

# 強磁場環境下における 低金属量星形成

ムラコソ イツキ  
村社 伊樹, 町田 正博 (九州大学)

# 宇宙史における星形成の重要性

FSFG2025

宇宙進化のイメージ図

初代星 (~0.2 Gyr ?)  
観測：直接は困難  
理論：活発

現在の星形成領域  
観測と理論：  
盛んに研究されている



©NASA/WMAP Science team

宇宙の進化の解明には宇宙の最小構成単位である星の歴史を探る必要性  
→初期宇宙の星から現在の星まで星形成過程がどう変化したかが重要

## 現在の星形成領域：

- ・磁場が星形成過程に多大な影響を及ぼす (ex. 分裂、円盤形成、アウトフロー)

## 初代星形成：

- ・以前は磁場の影響は弱いと考えられてきたが、乱流による磁場増幅等により強磁場環境下の星形成研究が増加

(e.g. Hirano et al. 2025, Sadanari et al. 2021, 2023, 2024)

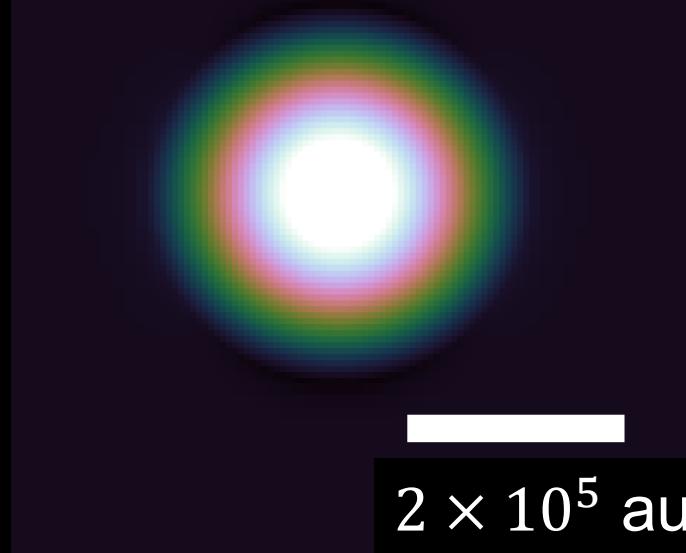
## 初代星形成後の低金属量星形成：

- ・磁場の影響を考慮した研究は少ない
- ・強磁場環境、特に非理想磁気流体効果を含めた研究は希

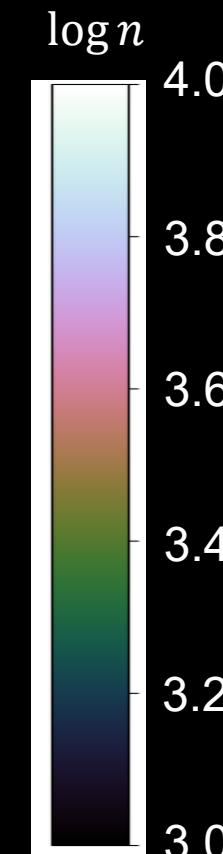
### 研究目的

現在の星形成領域と同程度の強磁場が低金属量環境下の星形成過程に与える影響を調査する

● : 磁場と回転の向き



分子雲コア  
(Bonner-Ebert 球)



金属量 :	$Z/Z_{\odot}$
中心数密度	$n = 10^4 \text{ cm}^{-3}$
質量磁束比	$\mu_0 = \frac{M/\Phi}{(M/\Phi)_{\text{cri}}} = 3$
磁場	$B \sim 10^{-5} \text{ G}$
質量	$M \sim 2 \times 10^2 M_{\odot}$

- 計算終了：原始星形成後 100~500 yr まで
- 原始星モデル： $\gamma_{\text{eff}} = 2$  for  $n_{\text{max}} \geq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

## 基礎方程式

- $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$
- $\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla P - \frac{1}{4\pi}B \times (\nabla \times B) - \rho \nabla \varphi$
- $\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times [v \times B + \frac{\eta_{AD}}{|B|^2} \{(\nabla \times B) \times B\} \times B - \eta_{OD}(\nabla \times B)]$
- $\nabla^2 \varphi = 4\pi G \rho$
- $T = T(\rho)$
- $\eta = \eta(\rho, T)$

金属量依存

連続の式

運動方程式

誘導方程式

ポアソン方程式

状態方程式

磁気散逸係数

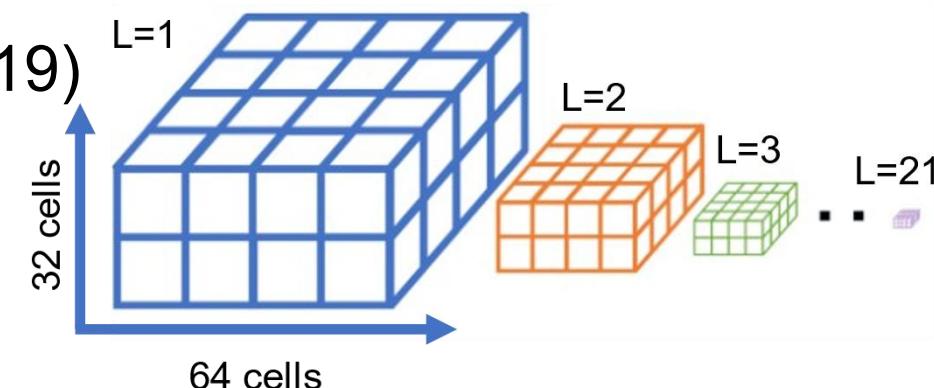
コード : Nested Grid Code (Machida & Basu 2020)

計算 : Non-ideal MHD

(オーム散逸 & 両極性拡散あり ; Higuchi et al. 2018, 2019)

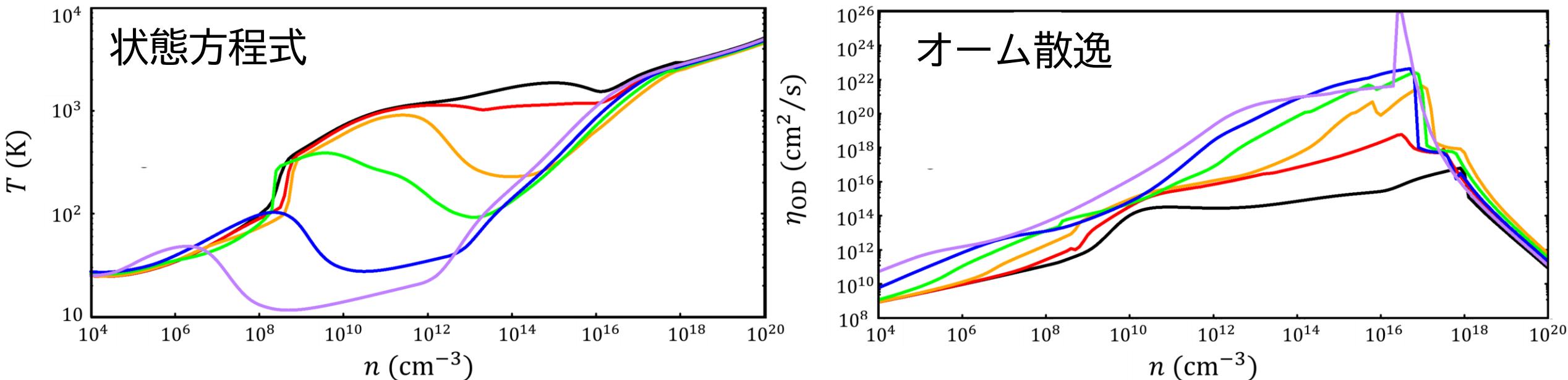
最大セルサイズ( $L = 1$ )~ $8.6 \times 10^4$  (au)

最小セルサイズ( $L = 21$ )~ $8.2 \times 10^{-2}$  (au)



