



サブ課題C； ブラックホール降着流

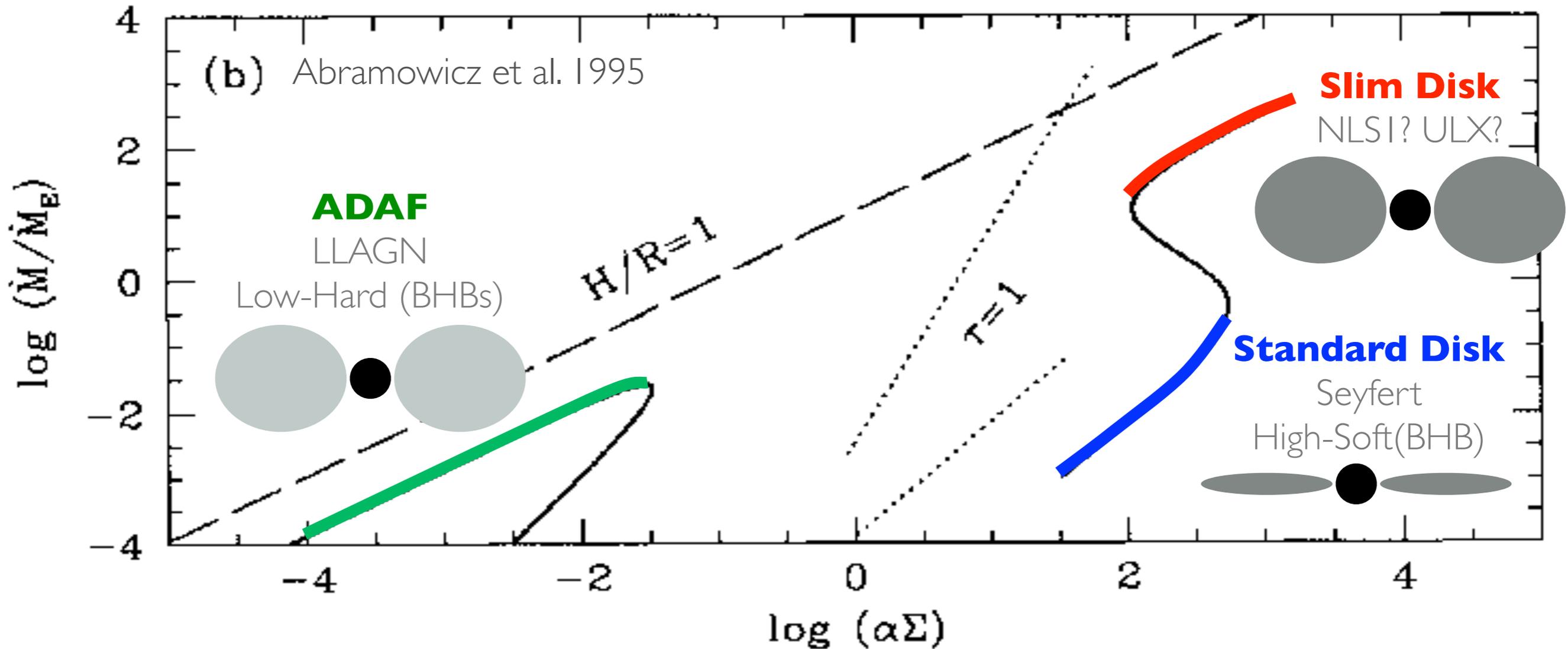
大須賀 健, 高橋 博之, 川島 朋尚 (国立天文台)
松元 亮治 (千葉大学), 町田 真美 (九州大)

何を知りたいのか？

- **ブラックホールの周囲で何が起こっているのか？**

- 巨大ブラックホールはどのように成長したのか？ ➡ ブラックホールへのガス降着
- 巨大ブラックホールの成長と母銀河の進化にはどういった関係があるのか？
➡ ブラックホール周辺からのガス噴出

Three Accretion States



	ADAF	Standard	Slim
Magnetic effects	YES	YES	YES
Radiative Cooling	NO	YES	YES
Radiation Force	NO	NO	YES

巨大BH成長シナリオの一例

Slim Disk



$\dot{M} \gg L_E/c^2$ で急速成長
でないと $z \sim 7$ の quasar が説明できない.

