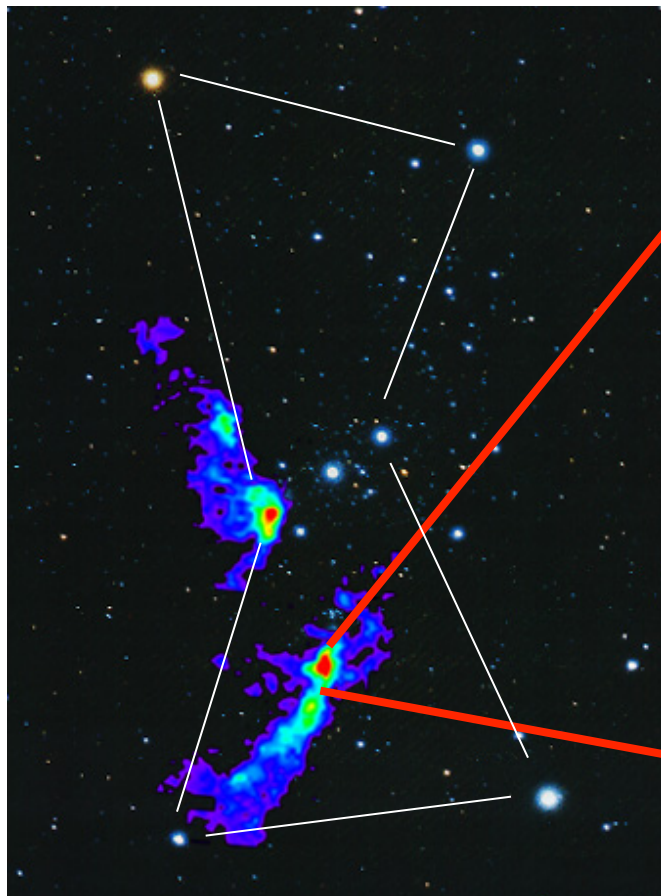


星形成のシナリオ:

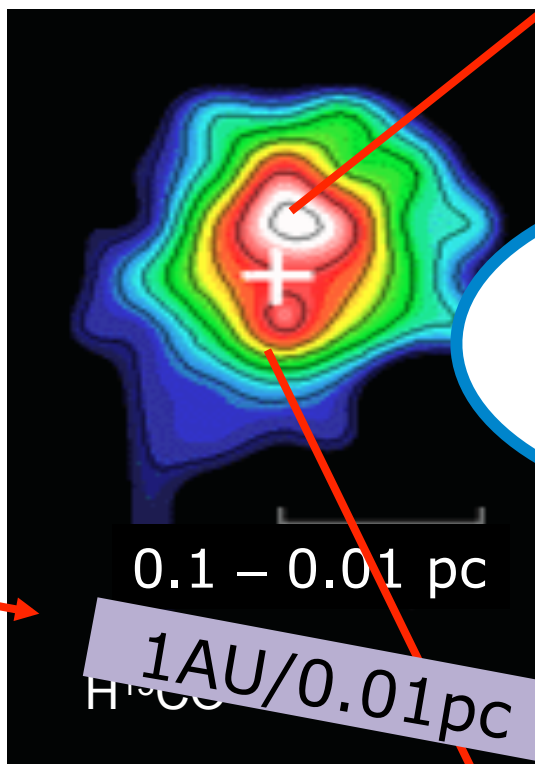
分子雲 → 分子雲コア → ファーストコア → 原始星

AMRシミュレーションが必要である。



オリオン分子雲
(optical+radio)
Sakamoto et al. (1994)

おうし座領域の分子雲コア
(radio)



Onishi et al. (1999)

原始星とアウトフロー
(radio)



Gueth & Guilloteau (1999)

$1\text{AU}/0.01\text{pc} = 5 \times 10^{-4}$

乱流と星間磁場は重要

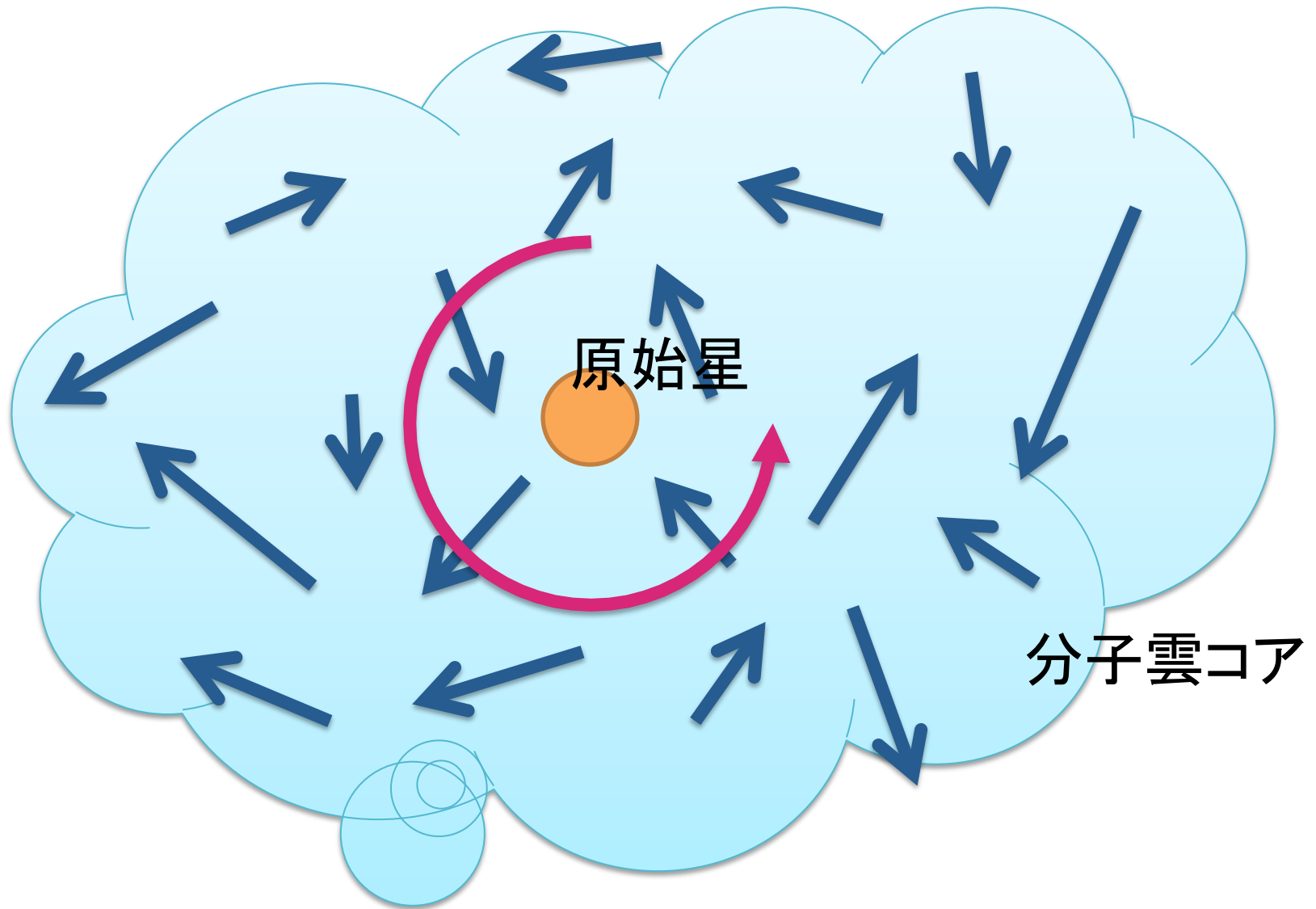
■ 乱流

- 星間ガスは乱流状態
- 分子雲(超音速乱流) → 分子雲コア(亜音速乱流)
- スケーリング則: $\Delta v \propto L^{1/2}$ (Larson 95)
- 乱流は回転の起源 (Burkert & Bodenheimer 00)
 - → 原始星の自転、原始惑星系円盤の回転、アウトフロー・ジェット
の駆動、惑星の公転、etc.