# One-zone 近似による状態方程式

FSFG2025

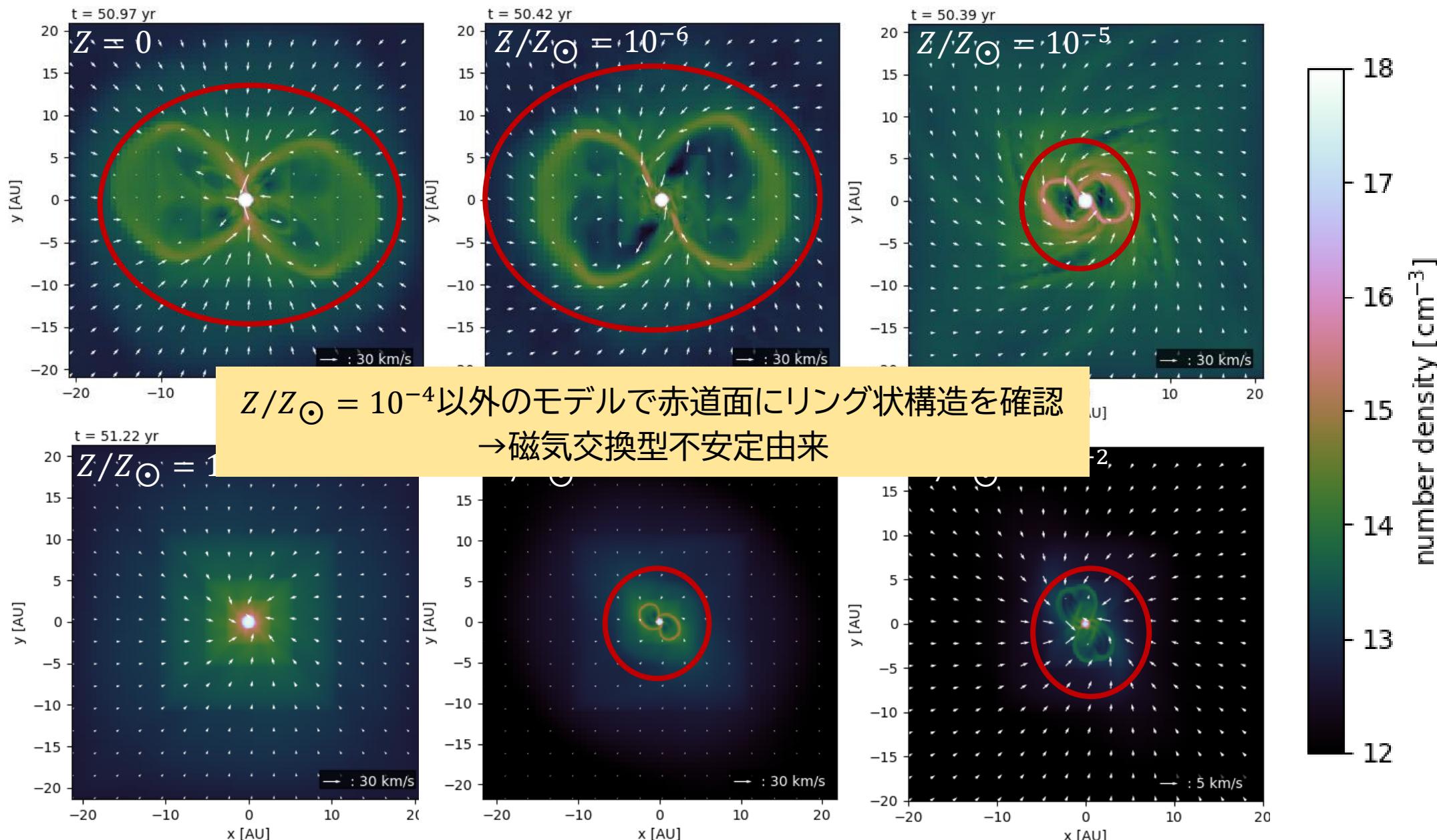


- $Z = 0$  —————
- $Z/Z_\odot = 10^{-6}$  —————
- $Z/Z_\odot = 10^{-5}$  —————
- $Z/Z_\odot = 10^{-4}$  —————
- $Z/Z_\odot = 10^{-3}$  —————
- $Z/Z_\odot = 10^{-2}$  —————

Susa et al. (2015)でone-zone近似を用いて  
計算された状態方程式、拡散方程式を使用

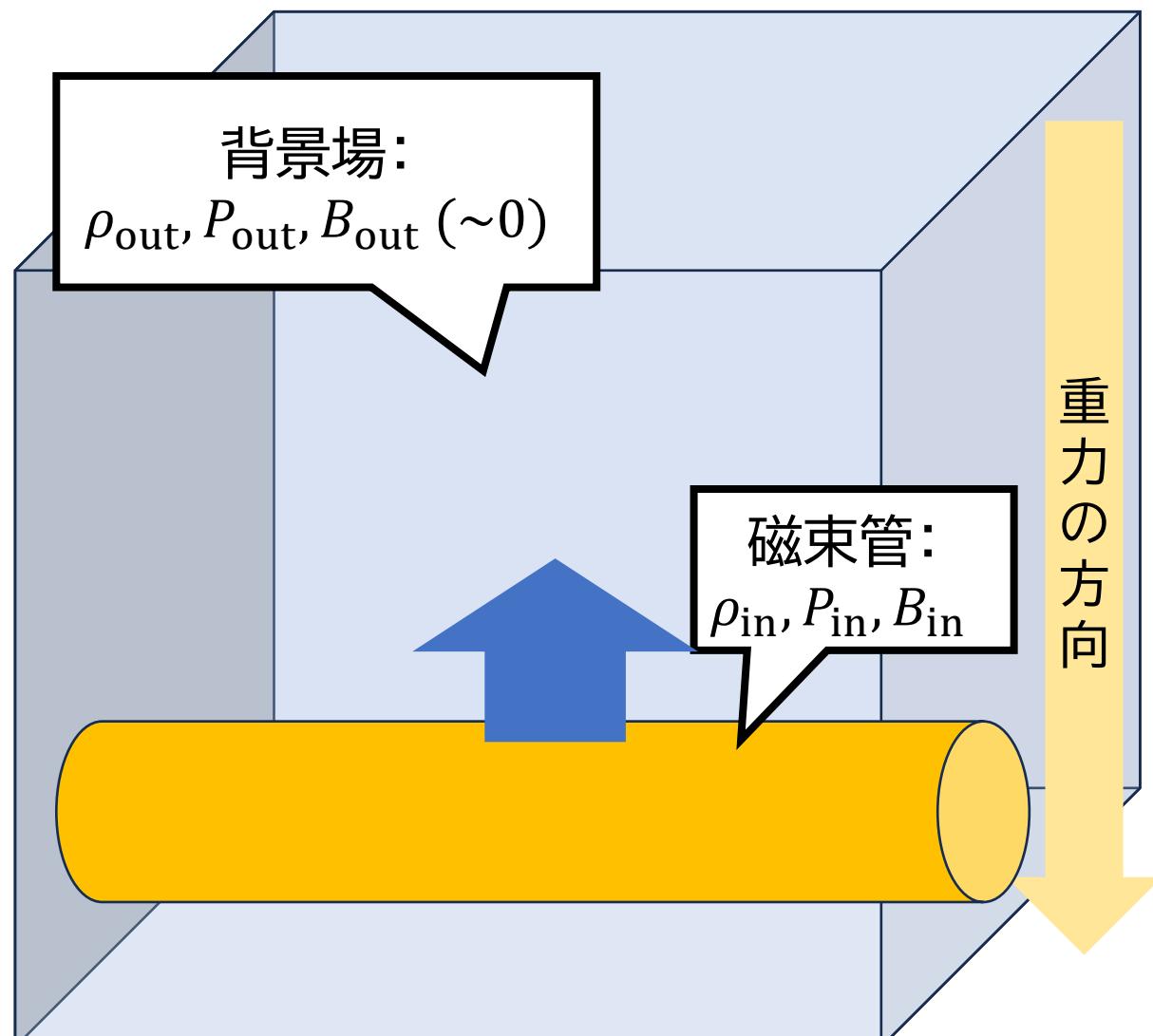
# 各モデルの $z = 0$ 面の数密度プロット( $t_{\text{ps}} \sim 50$ yr)

FSFG2025



# 磁気浮力：磁気交換型不安定の駆動機構

FSFG2025



磁力線の方向 →

$$\begin{aligned}\text{ローレンツ力: } F_L &= J \times B / c \\ &= \left( \frac{c}{4\pi} \nabla \times B \right) \times B / c \\ &= -\nabla \left( \frac{B^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi} (B \cdot \nabla) B\end{aligned}$$

磁気圧勾配力

磁気張力

$$\text{水平方向の圧力平衡から } P_{out} = P_{in} + \frac{B_{in}^2}{8\pi}$$

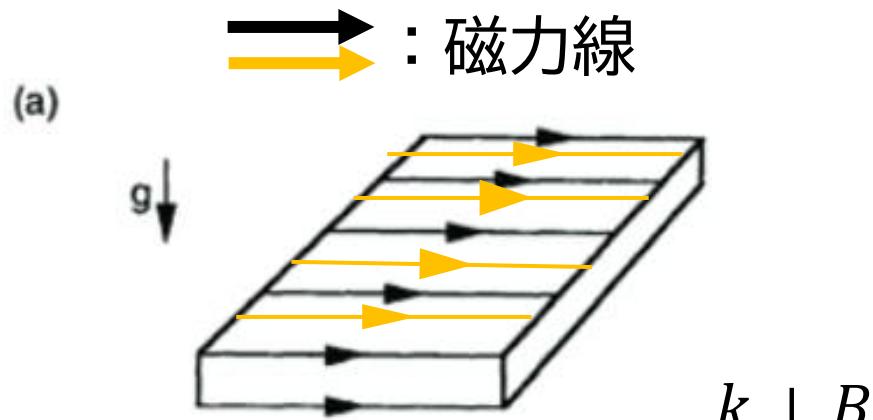
$\rho_{out} > \rho_{in}$   
磁束管の内側の方が密度が小さくなる