Standard Disk



成長の最終段階は $\dot{M} \sim L_E/c^2$
でないと Soltan argument と矛盾

ADAF

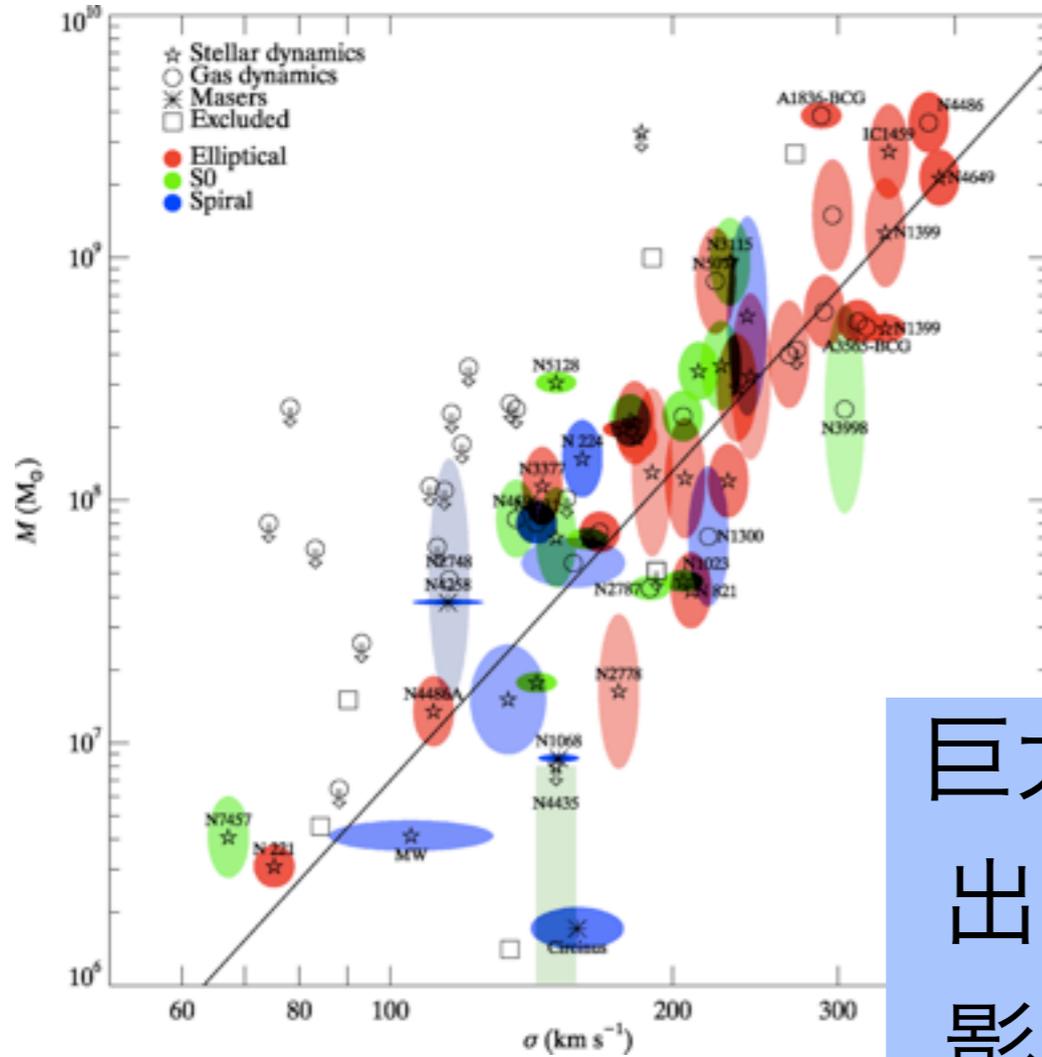


成長は既に終わっ
ており, $\dot{M} \ll L_E/c^2$

巨大BHと母銀河の相関

Gültekin et al. 2009

BH質量

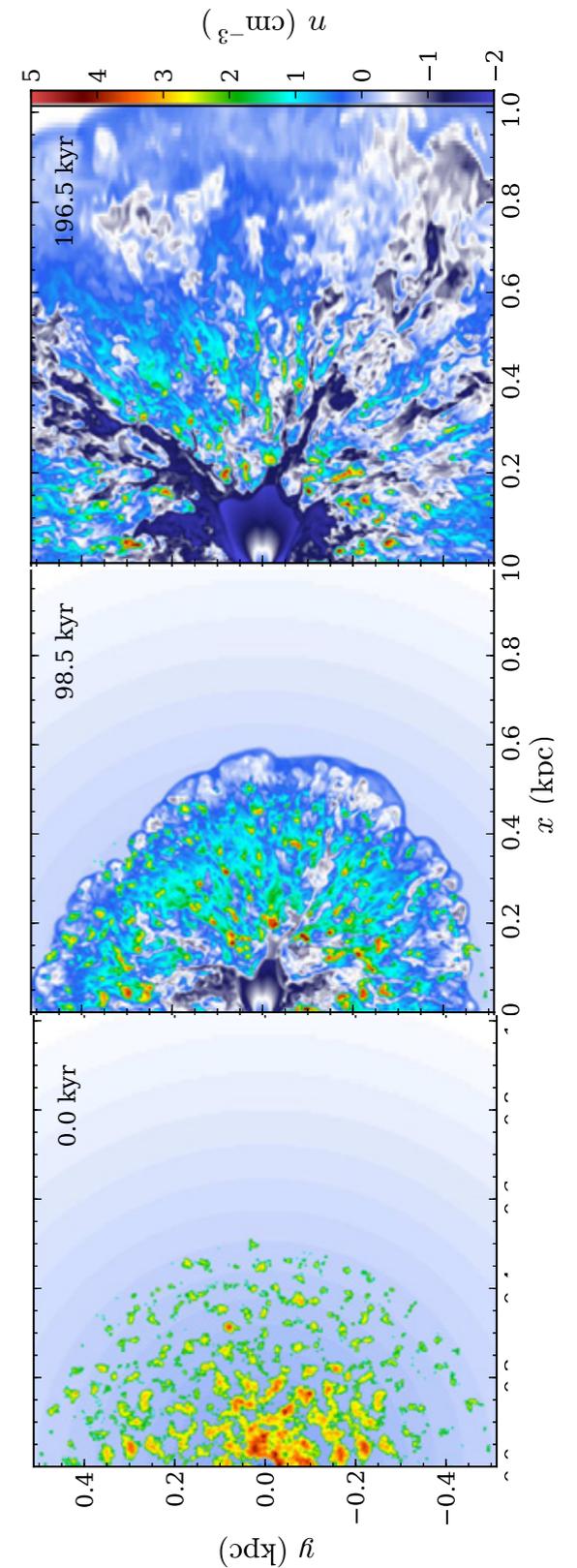


銀河バルジ
の質量

巨大BHからのガス噴
出が母銀河の進化に
影響を与えたかもし
れない！

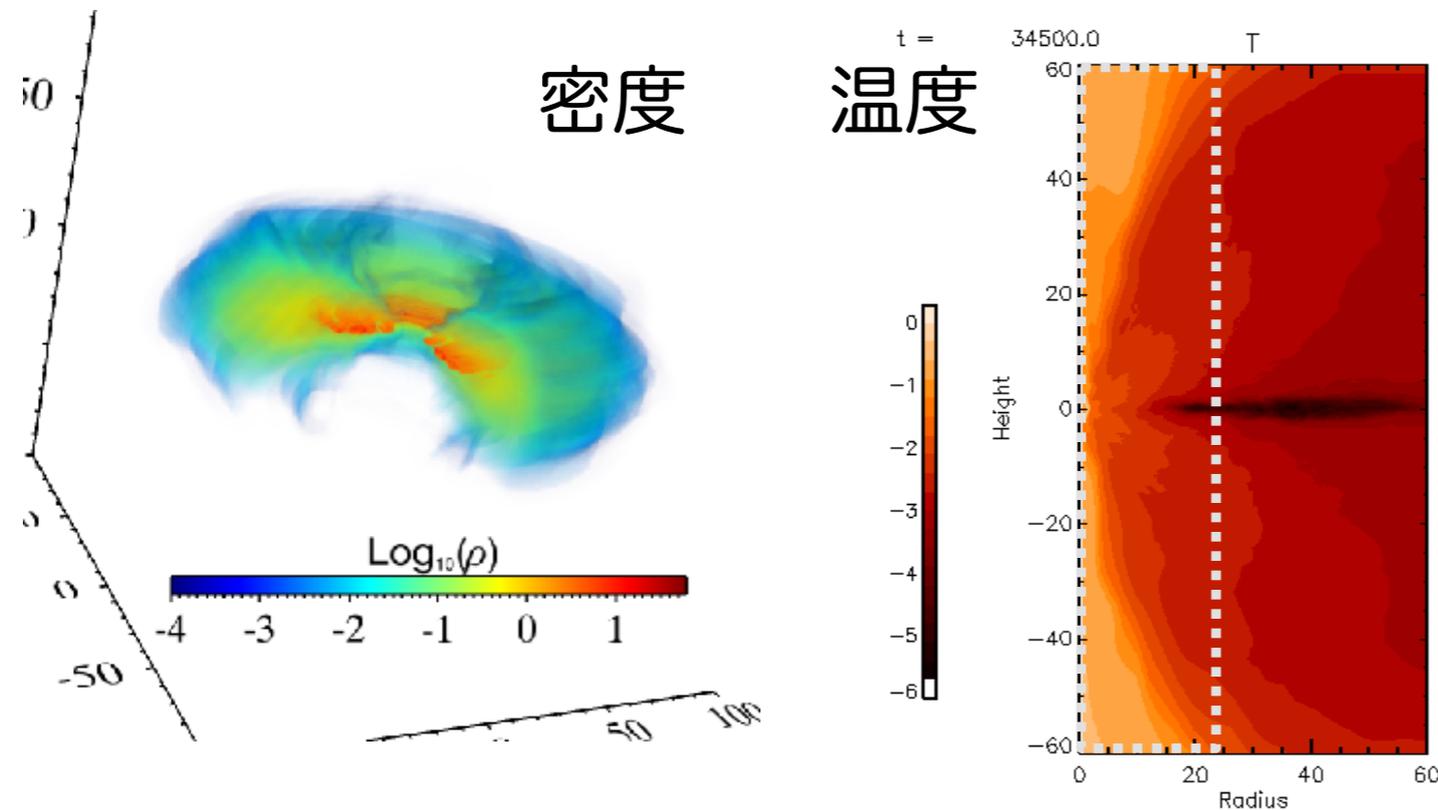
(昨日の行方さんの講演)