■ 星間磁場

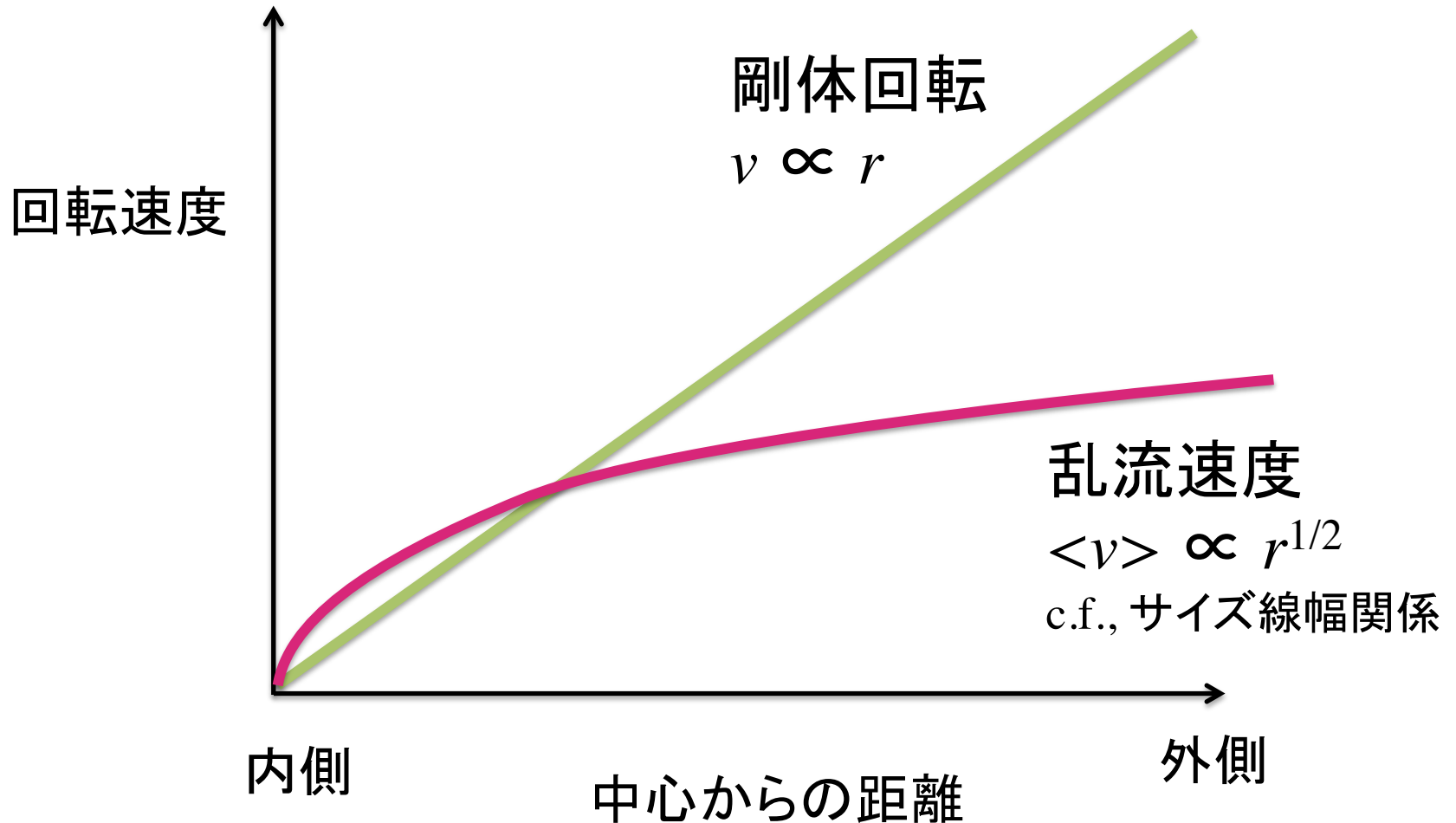
- 磁気エネルギー～重力エネルギー
- 強い磁場
- 高密度で散逸過程が利く。

乱流は回転の起源 —概念図—



乱流と剛体回転は角運動量分布が異なる

剛体回転を仮定すると、質量降着の後期段階で人為的に大きな角運動量を仮定していた。



乱流と星間磁場は重要

■ 乱流

- 星間ガスは乱流状態
- 分子雲(超音速乱流) → 分子雲コア(亜音速乱流)
- スケーリング則: $\Delta v \propto L^{1/2}$ (Larson 95)
- 乱流は回転の起源 (Burkert & Bodenheimer 00)
 - → 原始星の自転、原始惑星系円盤の回転、アウトフロー・ジェット
の駆動、惑星の公転、etc.