重力の向きと反対方向に力が！  
→ 磁場によって浮き上がる力

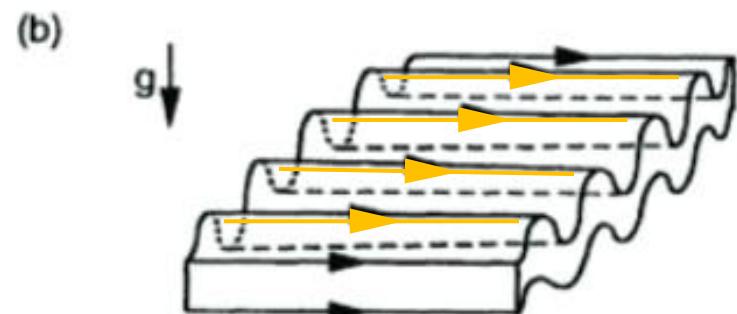
磁気浮力

# 磁気交換型不安定性

FSFG2025



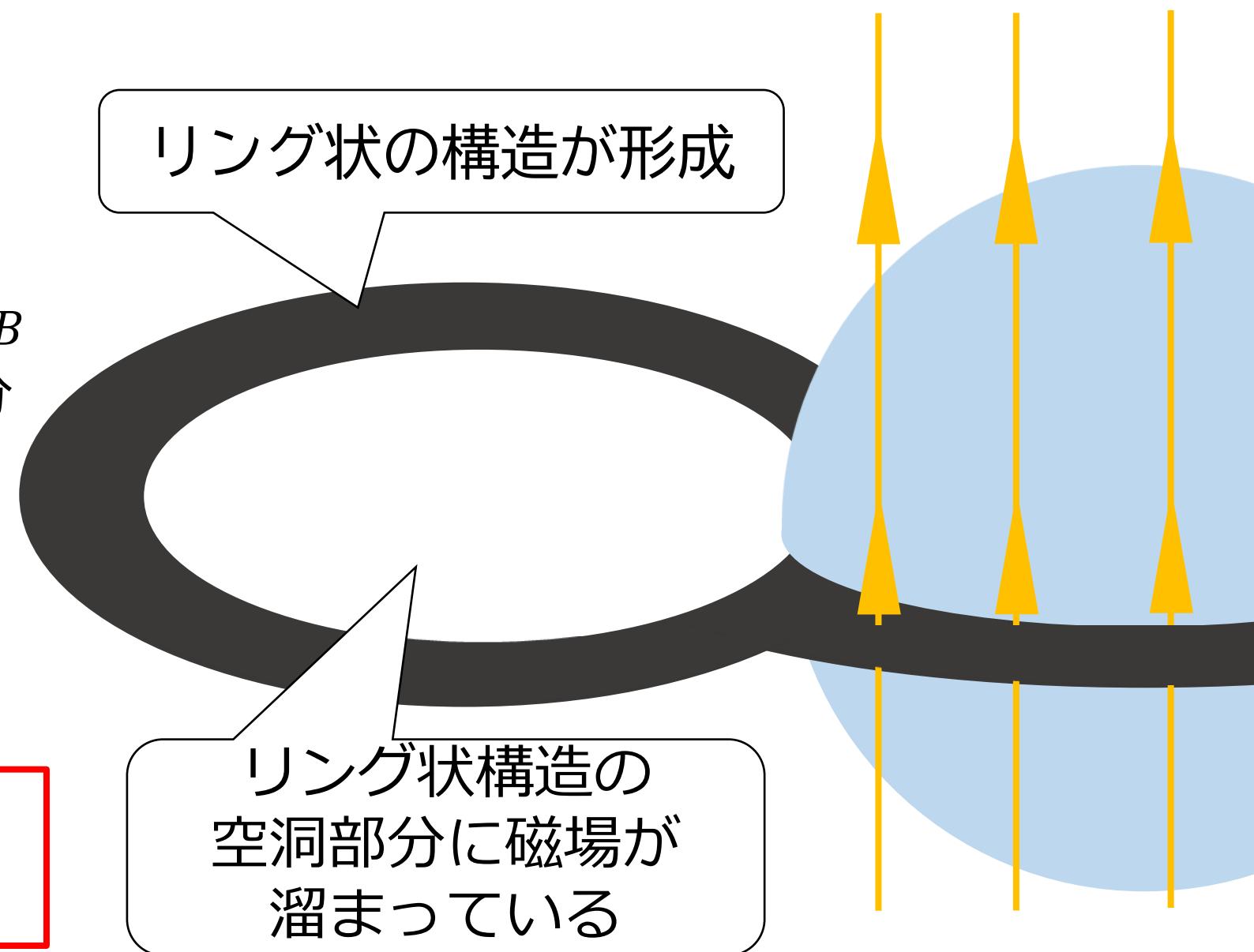
↓ 磁気浮力によって一部分  
が浮き上がる



不安定条件:  $\nabla \left( \frac{B}{\rho} \right) < 0$

$\frac{B}{\rho}$  の勾配の向き = 重力の向き

出典: Plasma Astrophysics



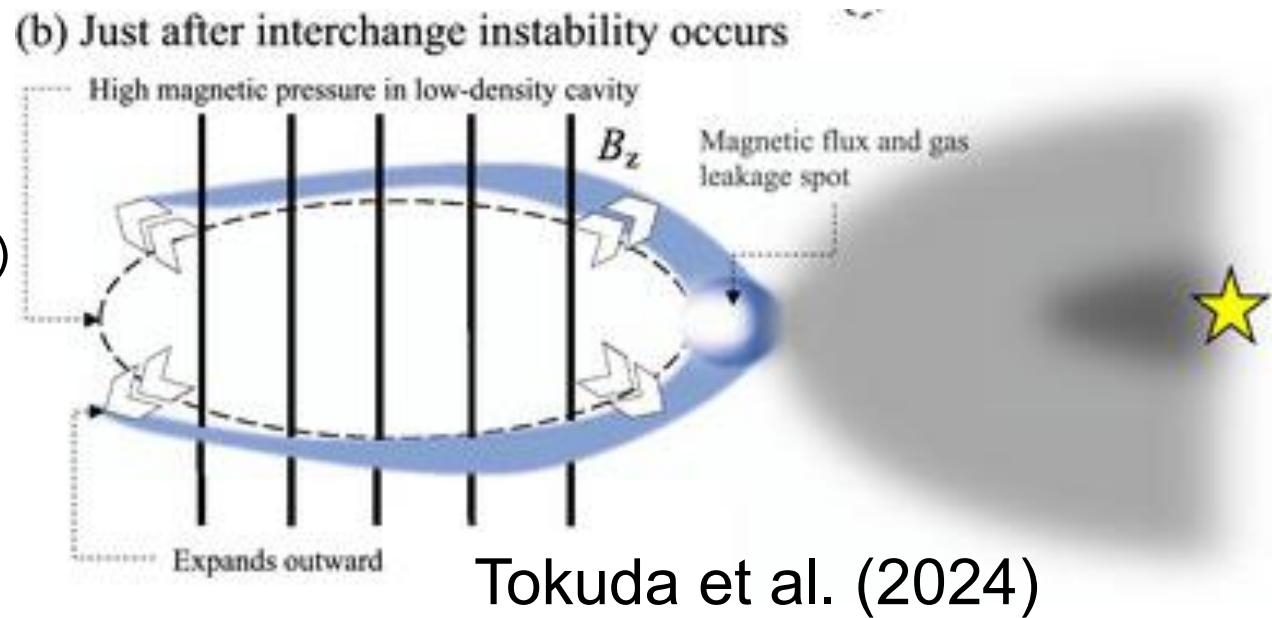
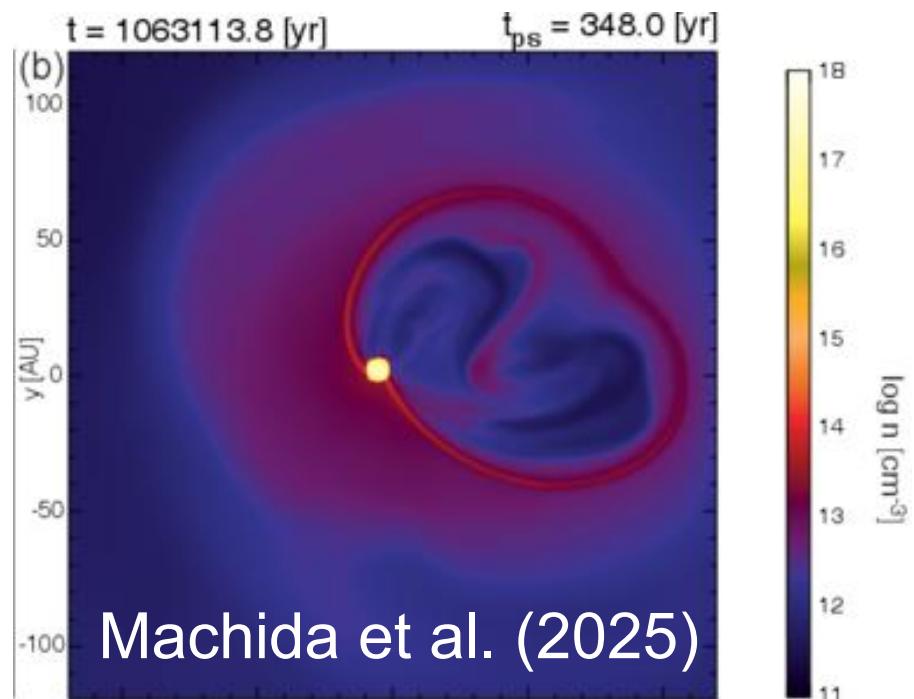
# 磁気交換型不安定の星形成に与える影響