Wagner et al. 2013



低降着率円盤のMHDシミュレーション

(c) 町田, 松元



今後の課題
i)高解像度
ii)熱伝導の導入
iii)二温度プラズマの導入

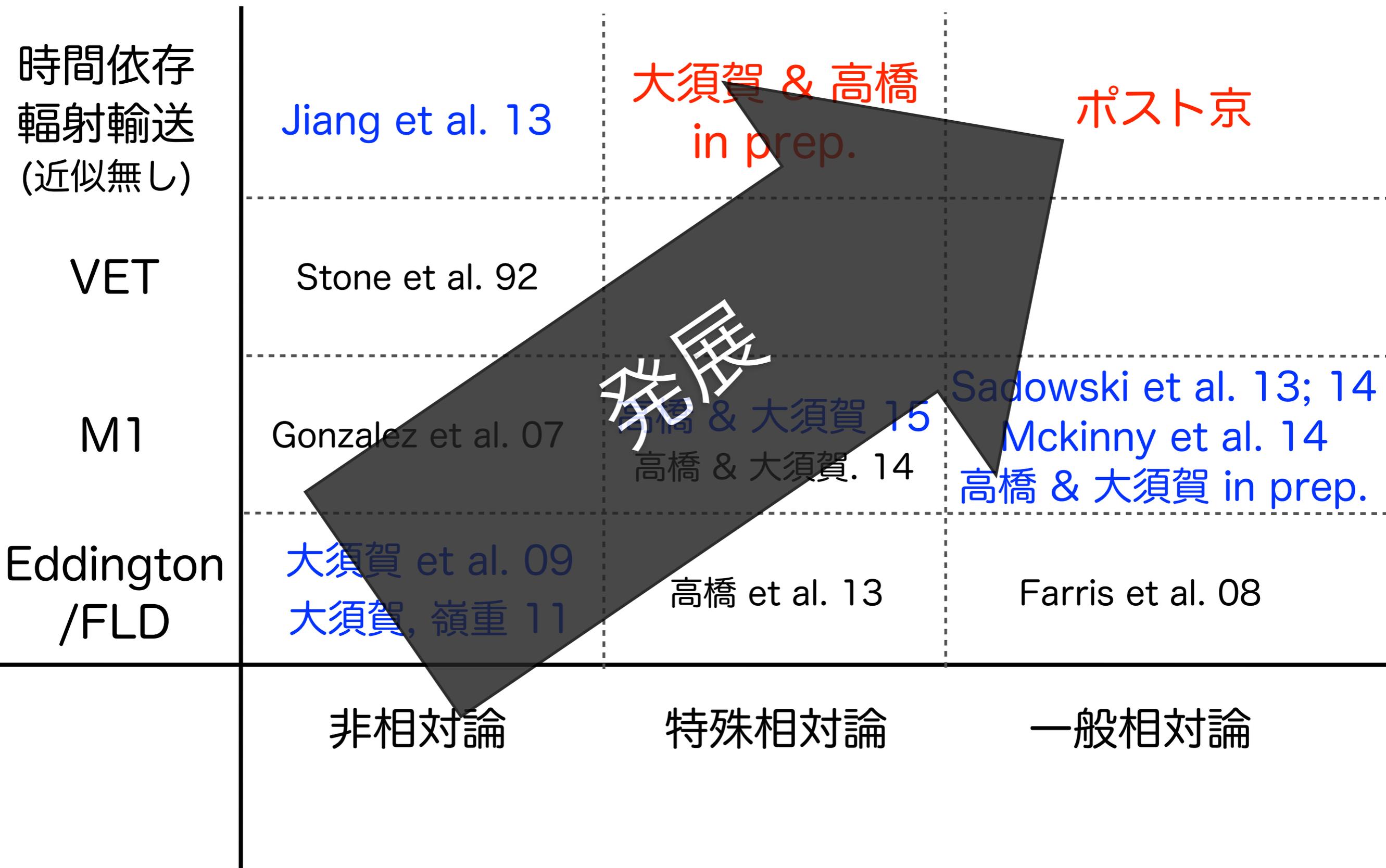
高解像度、且つ輻射冷却入りの計算



①激しい爆発が起こる

②赤道面付近に低温円盤が生成

輻射磁気流体シミュレーション



GR-RMHDシミュレーション

連続の式	$\partial_t (\sqrt{-g} \rho u^t) + \partial_i (\sqrt{-g} \rho u^i) = 0$
Gauss's law	$\partial_i (\sqrt{-g} B^i) = 0$
誘導方程式	$\partial_t (\sqrt{-g} B^i) = -\partial_j [\sqrt{-g} (b^j u^i - b^i u^j)]$
MHDエネルギー 運動量保存	$\partial_t (\sqrt{-g} T_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g} T_\nu^i) = \sqrt{-g} T_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda + \sqrt{-g} G_\nu$
輻射エネルギー 運動量保存	$\partial_t (\sqrt{-g} R_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g} R_\nu^i) = \sqrt{-g} R_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda - \sqrt{-g} G_\nu$
輻射4元力	$G^\mu = -\rho(\kappa_a + \kappa_s) R^{\mu\nu} u_\nu - \rho(\kappa_s R^{\alpha\beta} u_\alpha u_\beta + \kappa_a 4\pi B) u^\mu$
M1-closure	$R^{\mu\nu} = \frac{4}{3} \bar{E}_R u_R^\mu u_R^\nu + \frac{1}{3} \bar{E}_R g^{\mu\nu}$

metric: Kerr-Schild座標 (固定メトリック)

div B条件: flux-CT法、輻射4元力の取り扱い: operator splitting + semi-implicit法

解くべき方程式

$$\partial_t U + \partial_x F^x = S$$

移流項 **陽解法**

$$\partial_t U + \partial_x F^x = 0$$

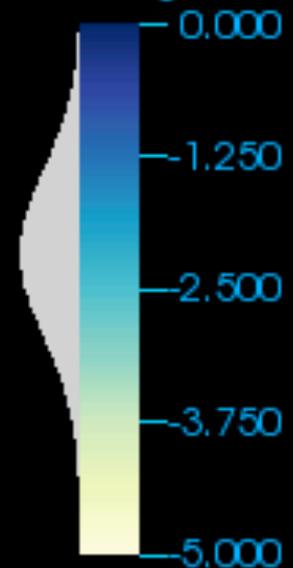
ソース項 **陰解法**

$$\partial_t U = S$$

Time: 0.151 s

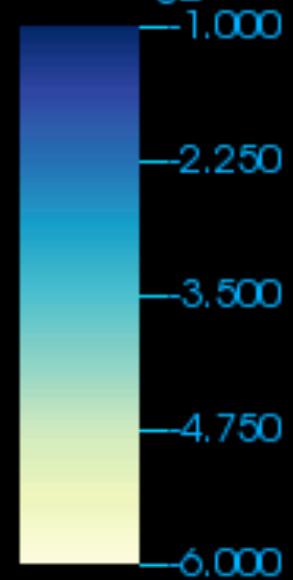
Takahashi & Ohsuga in prep.
(高橋さんの昨日の講演)