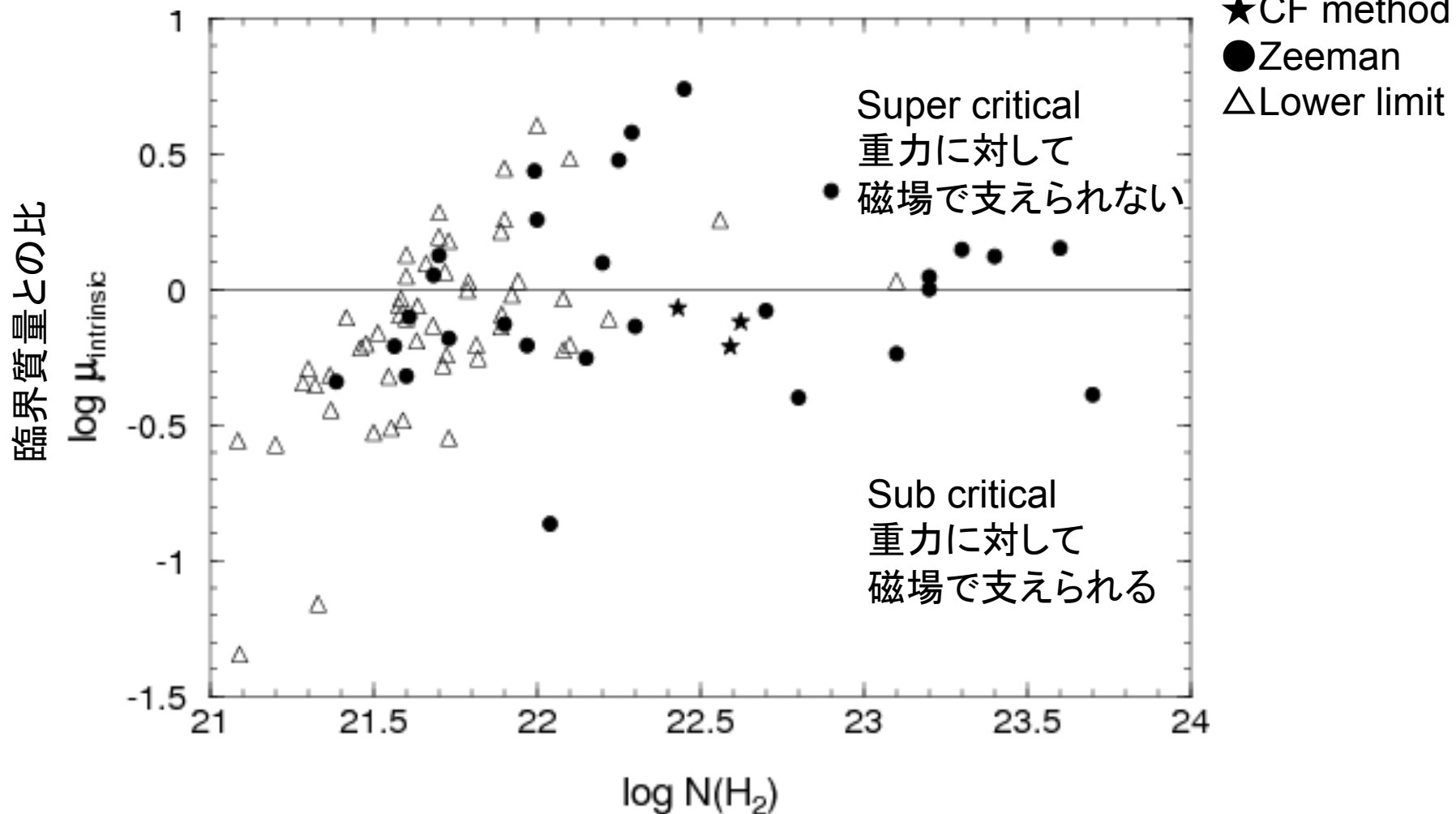
■ 星間磁場

- 磁気エネルギー～重力エネルギー
- 強い磁場
- 高密度で散逸過程が利く。

いろいろな分子雲の磁場

Supercritical vs subcritical

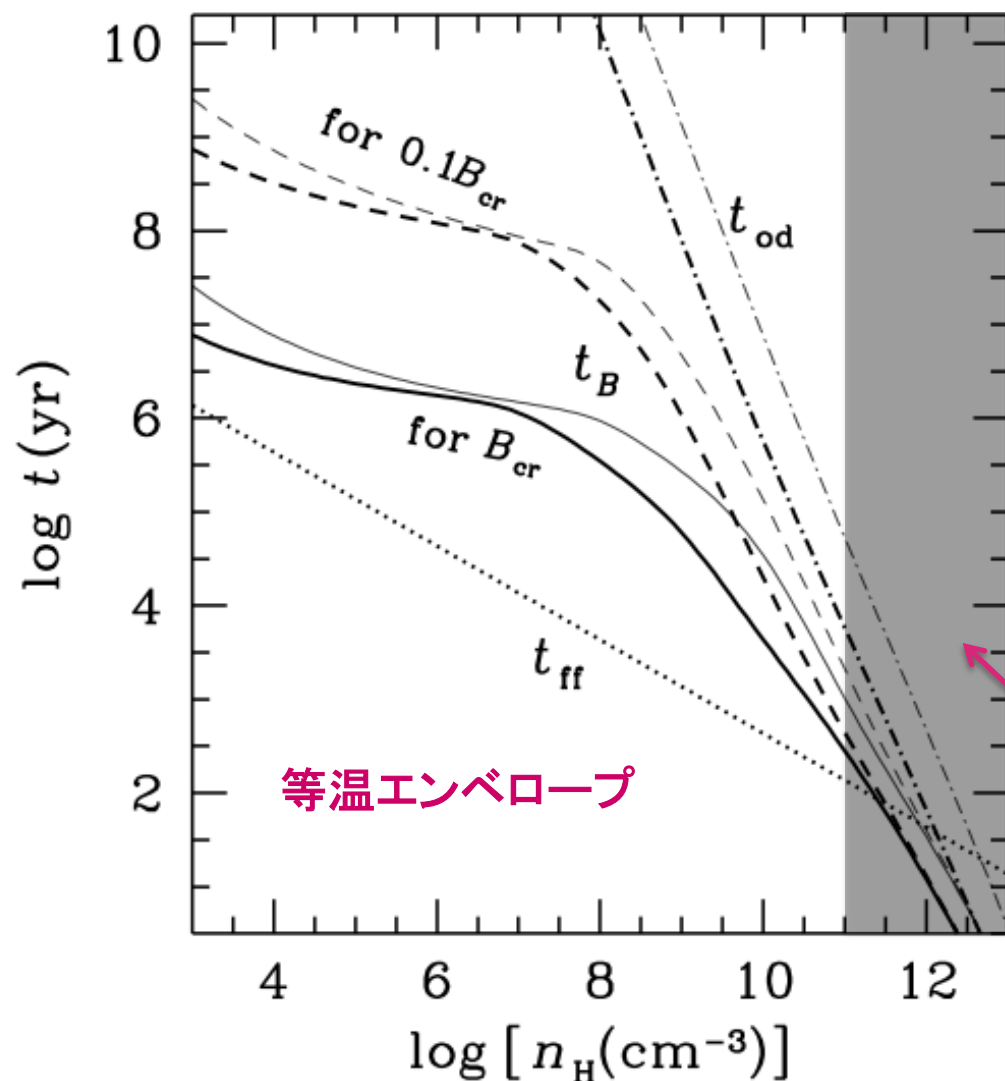
いずれにしろ、星間磁場は強い



水素分子ガスの柱密度

Heiles & Crutcher 05

磁場の散逸過程の重要性



- 高密度では $t_B < t_{ff}$
- ファーストコアでは $t_{ff} < t_{dy}$
(圧力サポート)
- ゆえに $t_B < t_{dy}$
- 天体の進化において磁場の散逸は重要

ファーストコア

ところが（業界の動向）

乱流と磁場の両方を考慮した原始星収縮のシミュレーションはまだ(ほとんど)行われていない

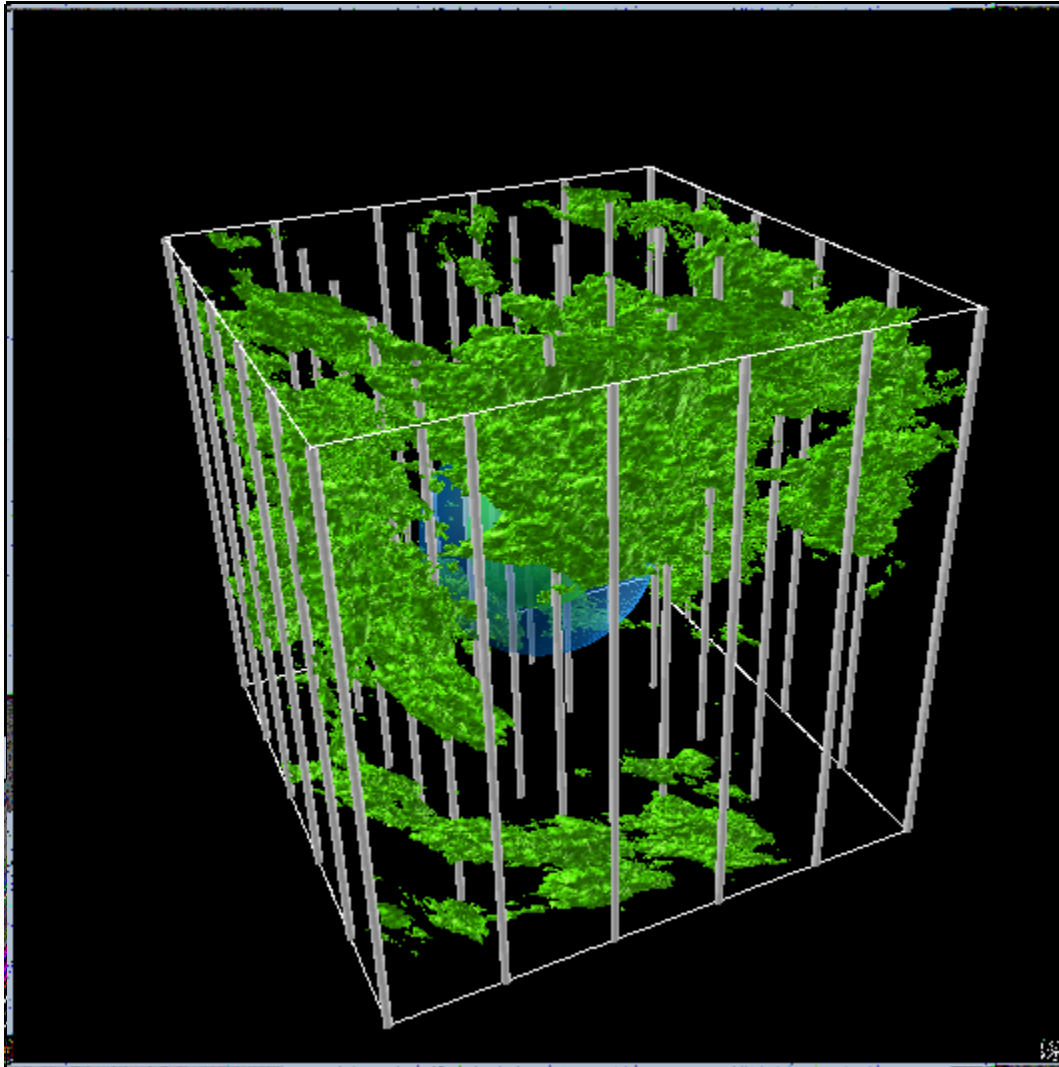
乱流・磁場・原始星収縮

→ 3次元-自己重力-MHD-AMRが必須

AMRグループ

- SFUMATO (this work) **Turbulence+MHD**+barotropic
for low mass cores (Matsumoto+ 11)
- RAMSES **Turbulence+MHD**+barotropic
for massive cores (Hennebelle+ 11)
- ORION Focus on Radiation feedback w/o magnetic field
- FLASH MHD+radiation for massive cores (Peters+ 11)
- Nested grid MHD+radiation w/o turbulence (Tomida+ 10)
- Enzo Focus on feedback (Wang+ 10)