FSFG2025

## 現在の星形成領域

(観測: Tokuda et al. 2024,  
数値計算: e.g., Machida & Basu 2025)

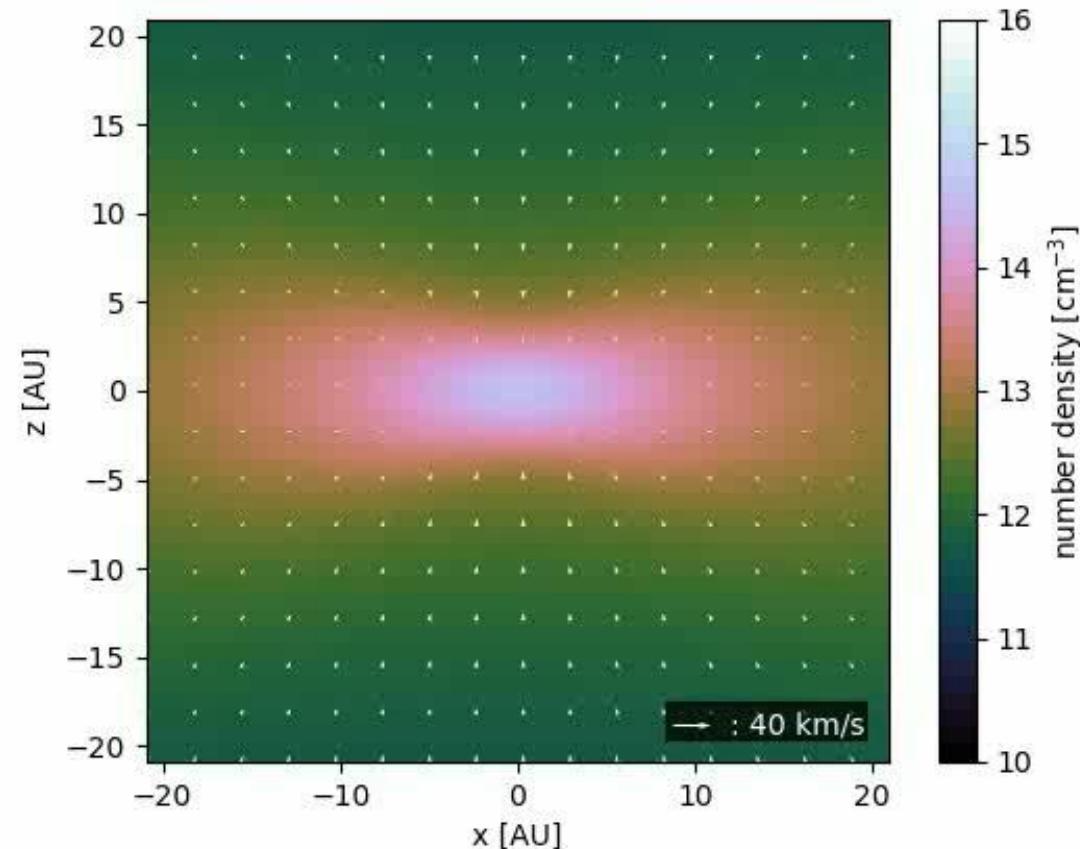
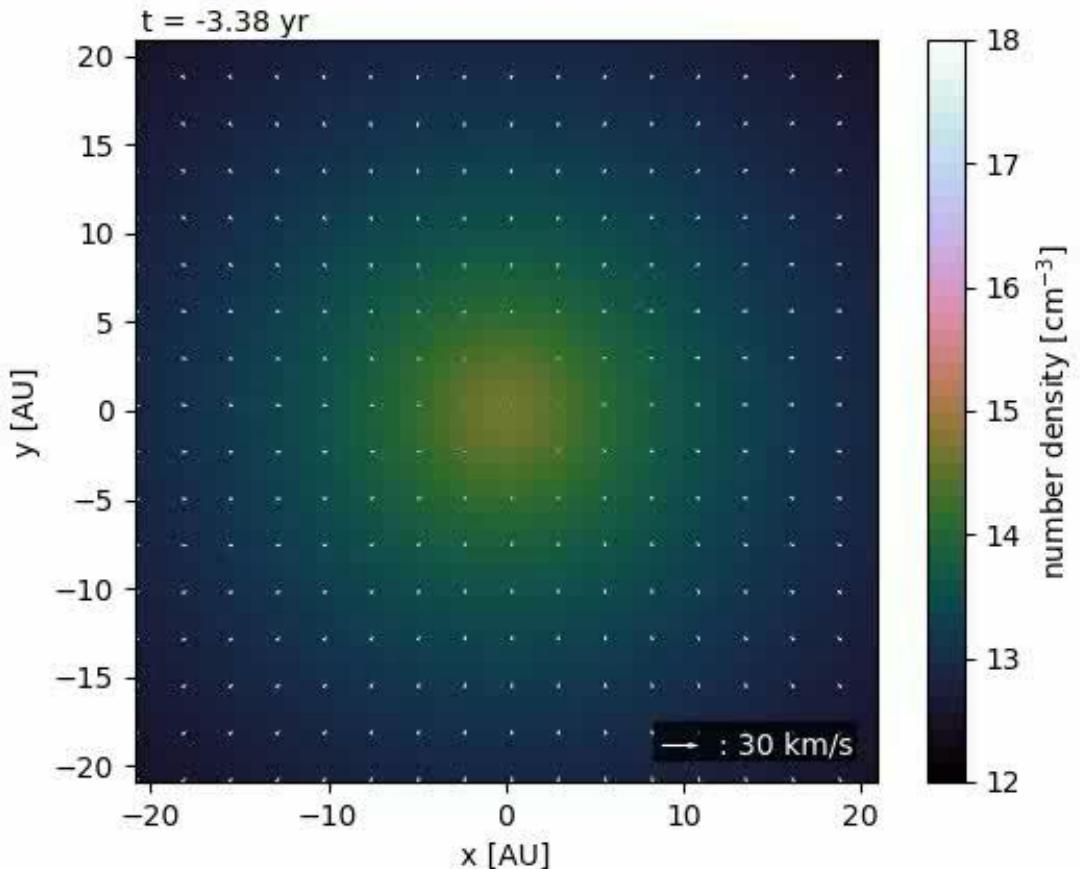
サブストラクチャー形成  
星内部の磁束を外部へ輸送



初代星形成 (Machida et al. 2025)  
星、円盤内部の磁束を外部へ輸送  
→形成されたリング状構造が  
高い質量降着率から重力不安定を  
発生させ、分裂する可能性を示唆