Volume
Var: log_ro

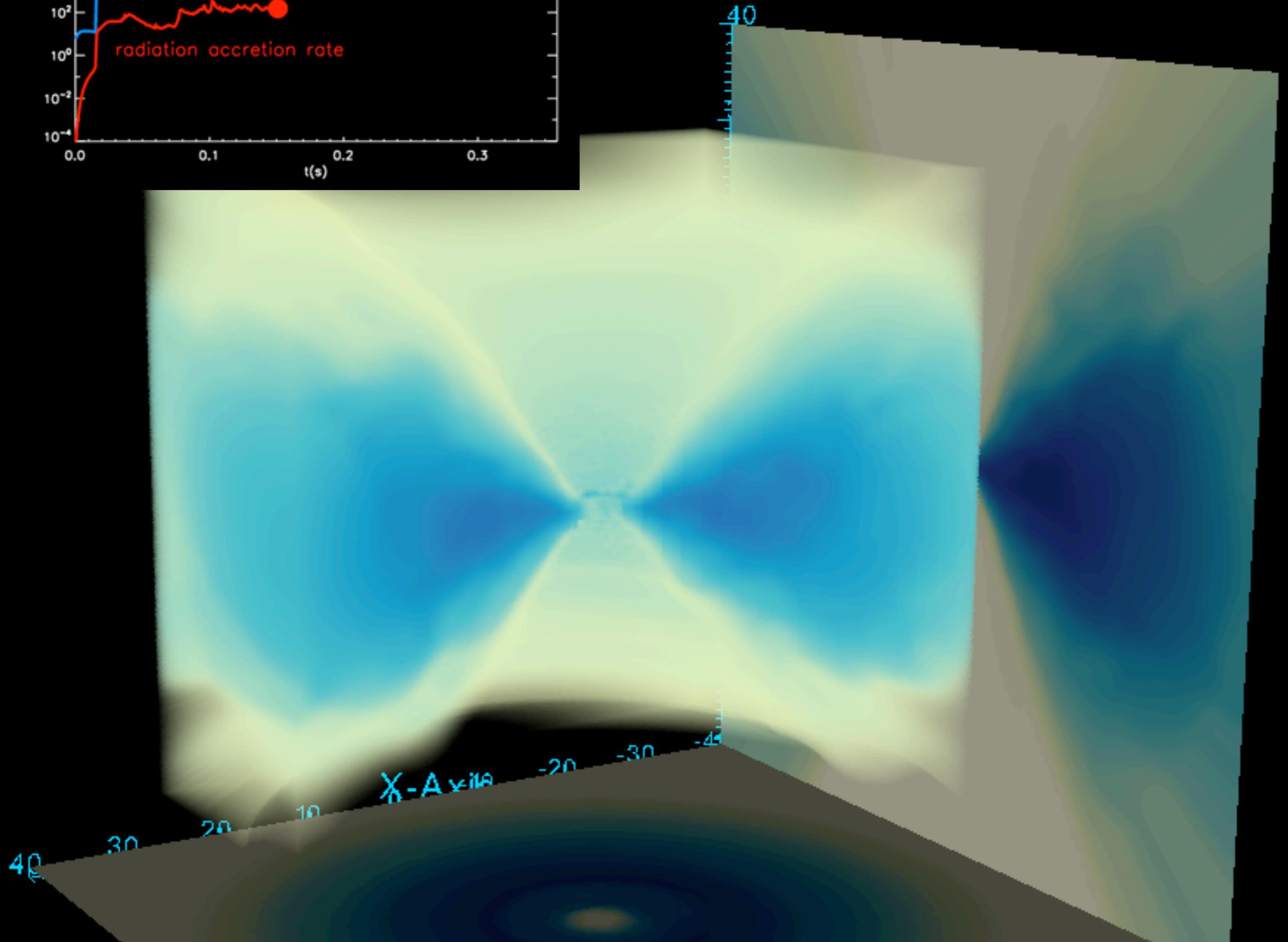
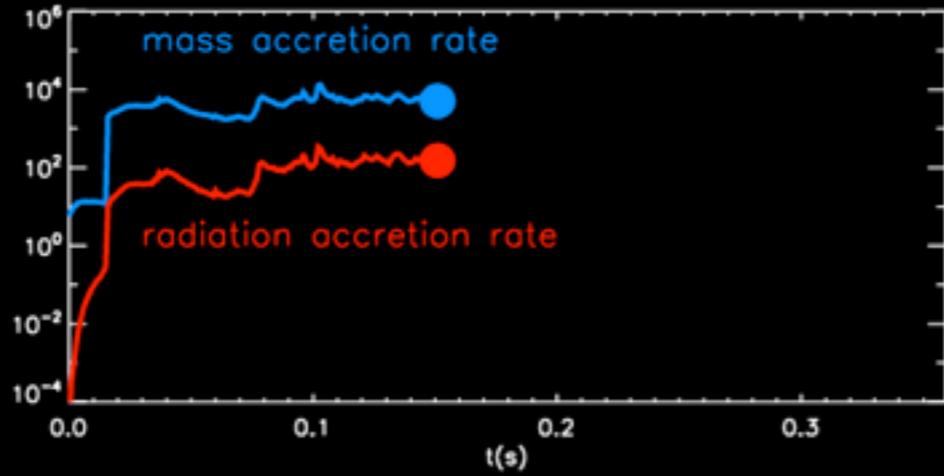


Max: -1.261
Min: -7.566

Pseudocolor
Var: log_ro



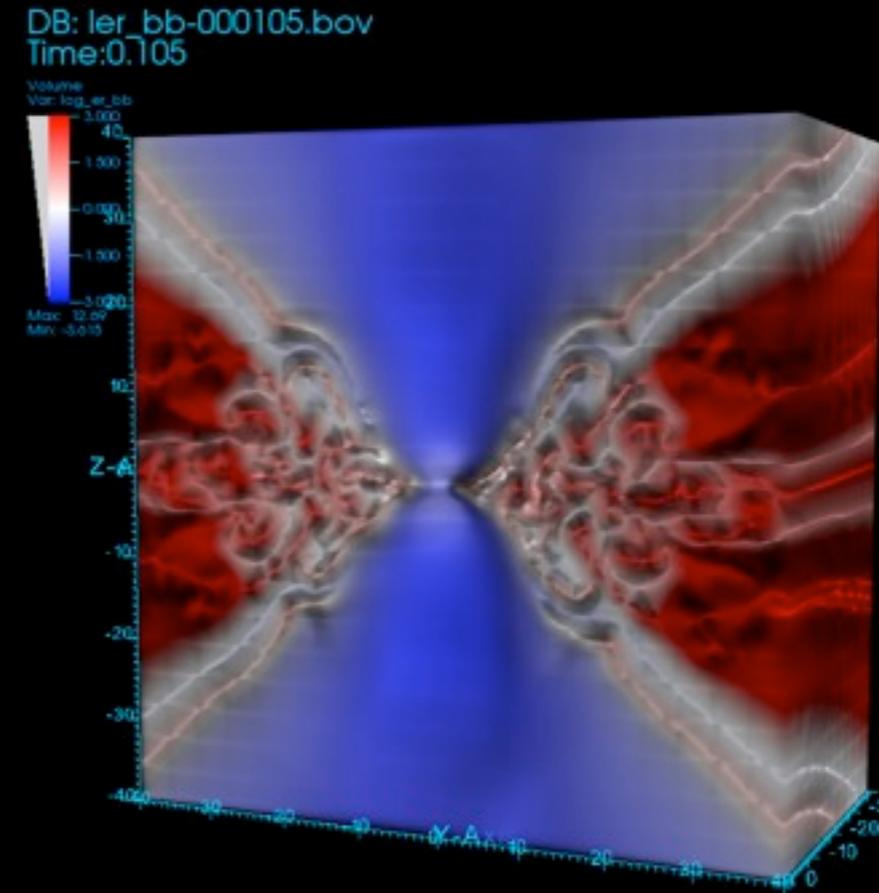
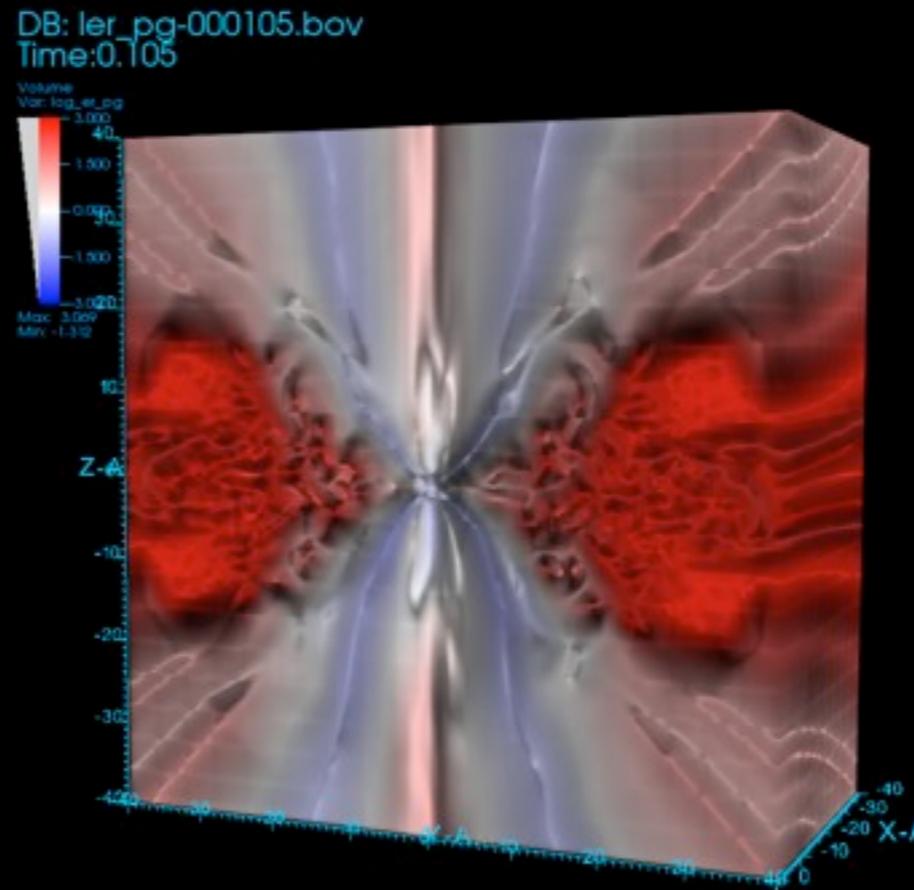
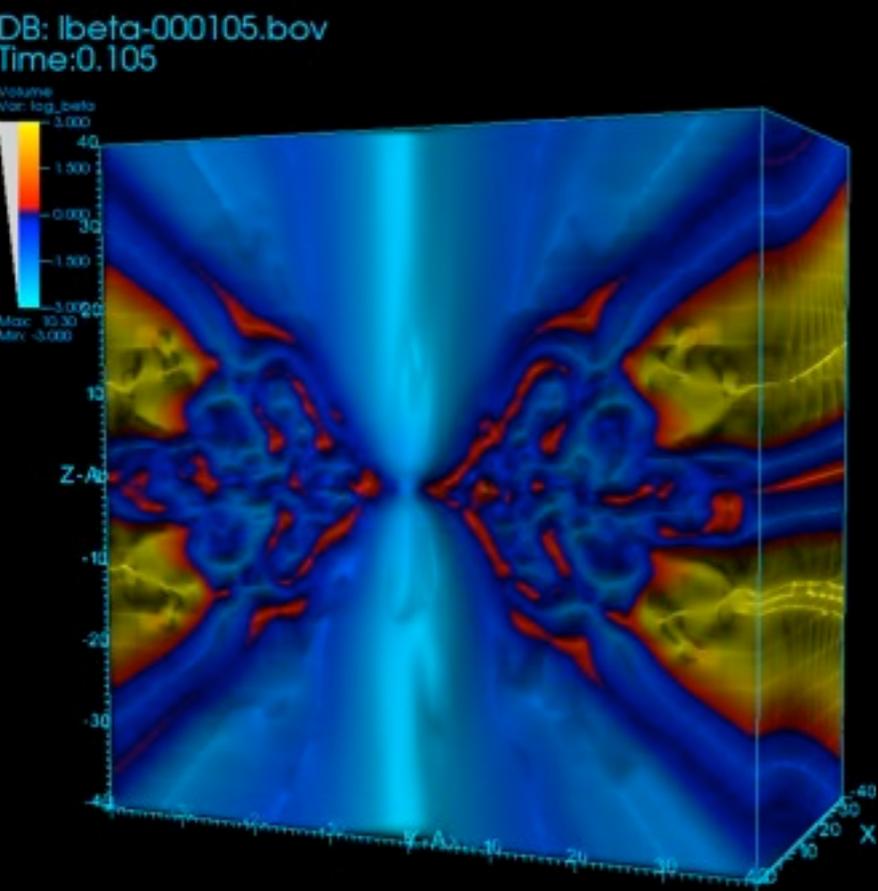
Max: -1.261
Min: -7.566