初期条件の設定



分子雲コアの密度

BE球 $\times(1.25-10)$ 倍

中心: 2×10^5 個/cc

半径: $0.049 - 0.14$ pc

質量: $1.2 - 28 M_{\odot}$

温度: 10K

磁場

$0.1, 0.25 B_{cr}$

$20 - 143 \mu G$

乱流

$$\langle v^2 \rangle \propto k^{-4}$$

平均マッハ数

$= 0.5, 1, 3$

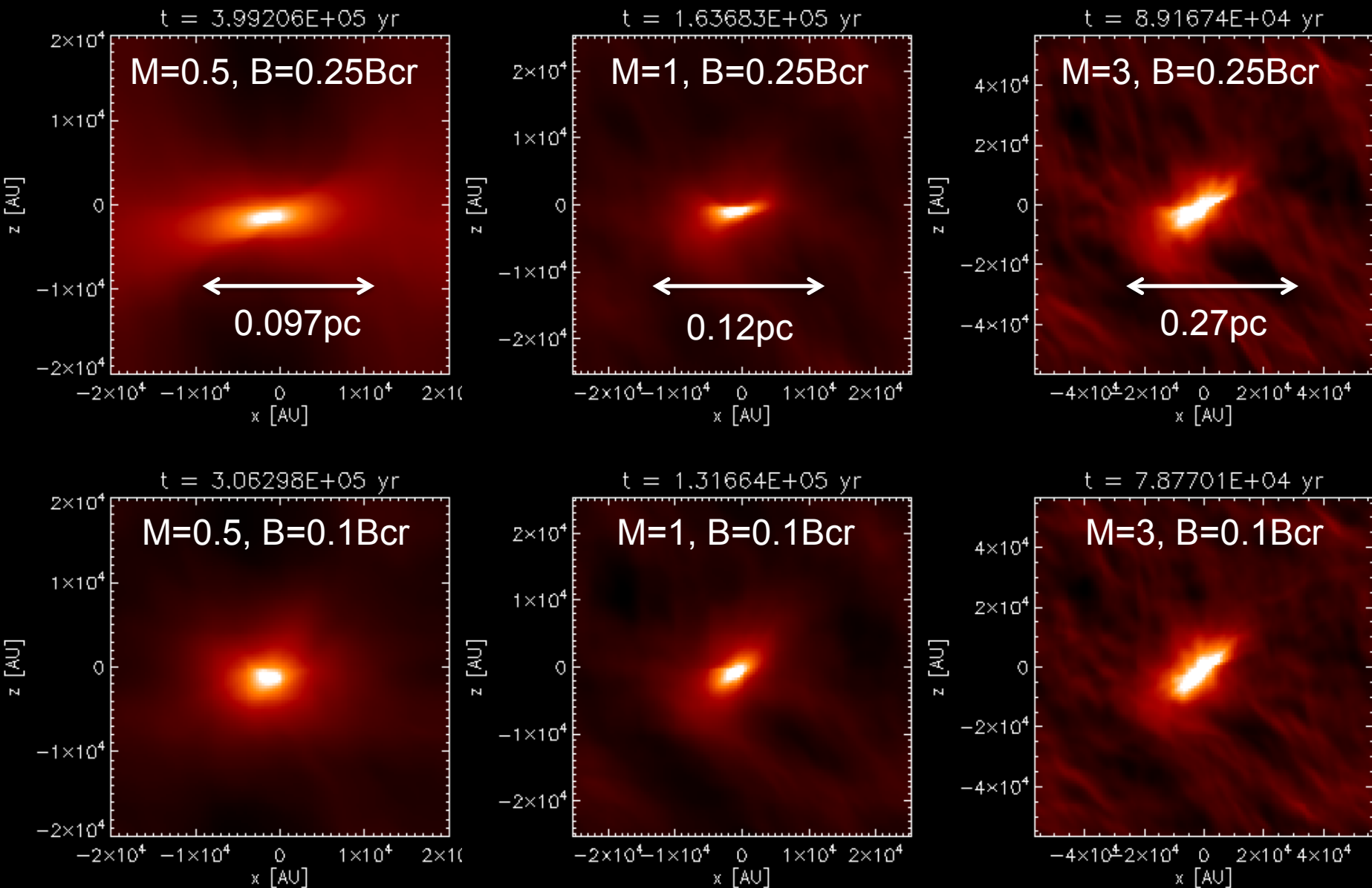
ベースグリッド: 256^3

最大グリッドレベル: 10

原始星形成後約1000年

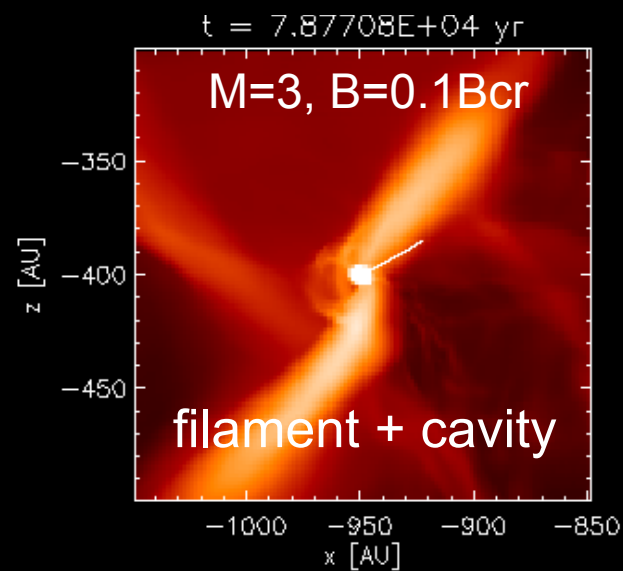
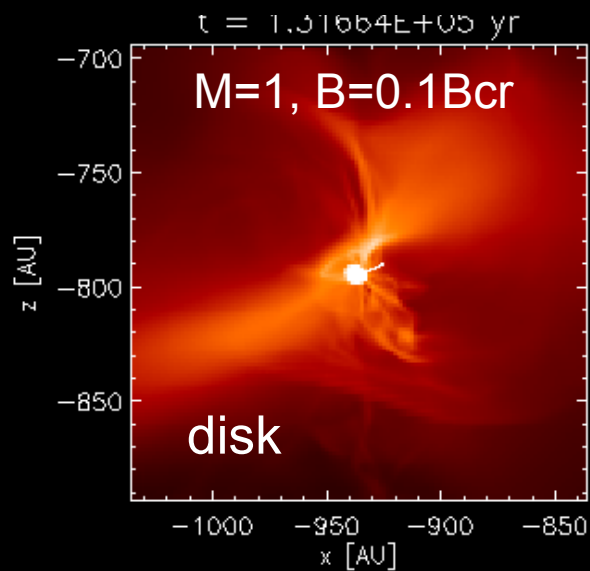
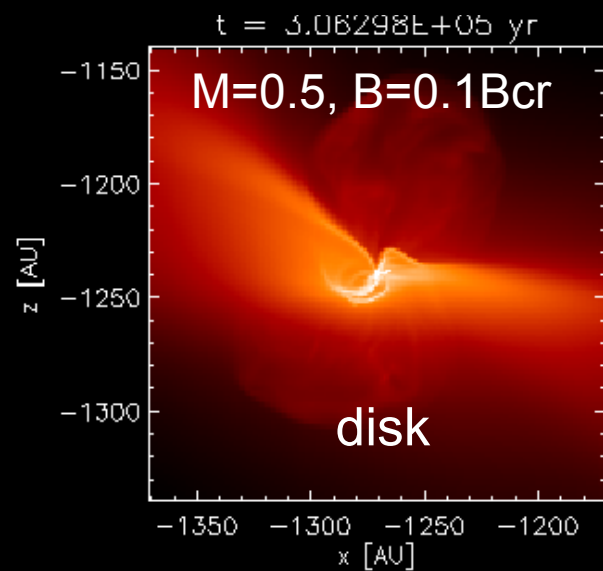
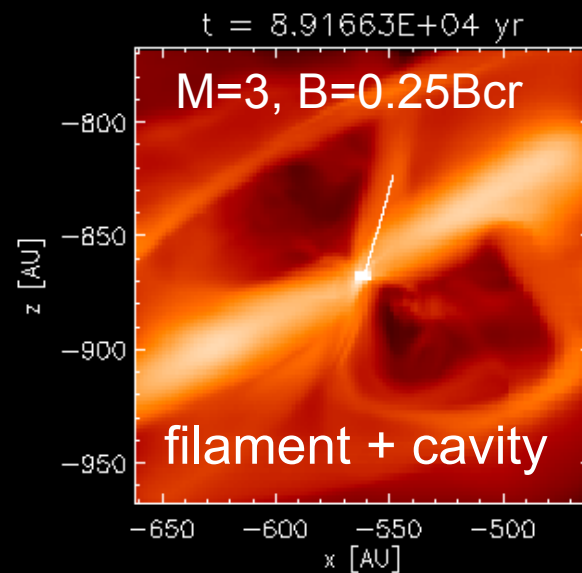
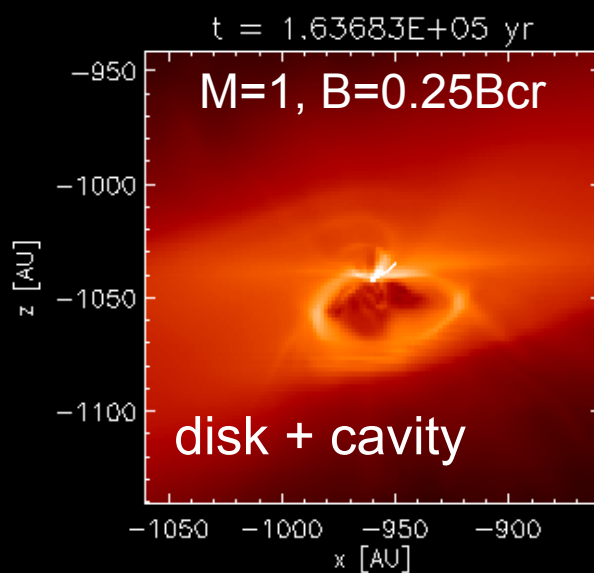
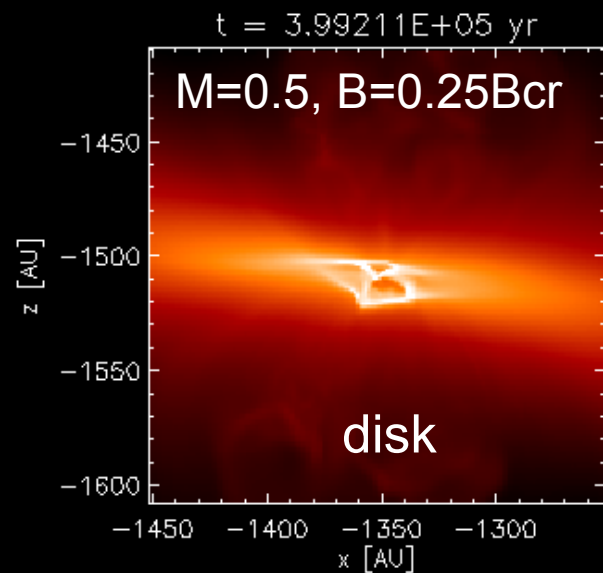
計算時間3ヶ月