# $Z = 0$ モデル(初代星)の場合

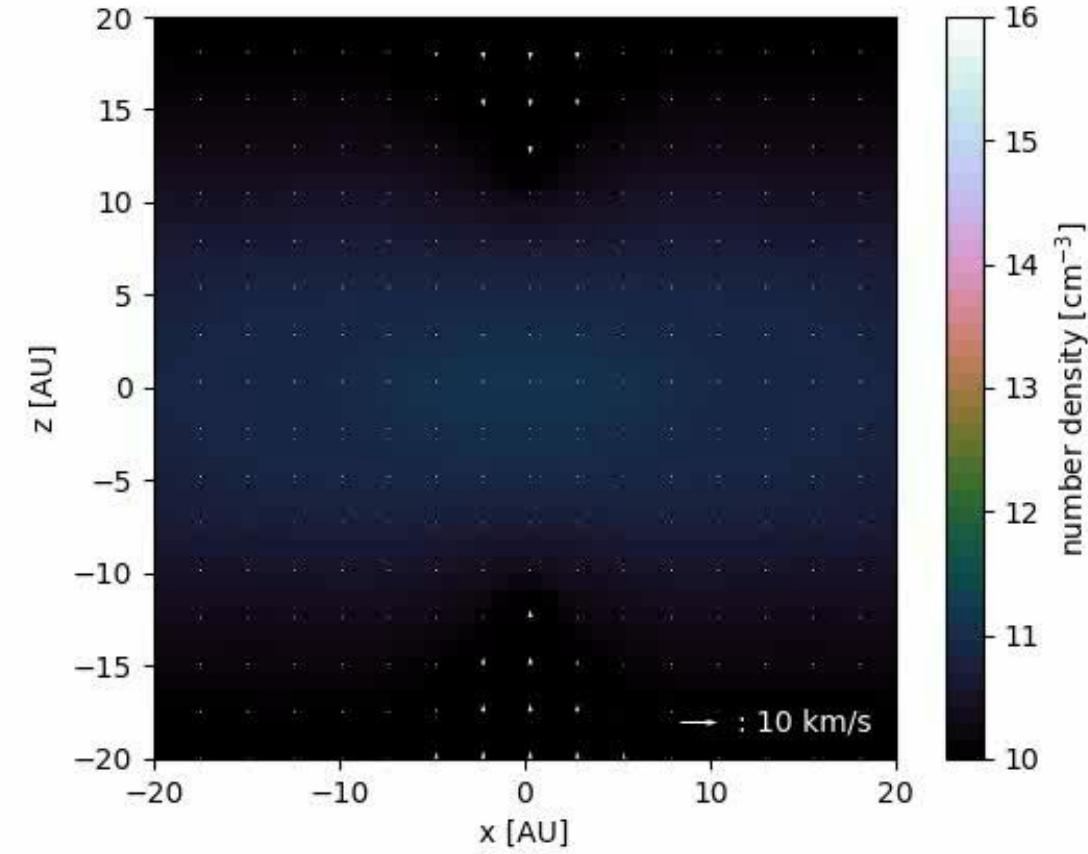
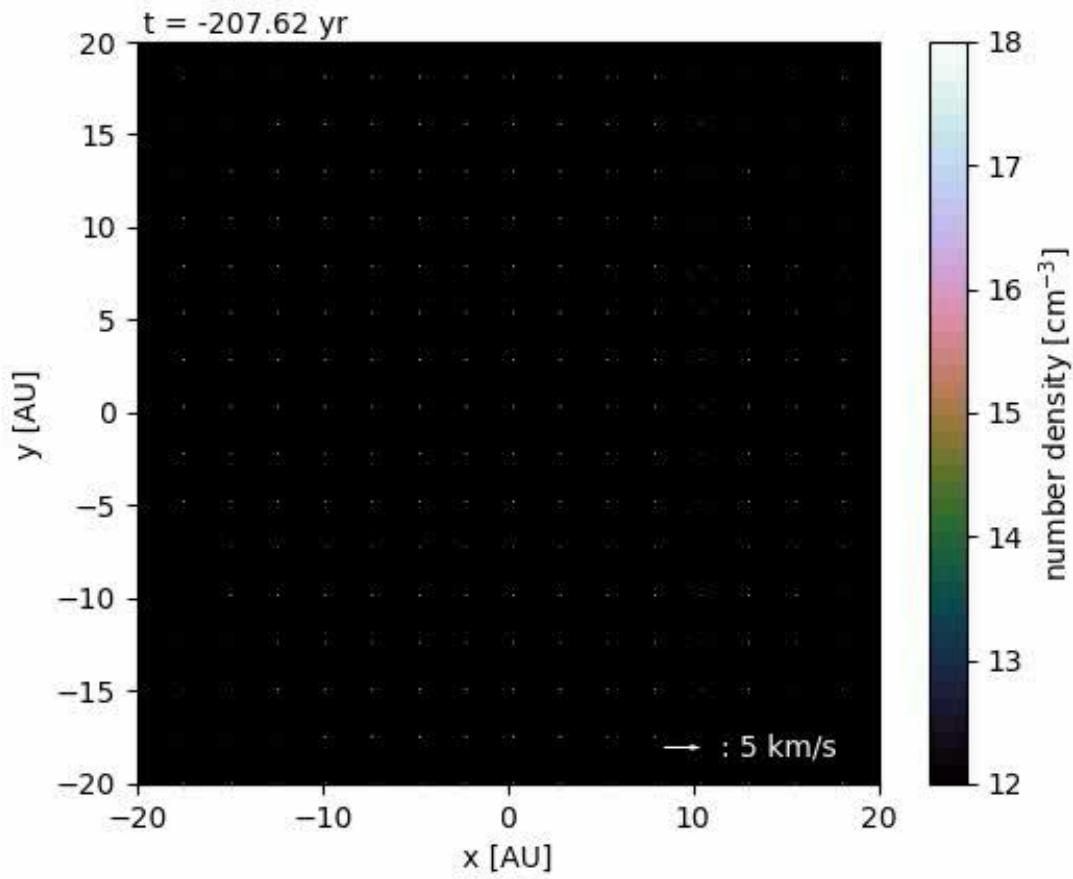
FSFG2025



磁気交換型不安定が発生・リング状構造が成長  
アウトフローは断続的にしか出現せず  
赤道面のchannelによるガス降着、星周円盤はできにくい

# $Z/Z_{\odot} = 10^{-2}$ モデルの場合

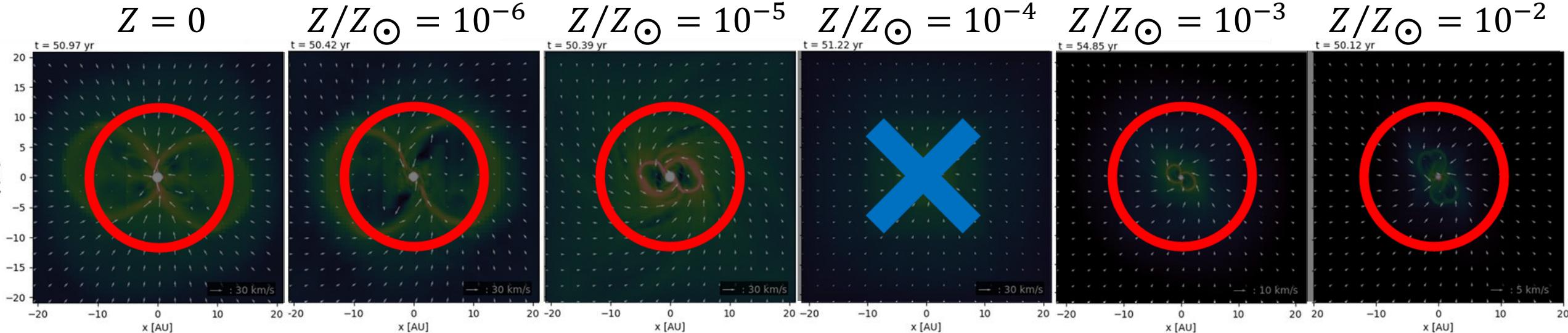
FSFG2025



磁気交換型不安定が発生・リング状(重力不安定性も伴う?)構造が成長  
アウトフローは定常的に出現

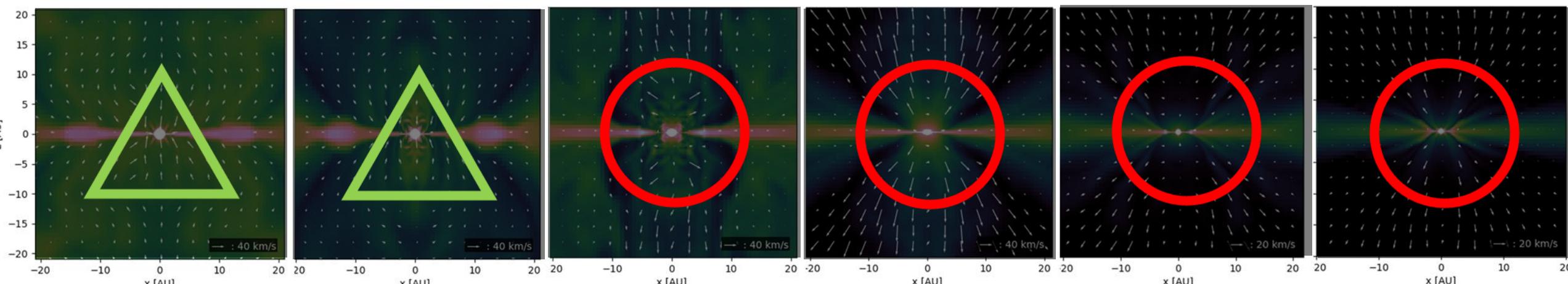
# 強磁場の影響 $\mu = 3$

FSFG2025



• 分裂の抑制→单一星形成

• 磁気交換型不安定の発生



•  $Z/Z_{\odot} \leq 10^{-6}$ でのアウトフローの断続化

- 強磁場環境における低金属量星の形成過程を降着段階まで計算
- 金属量を変化させた6つのモデルを計算
- 本条件下においては全て單一星が形成された→強磁場環境では分裂を抑制
- $Z/Z_{\odot} = 10^{-4}$ を除いた全てのモデルで磁気交換型不安定を確認  
→強磁場低金属量星における磁気交換型不安定の発生を初めて確認
- $Z/Z_{\odot} \leq 10^{-6}$ ではアウトフローが断続的に出現  
→質量放出が少なく、弱磁場環境よりも大質量星形成されやすい？
- 星周円盤が形成されないためその後の進化(輻射feedback等)に影響を与える
- IMF、中心星進化(定常or非定常降着)、比較的高い金属量での惑星形成等への影響  
(Shoshi et al. 2025)