ガスE/磁気圧

ガスE/輻射E

輻射E/磁場E



円盤内：

輻射E >> 磁気E > ガスの熱E

輻射温度~ガス温度

アウトフロー：

磁気E~>輻射E >> ガスの熱E

RMHD(近似無し)

質量保存 $\partial_t(\gamma\rho) + \nabla \cdot (\gamma\rho\mathbf{v}) = 0$

磁気流体の運動量保存

$$\partial_t \mathbf{M}_{\text{MHD}} + \nabla \cdot \mathbf{P}_{\text{MHD}} = S_{\text{mom}}(\rho, \mathbf{v}, p_g, \mathbf{B}, E_{\text{rad}}, \mathbf{F}_{\text{rad}}, \mathbf{P}_{\text{rad}})$$

磁気流体のエネルギー保存

$$\partial_t E_{\text{MHD}} + \nabla \cdot \mathbf{M}_{\text{MHD}} = S_{\text{ene}}(\rho, \mathbf{v}, p_g, \mathbf{B}, E_{\text{rad}}, \mathbf{F}_{\text{rad}}, \mathbf{P}_{\text{rad}})$$

誘導方程式 $\partial_t \mathbf{B} + \nabla \times \mathbf{E} = 0$

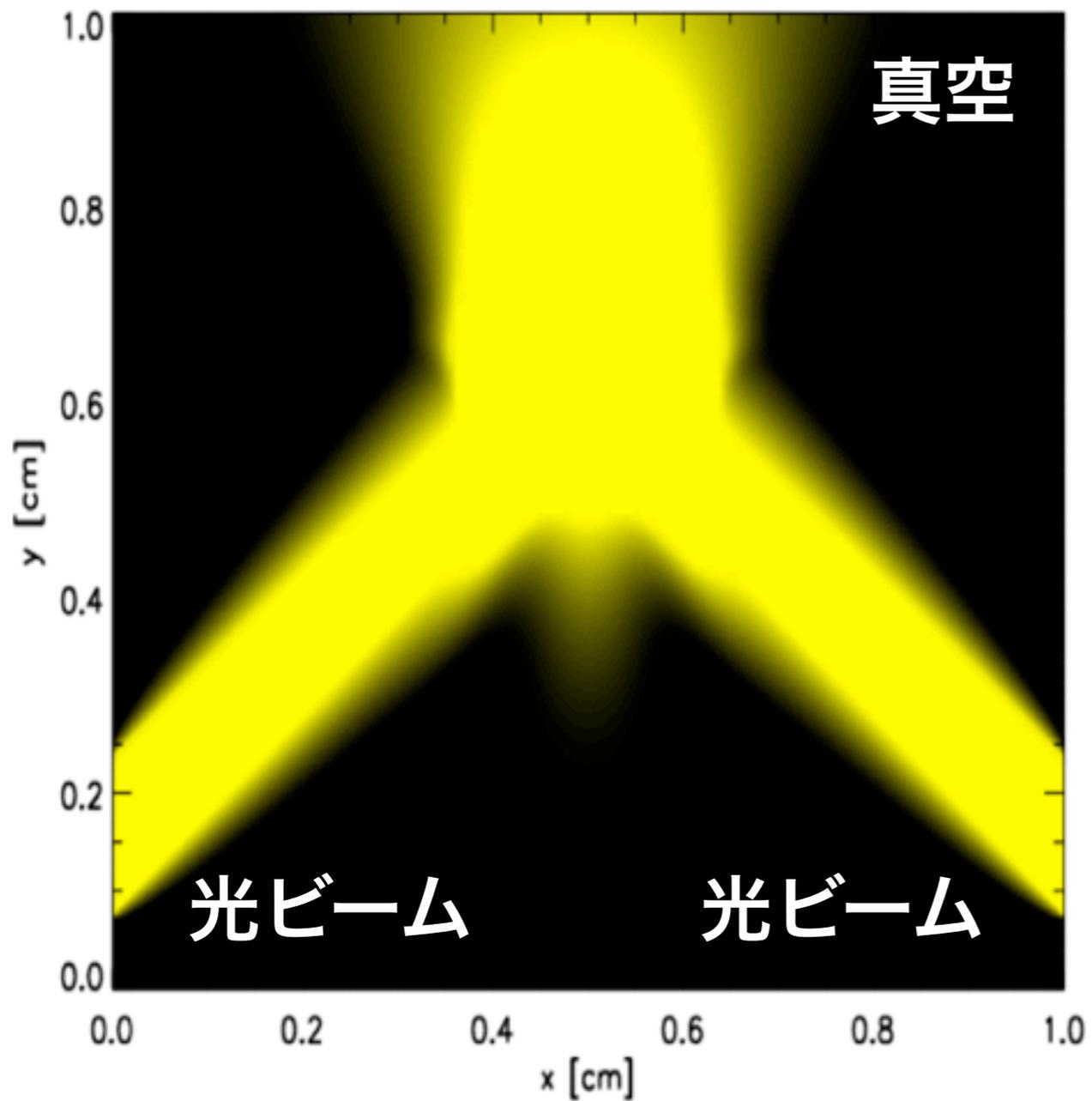
輻射輸送方程式

$$\partial_t I + (\mathbf{l} \cdot \nabla) I = -\gamma (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{l}) (\kappa + \sigma) I + \gamma^{-3} (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{l})^{-3} \left[\kappa B + \frac{\sigma}{4\pi} \left\{ E'_{\text{rad}} - \frac{\delta}{4} (E'_{\text{rad}} - 3\mathbf{l}'\mathbf{l}' P'_{\text{rad}}) \right\} \right]$$