All the models on cloud core scale



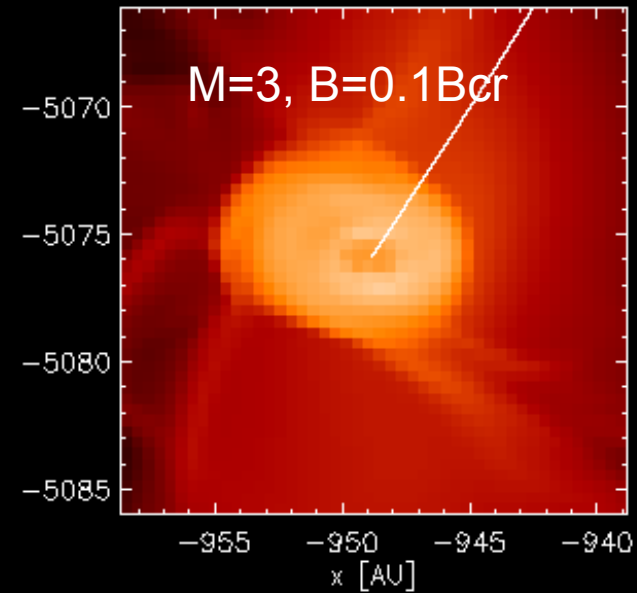
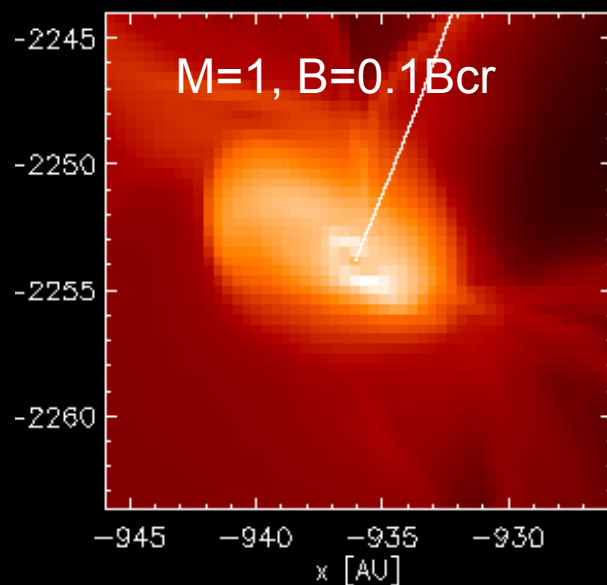
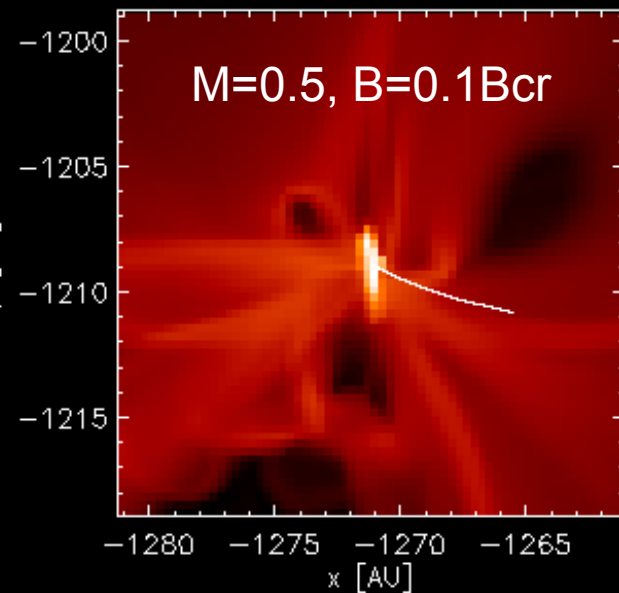
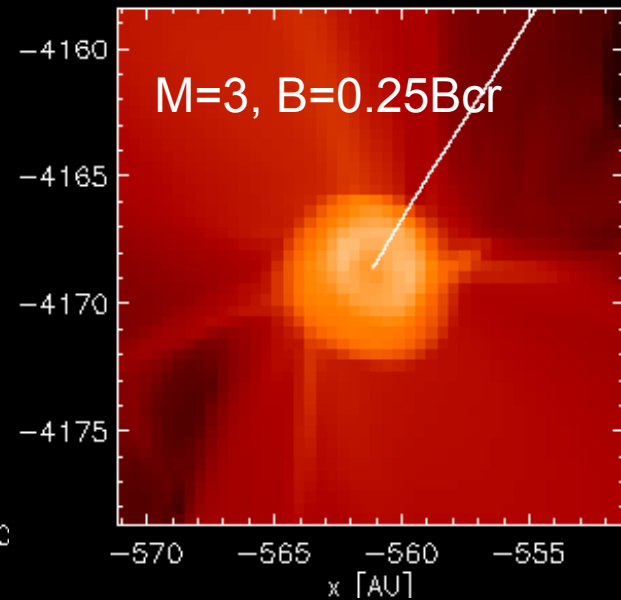
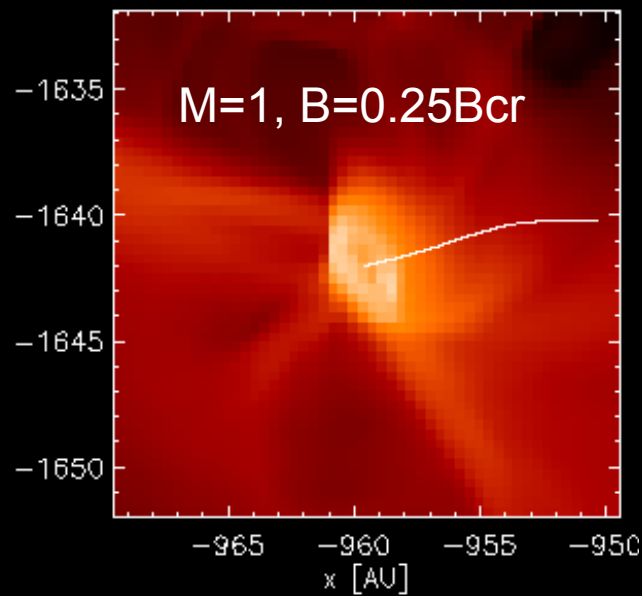
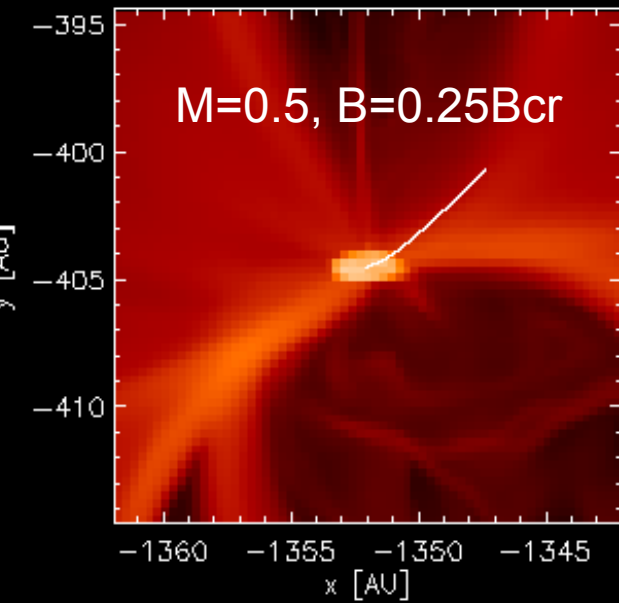
$(200\text{AU})^3$

Outflows are common features.