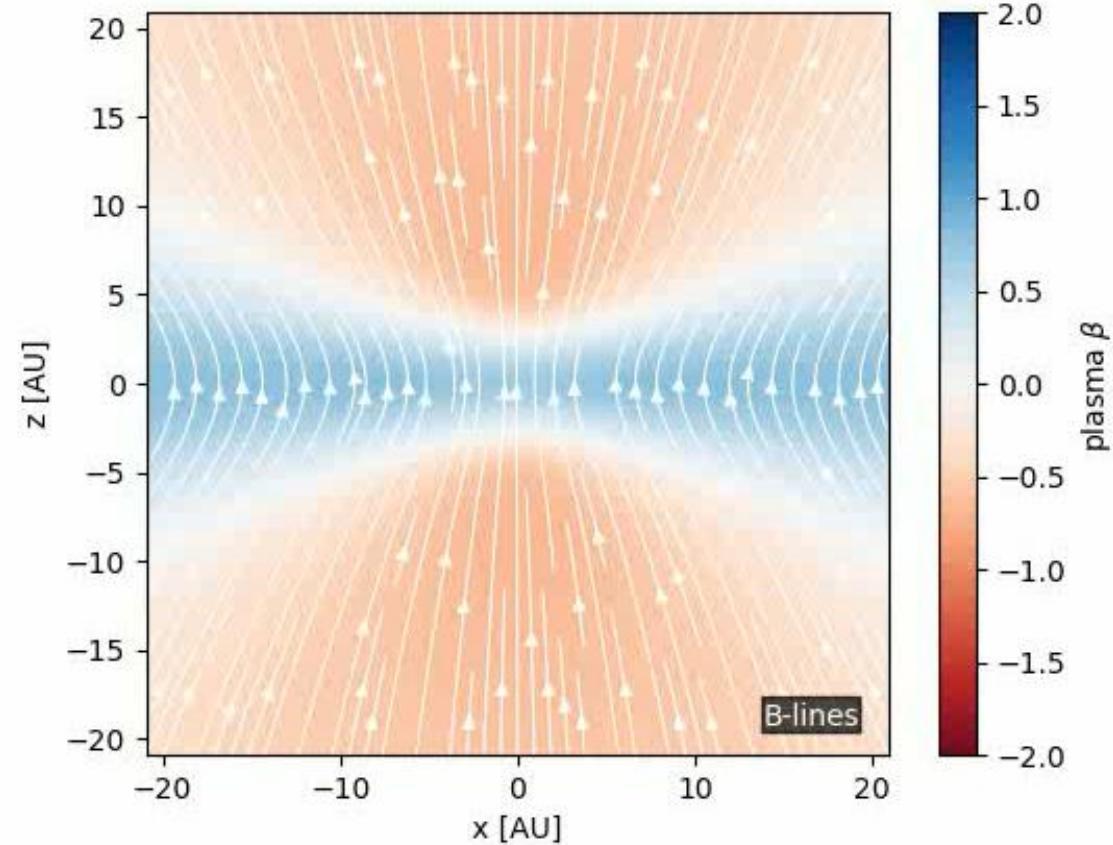
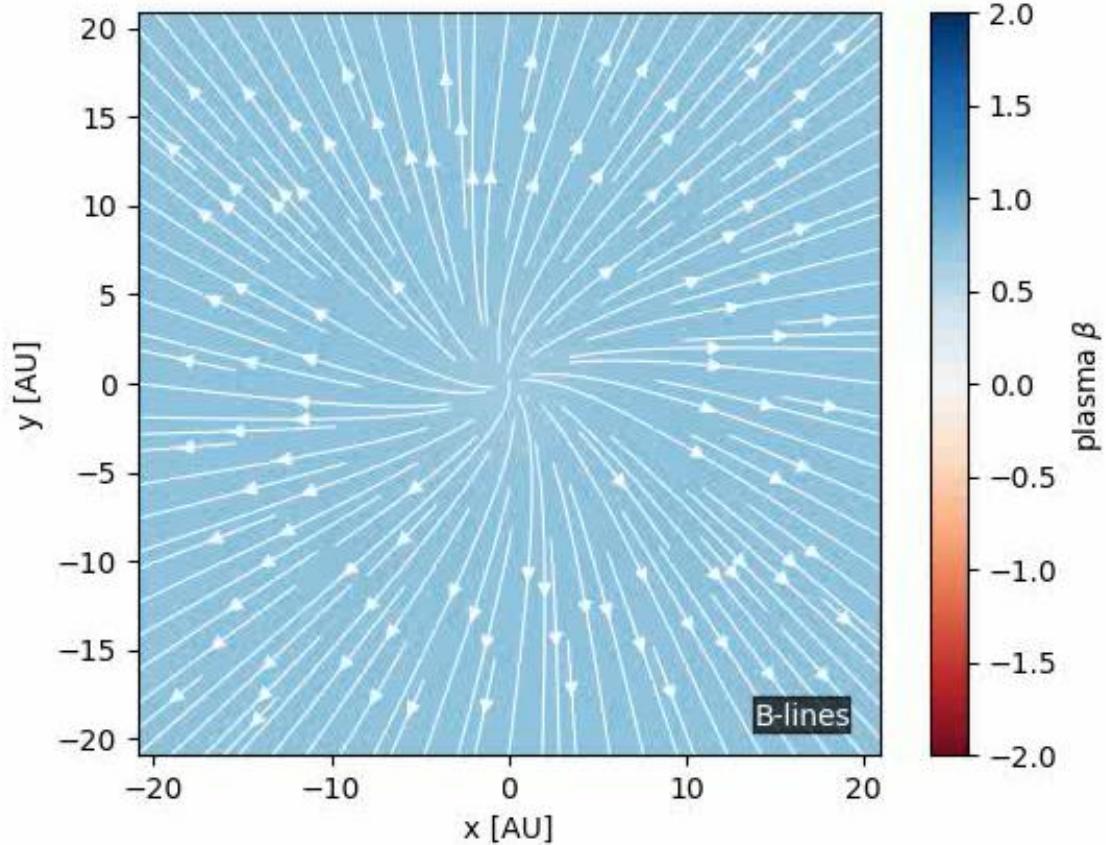
## 今後の研究

- 他の初期パラメータ(磁場、角速度等)を変化させて計算
- 原始星形成後100yr程度しか計算できていないため、長時間計算をして質量降着率、質量放出率などを導出