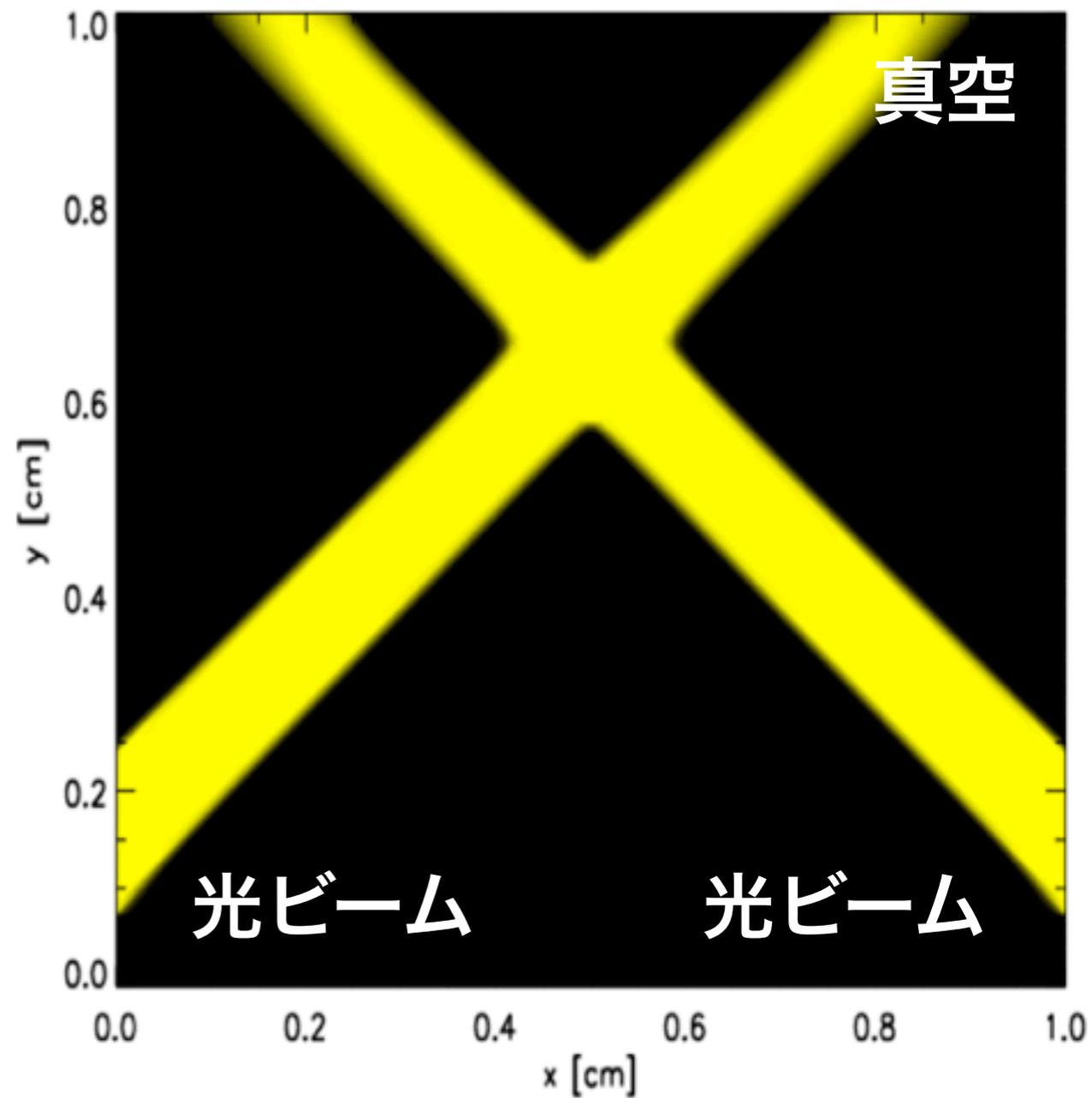
$$E_{\text{rad}} = \int I d\Omega \quad \mathbf{F}_{\text{rad}} = \int I \mathbf{l} d\Omega \quad \mathbf{P}_{\text{rad}} = \int I \mathbf{l} \mathbf{l} d\Omega$$