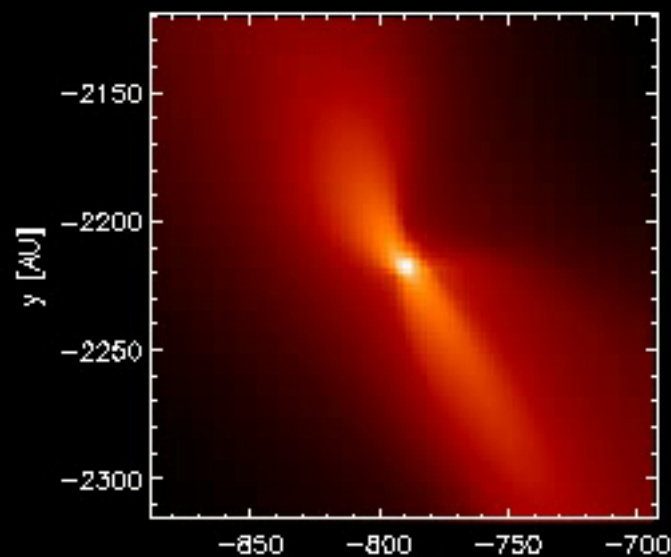
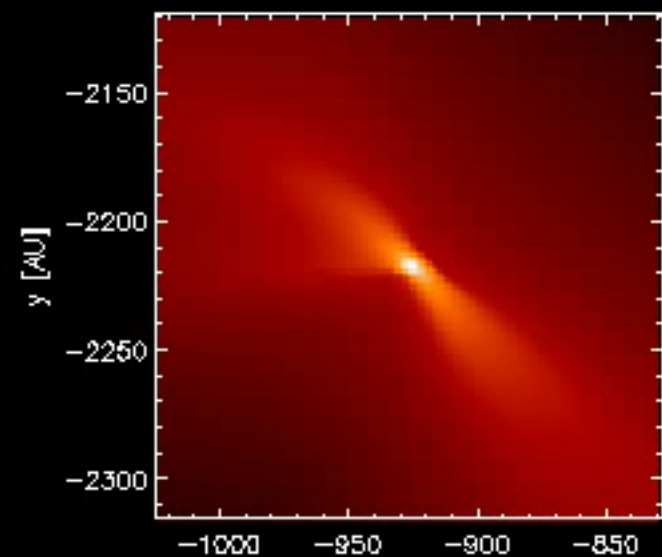


$(20\text{AU})^3$

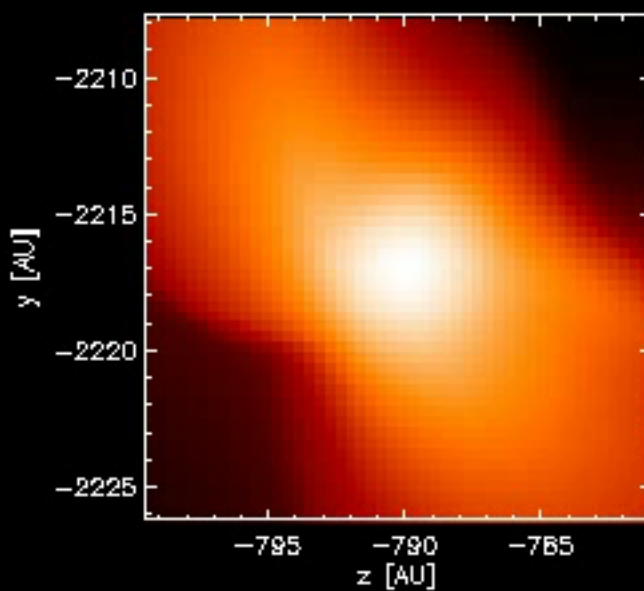
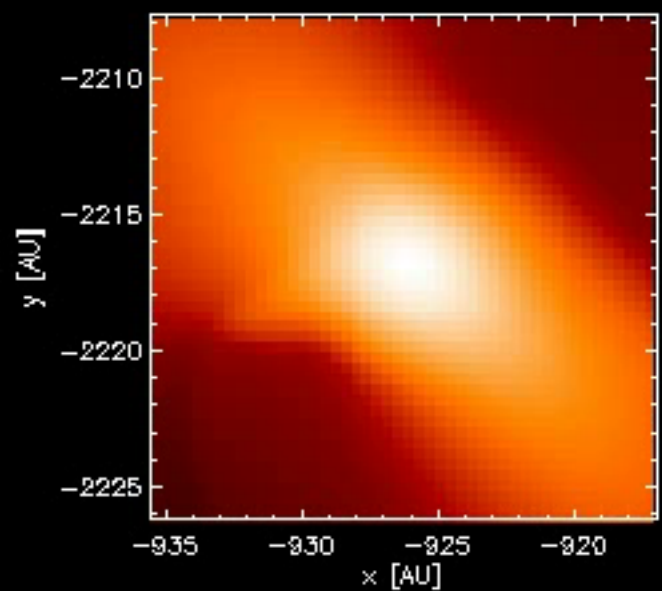
Rotating disks and/or cavities