# Appendix

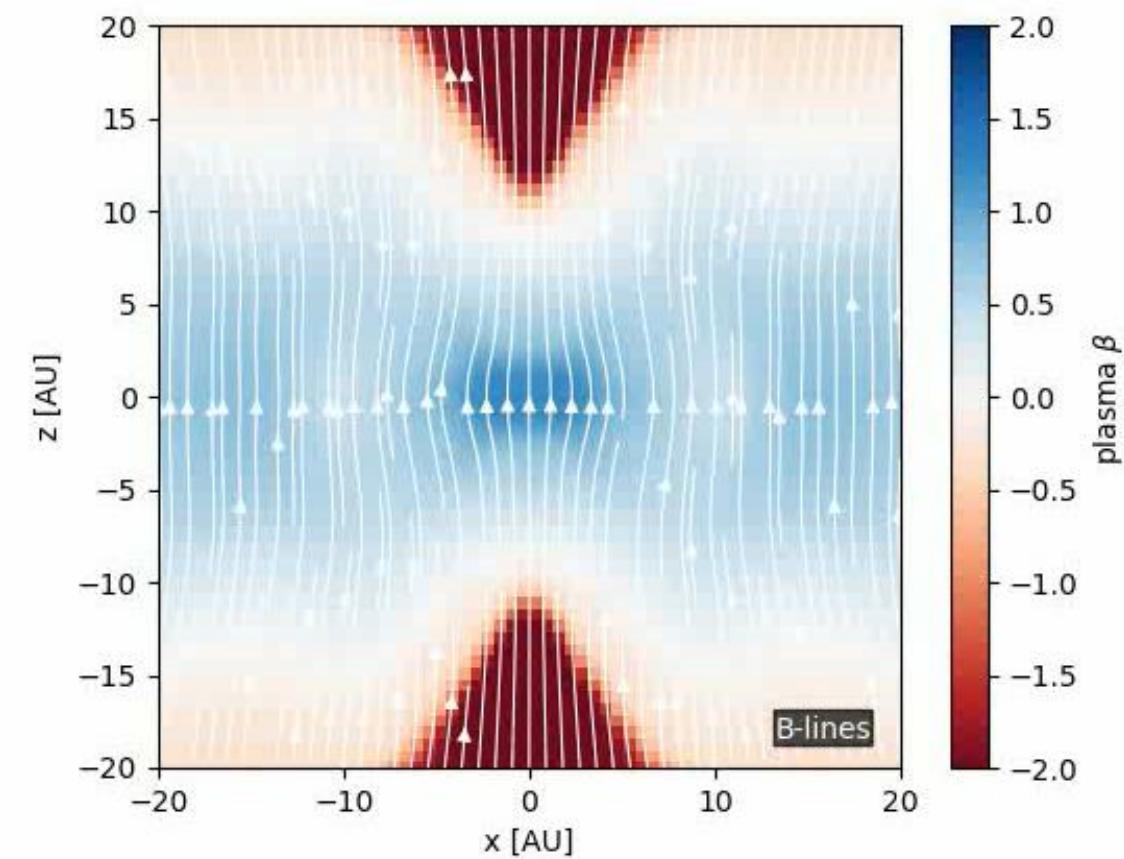
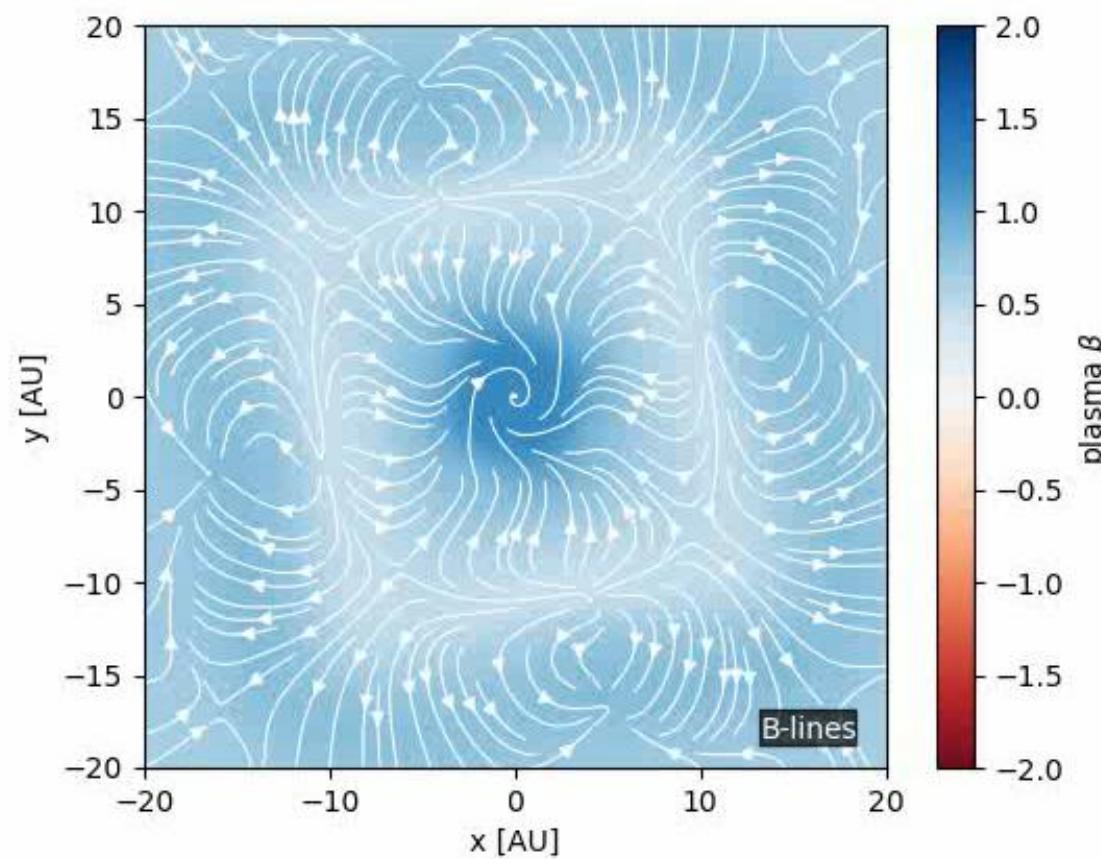
# $Z = 0$ モデル(初代星)の場合

FSFG2025



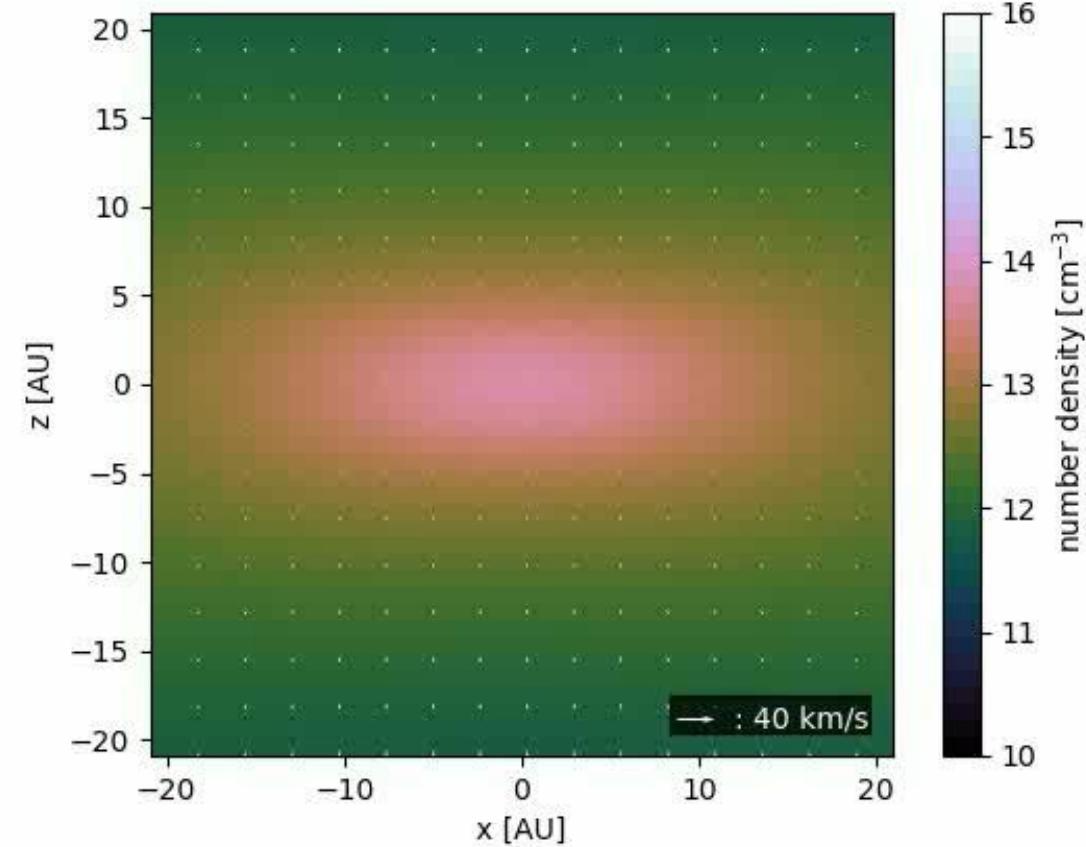
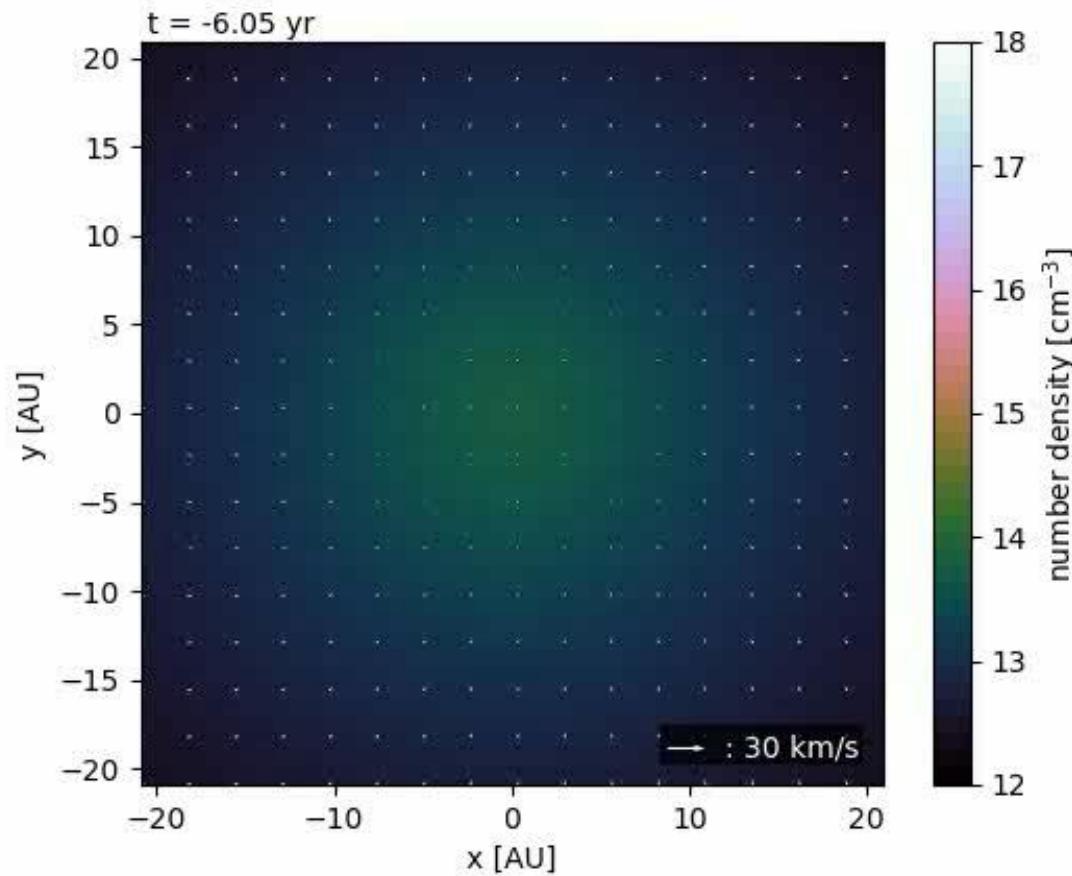
# $Z/Z_{\odot} = 10^{-2}$ モデルの場合