TEST

MI

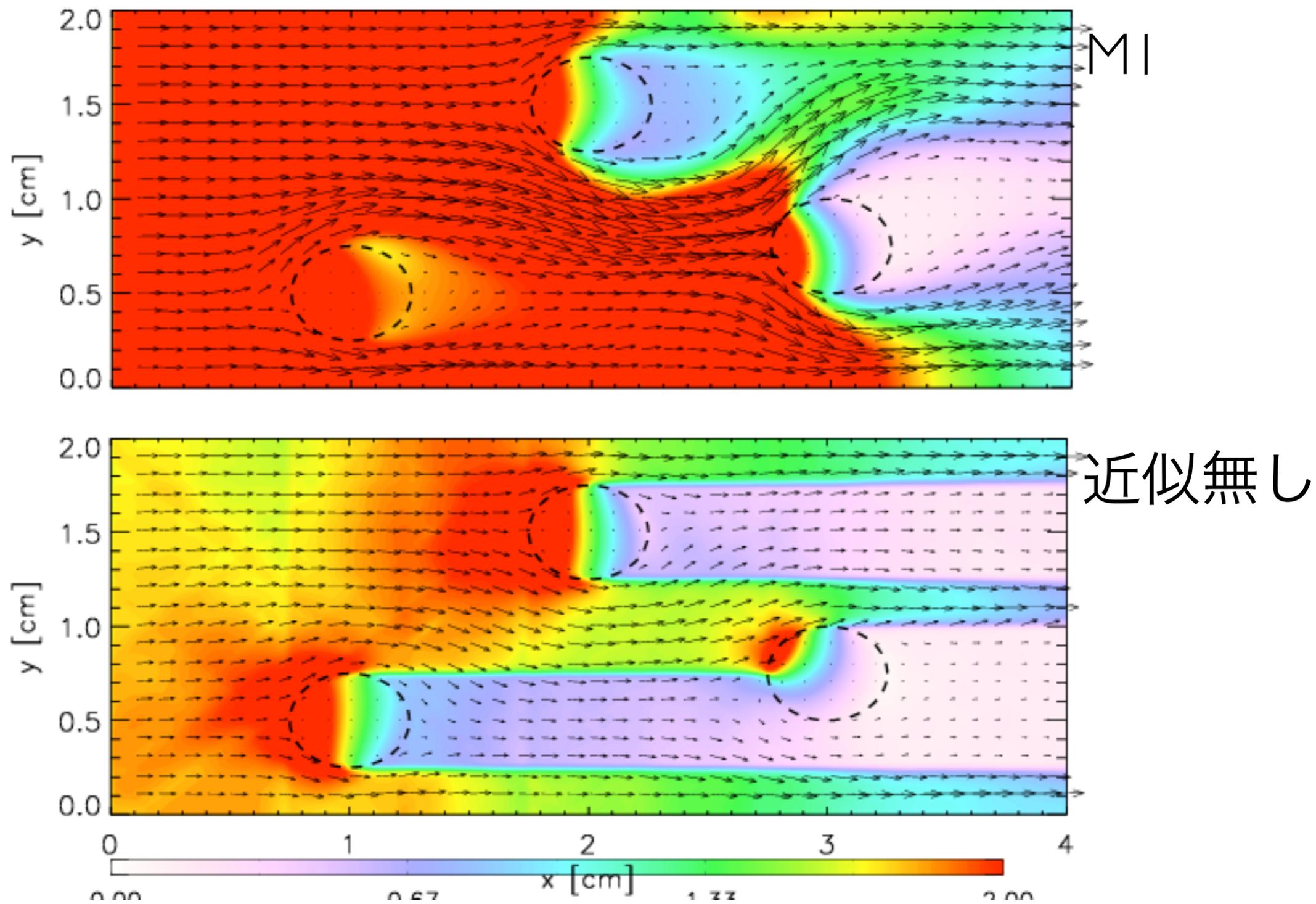


近似無し

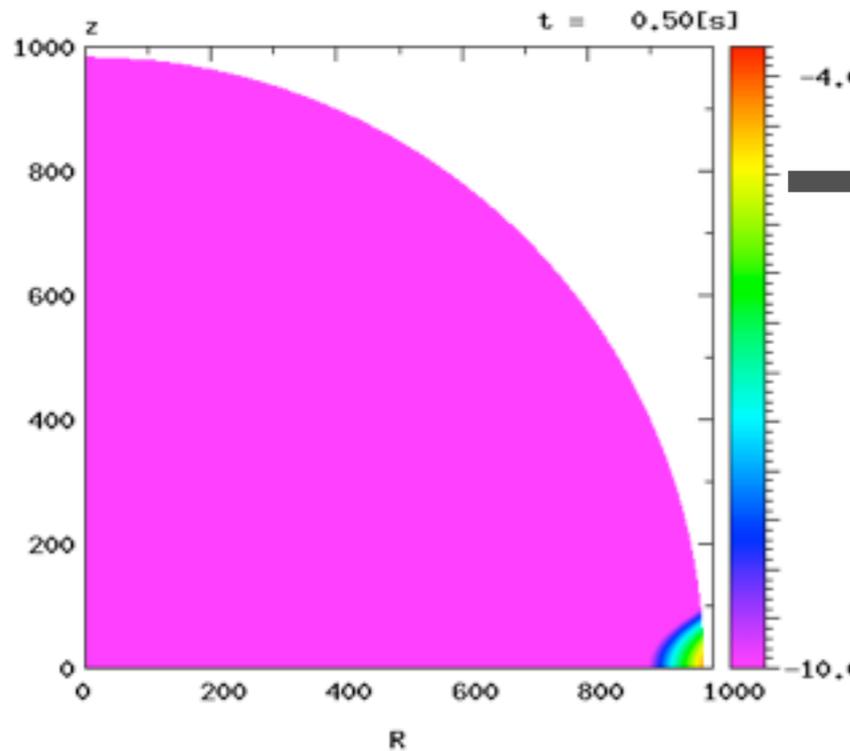


TEST

輻射E密度

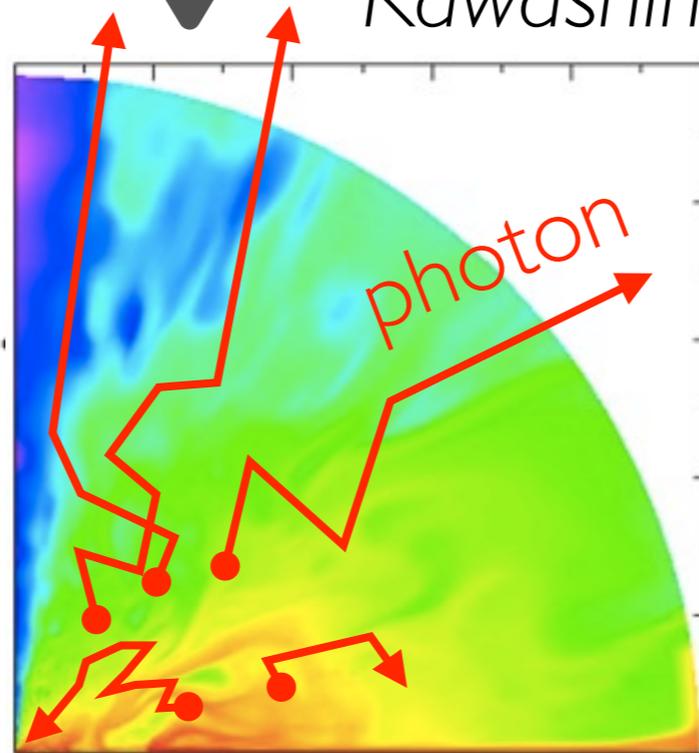


モンテカルロ口輻射輸送

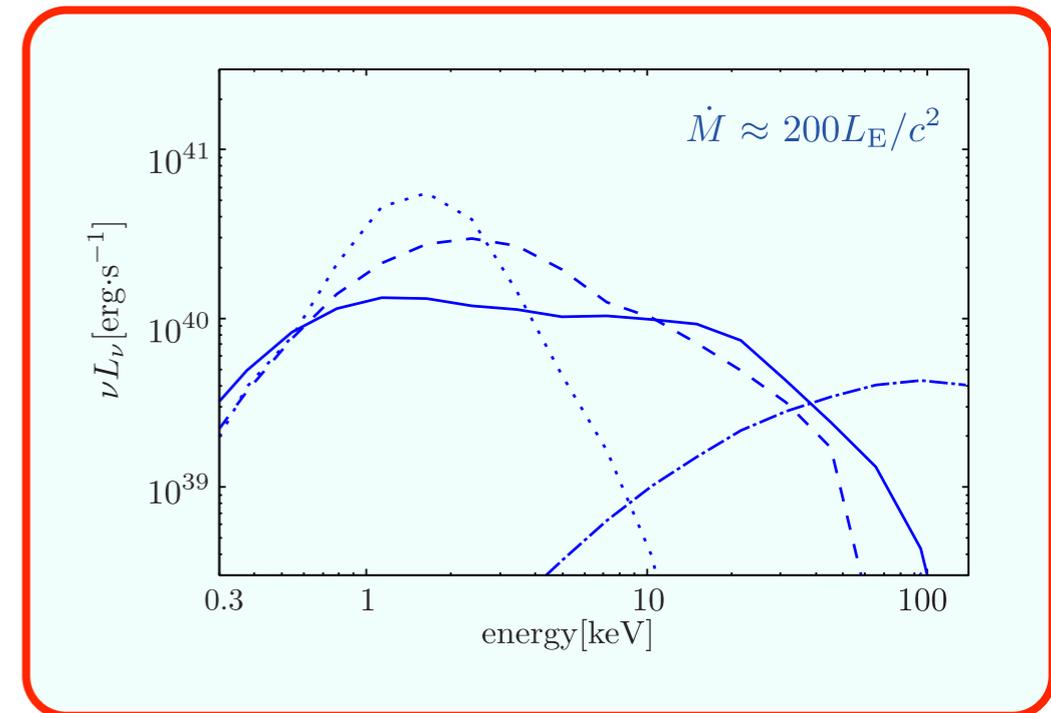


Step 1;
RHD simulation
Ohsuga et al. 2005,
Apj, 628, 368

Step 2; Monte Carlo Radiation transfer
(free-free, thermal & bulk compton)
Kawashima, Ohsuga et al. 2012