M=1, B=0.1B_{cr}: アウトフローと円盤形成



$(200 \text{ AU})^3$



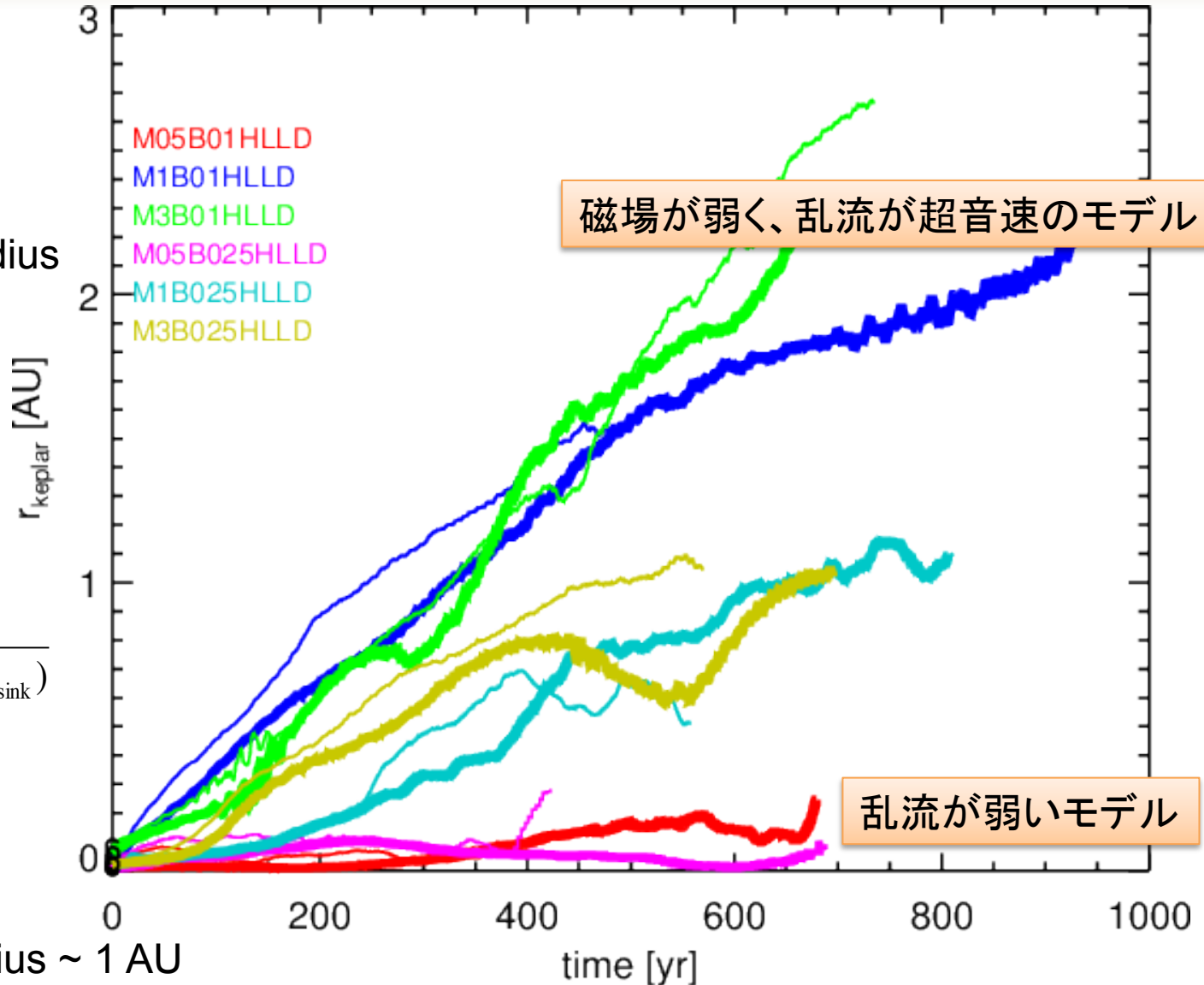
$(20 \text{ AU})^3$

回転円盤の成長： 乱流＋磁場が制御

Centrifugal radius

$$r_{\text{cent}} = \frac{\bar{j}^2}{G(M_{\text{gas}} + M_{\text{sink}})}$$

$$\bar{j} = \frac{J_{\text{gas}}}{M_{\text{gas}}}$$

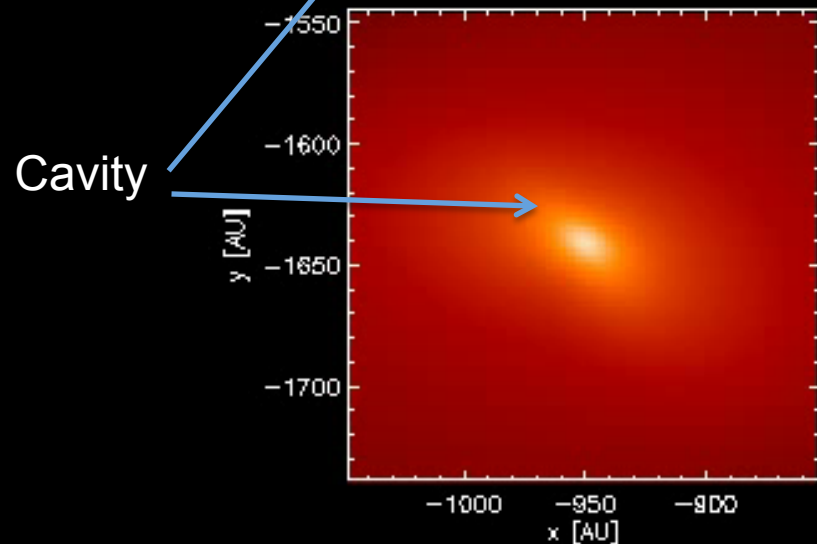
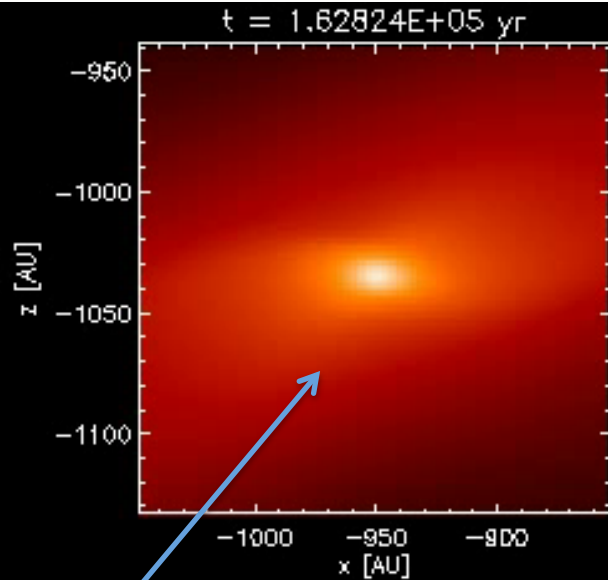


Note: sink radius ~ 1 AU

円盤の半径は遠心力半径の数倍

Elapse time after sink particle formation

磁場が強い場合はエンベロープに穴



$M=1, B=0.25B_{\text{cr}} \quad (200\text{AU})^3$

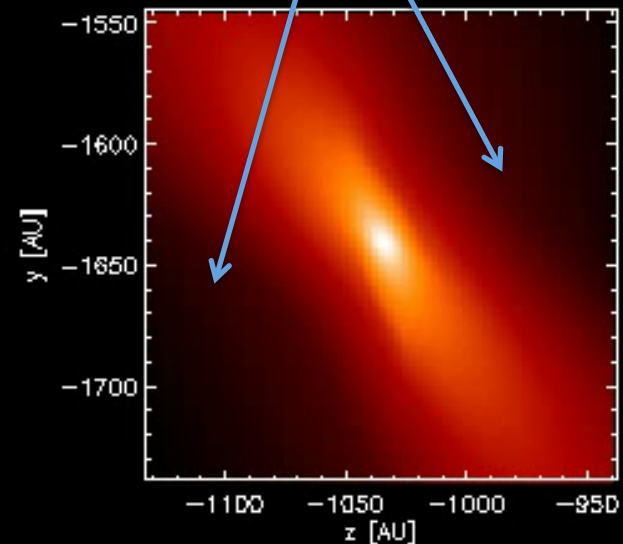
Surface density in 3 directions.

