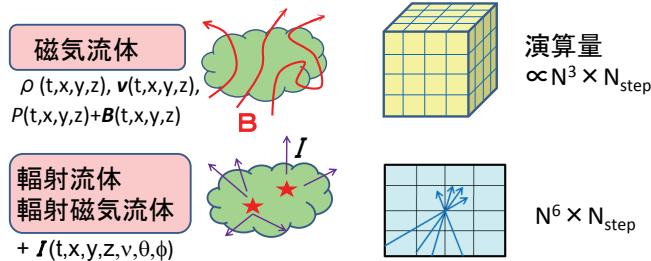
ブラックホール降着円盤から噴出するジェット。画像提供:加藤成晃氏

## 3. 降着円盤の進化モデル



降着円盤の熱平衡曲線。さまざまな状態間の遷移が観測されている。  
進化の全貌を理解するためには輻射を考慮する必要がある。

## 4. 磁気流体から輻射磁気流体へ



## 5. 輻射輸送方程式の近似解法

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

レベル0 : Flux Limited Diffusion (FLD)近似

$$\mathbf{F} = \begin{cases} -cE \frac{\nabla E}{|\nabla E|} & (\text{optically thin limit}) \\ -\frac{c}{3\chi} \nabla E & (\text{optically thick limit}) \end{cases}$$

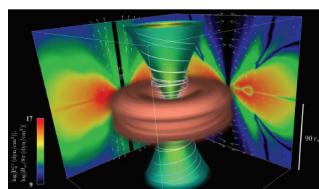
レベル1 : 1次のモーメント式を解く (M1スキーム)

$$\partial_t E_r^\nu + \nabla \cdot \mathbf{F}_r^\nu = \sigma_a^\nu (4\pi B - cE_r^\nu) \\ \partial_t \mathbf{F}_r^\nu + c^2 \nabla \cdot \mathbf{P}_r^\nu = -(\sigma^\nu - g_1 \sigma_s^\nu) c \mathbf{F}_r^\nu \quad \mathbf{P}_r^\nu = D E_r^\nu$$

## 6. 輻射磁気流体の基礎方程式 (FLD近似)

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$	輻射と物質の相互作用
$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P + \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{4\pi} + \rho \mathbf{g} + \frac{\kappa + \sigma}{c} \mathbf{F}_0$	
$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \eta \nabla \times \mathbf{B})$	
$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \mathbf{v}) + P \nabla \cdot \mathbf{v} = Q_J + Q_{vis} - 4\pi \kappa B + c \kappa E_0$	輻射による加熱と冷却
$\frac{\partial E_0}{\partial t} + \nabla \cdot (E_0 \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \mathbf{F}_0 + 4\pi \kappa B - c \kappa E_0 - \nabla \mathbf{v} \cdot \mathbf{P}_0$	輻射エネルギー密度の変化

## 7. 軸対称2次元輻射磁気流体シミュレーション例



Takeuchi, Ohsuga, Mineshige (2010)によるブラックホールへの超臨界降着の輻射磁気流体シミュレーション結果。FLD近似に基づく。これを3次元計算に拡張したい。

## 8. 共同研究実施内容と役割分担

- FLD近似を用いた3次元輻射磁気流体コードにあらわれる陰的差分のマトリックスソルバーの並列効率を高める。
- 輻射流束と輻射エネルギー密度の計算にM1法を適用した輻射磁気流体コードを実装する。
- 3次元適合格子細分化(AMR)法におけるマルチグリッド法の陰解法エンジンを高速化し、星形成領域に適用する。

松元亮治(千葉大) 廣瀬重信(JAMSTEC)	研究統括、降着円盤シミュレーションの実施 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) 大須賀健(国立天文台)	輻射磁気流体シミュレーションエンジンの実装 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) 松本倫明(法政大)	M1スキームに基づく輻射磁気流体コード実装 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) 中村賢仁(九州産業大)	降着円盤、銀河ガス円盤シミュレーション実施 熱伝導モジュールの並列性能向上
富田賢吾(総研大) 小田 寛(千葉大)	輻射磁気流体コードの並列性能向上 降着円盤状態遷移シミュレーションの実施
三上隼人(千葉大) 川島朋尚(千葉大)	超新星爆発の3次元磁気流体計算への適用 超臨界降着流の輻射磁気流体計算の実施
小川崇之(千葉大) 中島研吾、片桐孝洋(東大)	HLLD法に基づく輻射磁気流体コードの実装 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