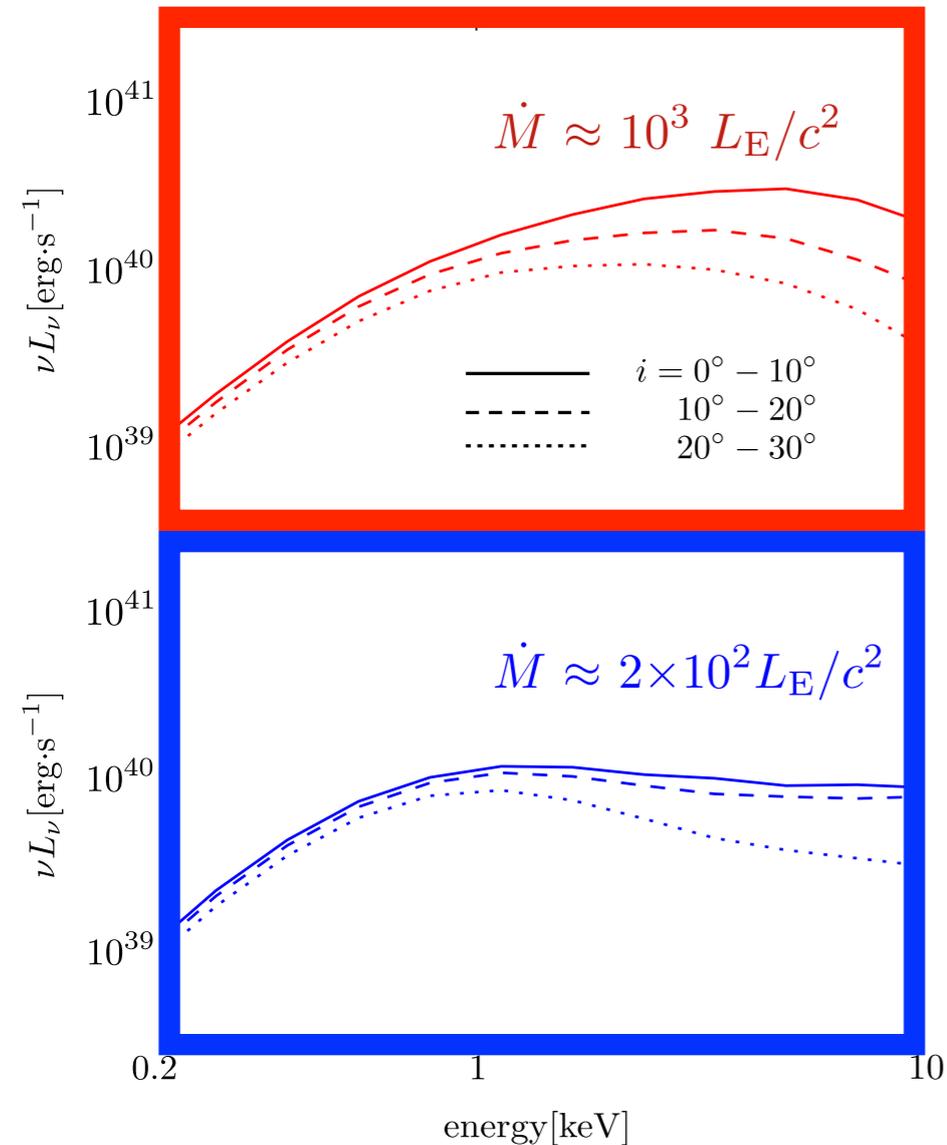


SED

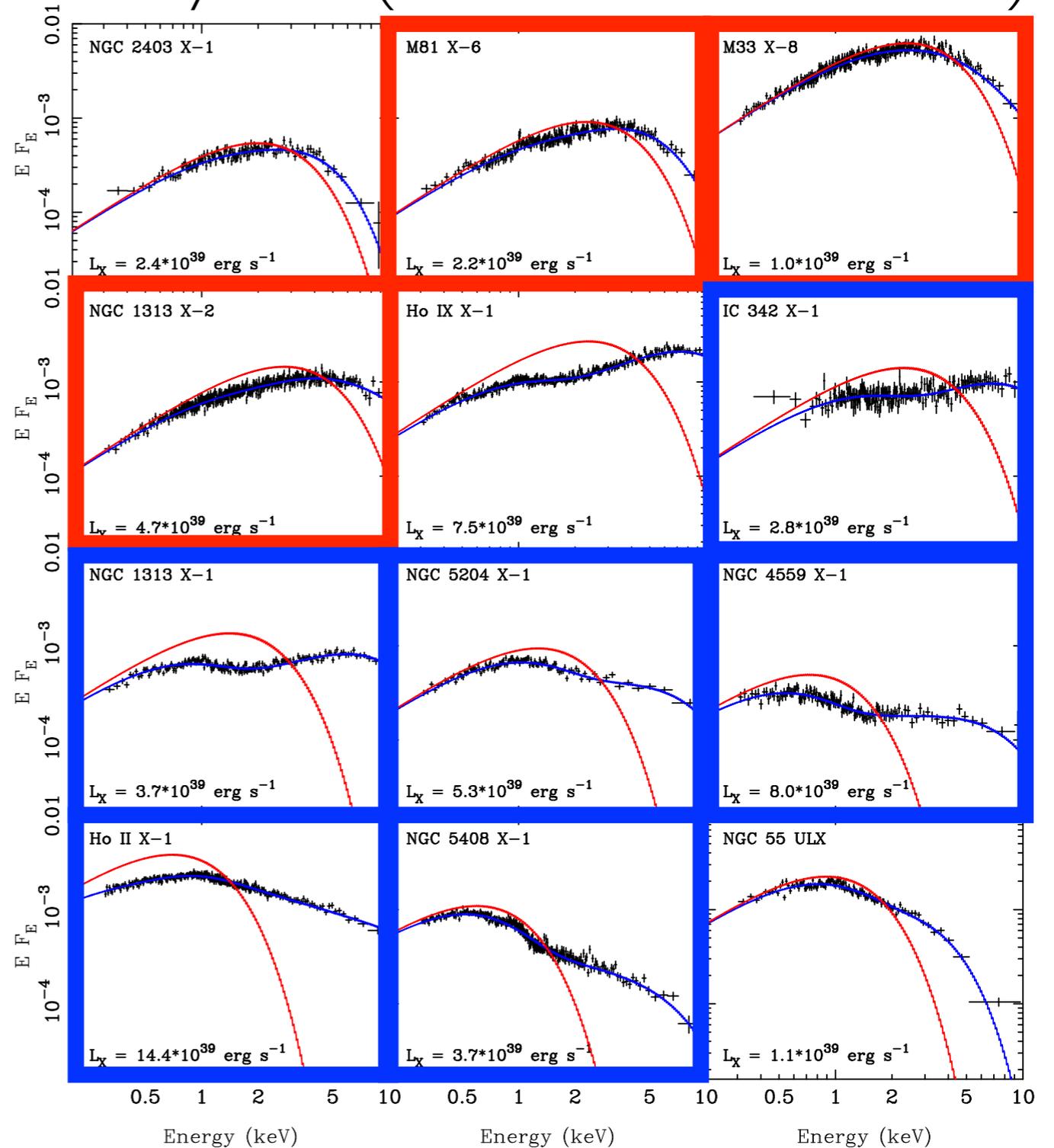


COMPARISON WITH ULXs

Simulated SED



X-ray obs. (Gladstone et al. 2009)



Simulated SEDs are similar with observations.

まとめ

輻射磁気流体力学計算(国立天文台)

- 高降着率の一般相対論的シミュレーションに成功
 - ただし, 輻射輸送に関しては近似法を採用
- ➔ 「ポスト京」で, 近似無しの輻射磁気流体力学計算
100倍の性能で数10~100本の光線を解く!

磁気流体力学計算(千葉大)

- 低降着率の高解像度&冷却入り計算に成功
- ➔ 二温度プラズマ&熱伝導の導入が課題

輻射輸送計算(国立天文台)

輻射スペクトルを計算して観測と比較