M1B025HLLD

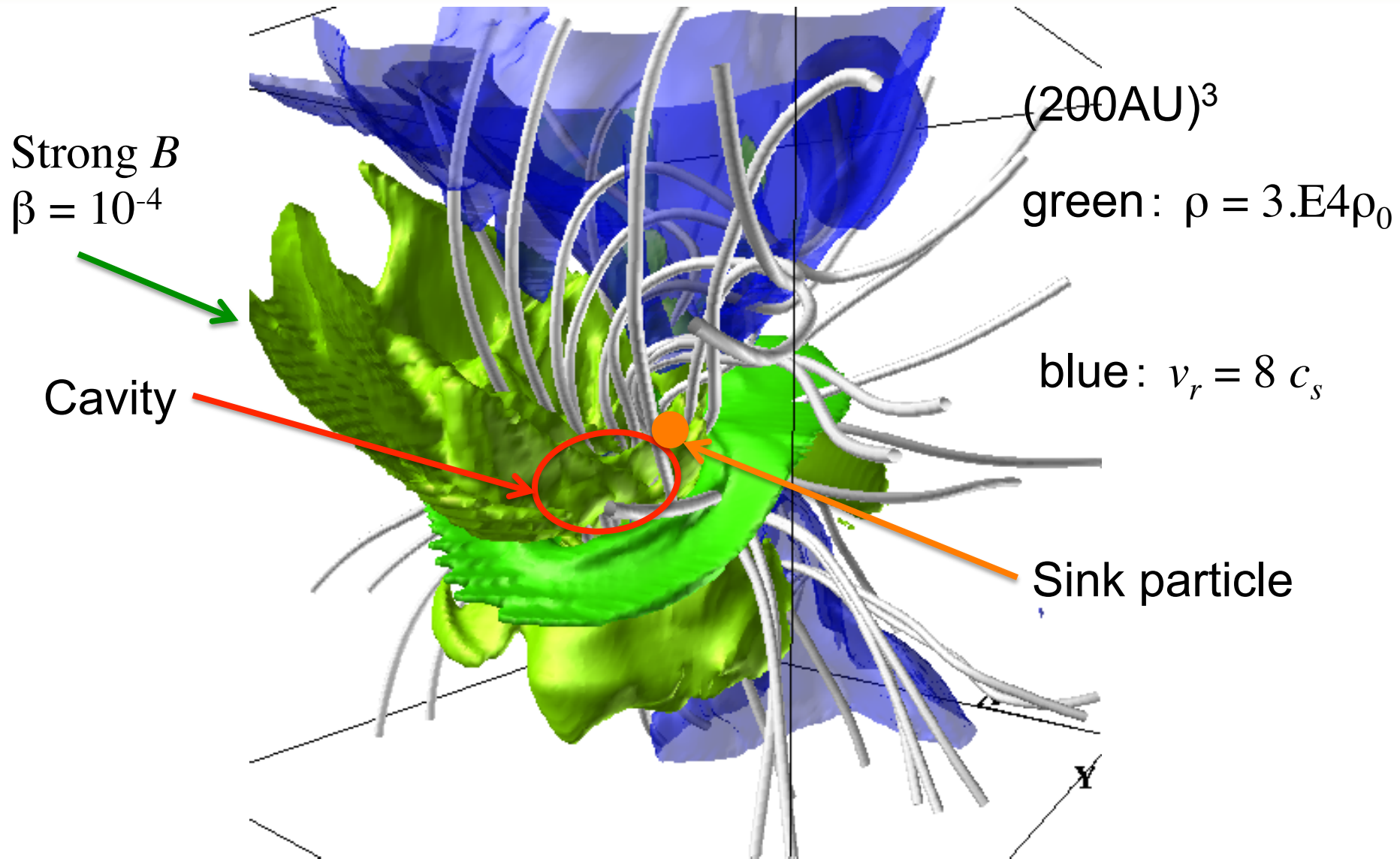
step = 1500

$t_p = -53.601786 \text{ yr}$

Outflow

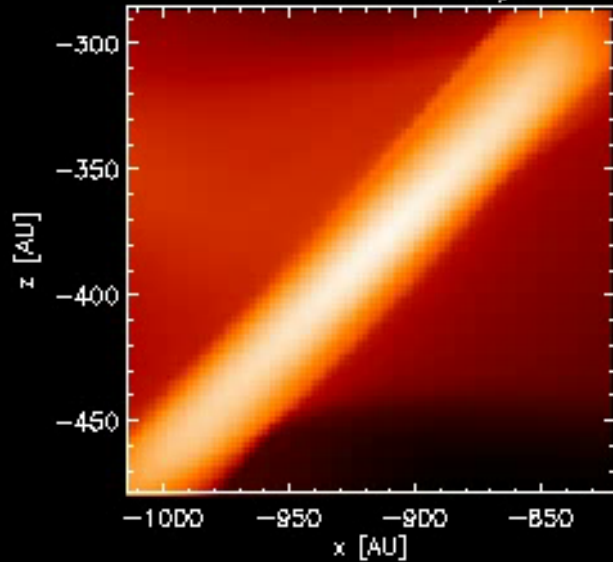


Cavity is filled by strong magnetic field.



エンベロープに穴： フィラメントに付随

$t = 7.76711E+04$ yr



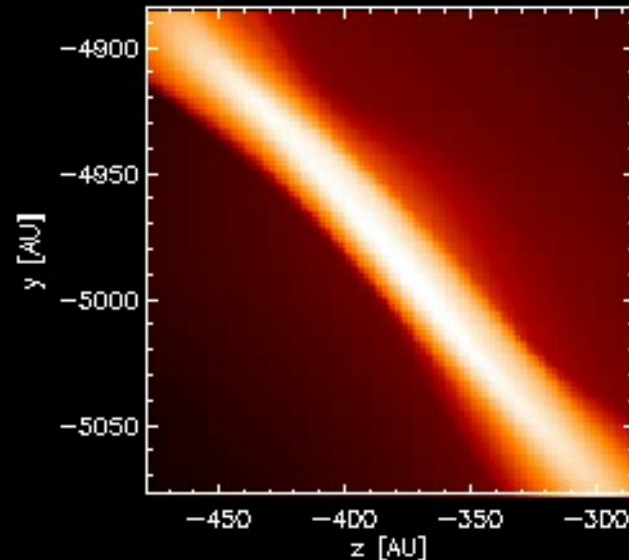
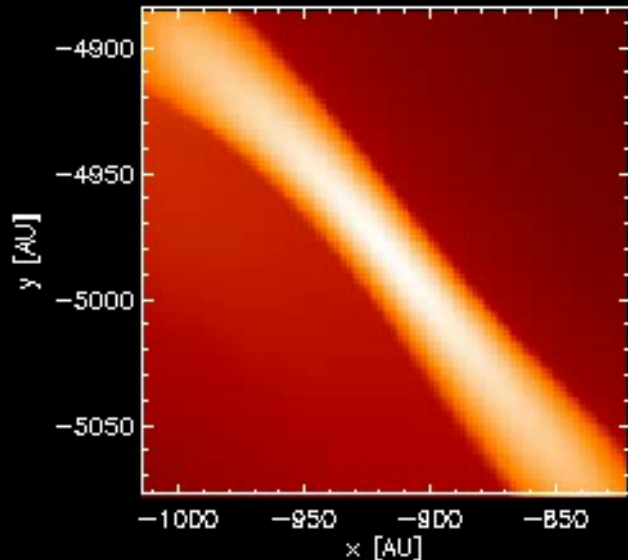
$M=3, B=0.1B_{cr} \quad (200AU)^3$

Surface density in 3 directions.

M3B01HLLD

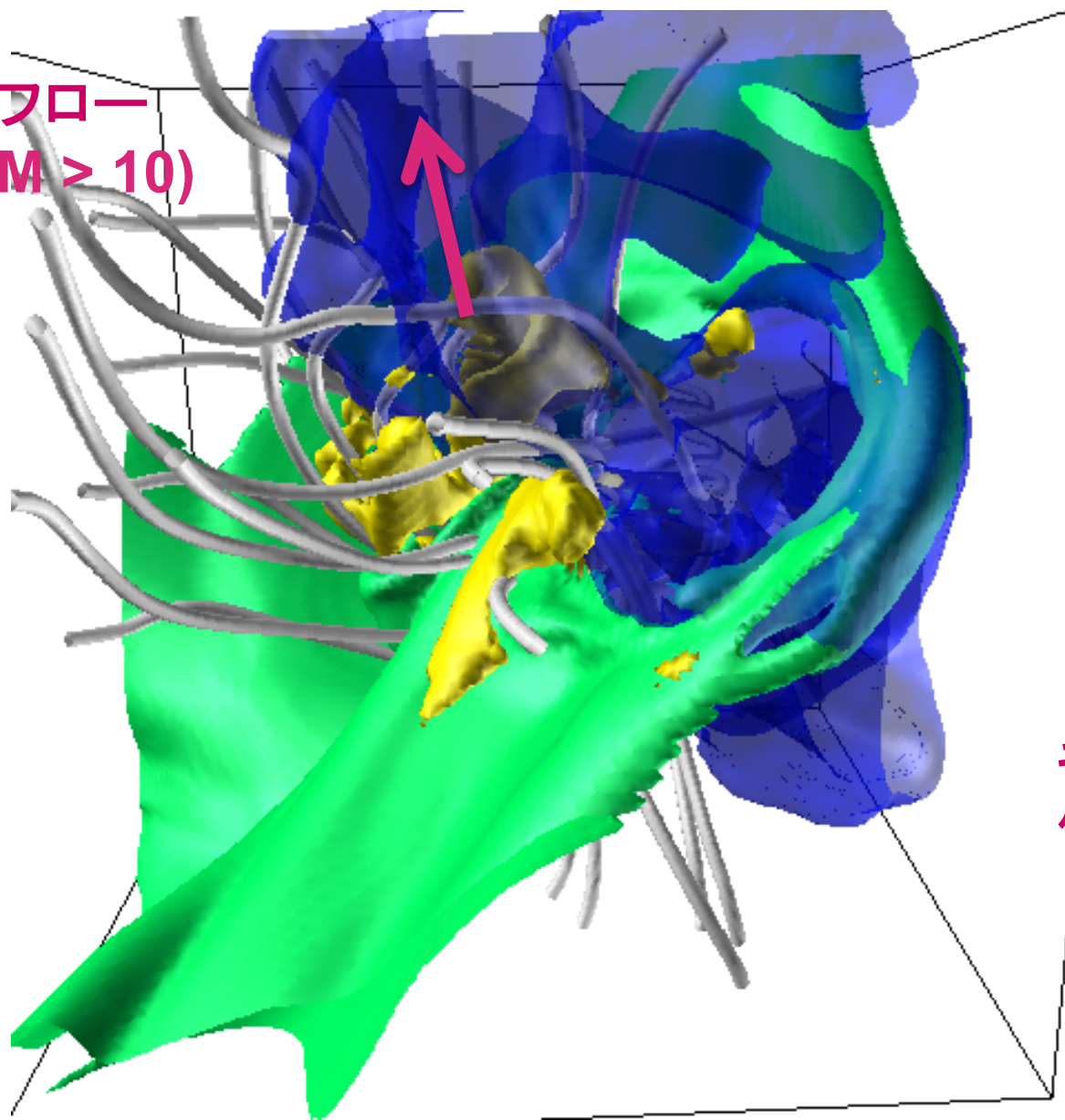
step = 1500

$t_p = -429.06353$ yr



アウトフローとキャビティ

アウトフロー
高速 ($M > 10$)



$(200\text{AU})^3$

green: $\rho = 1.E4\rho_0$

blue: $v_r = 10 c_s$

blue: $v_r = 4 c_s$

キャビティの膨張
低速 ($M < 4$)

まとめ

- オーム散逸を考慮して乱流分子雲コアの原始星収縮を計算した。
 - 原始星形(シンク粒子)成後～1,000年間
 - 工夫: AMR, シンク粒子, 陰解法
- アウトフローの形成
- 星周円盤の形成と成長:
 - 乱流が弱くない場合(乱流は角運動量の源)
 - 磁場が弱い場合(磁気制動が弱い)
- エンベロープに穴:
 - 磁場が強い場合に顕著。
 - キャビティーは磁束の塊。
 - エンベロープに複雑な構造。