FSFG2025



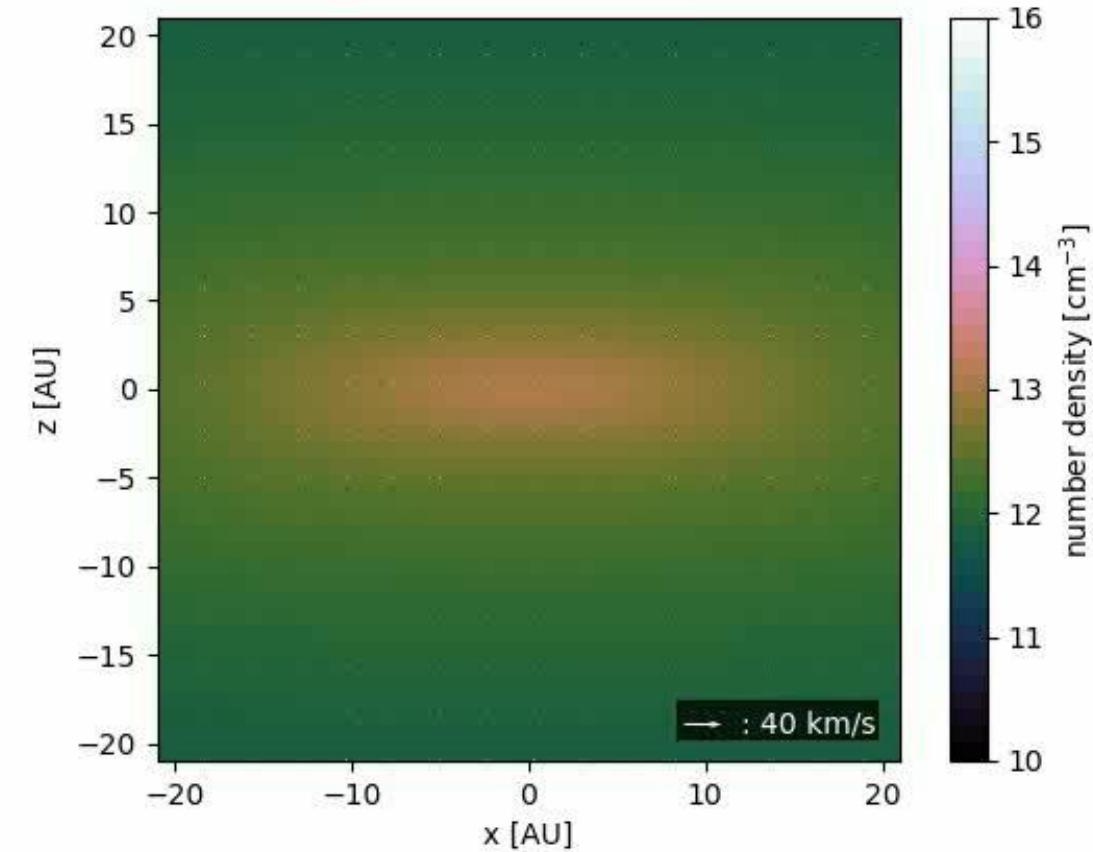
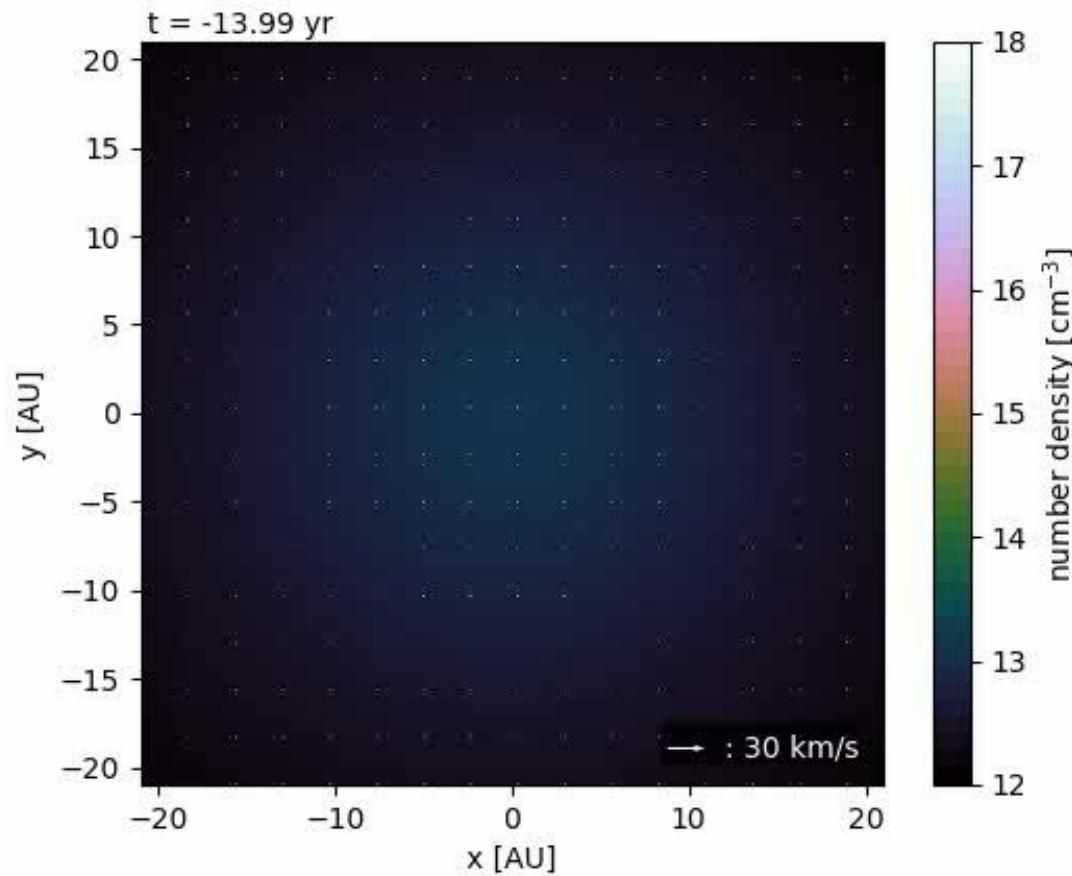
# $Z/Z_{\odot} = 10^{-6}$ モデルの場合

FSFG2025



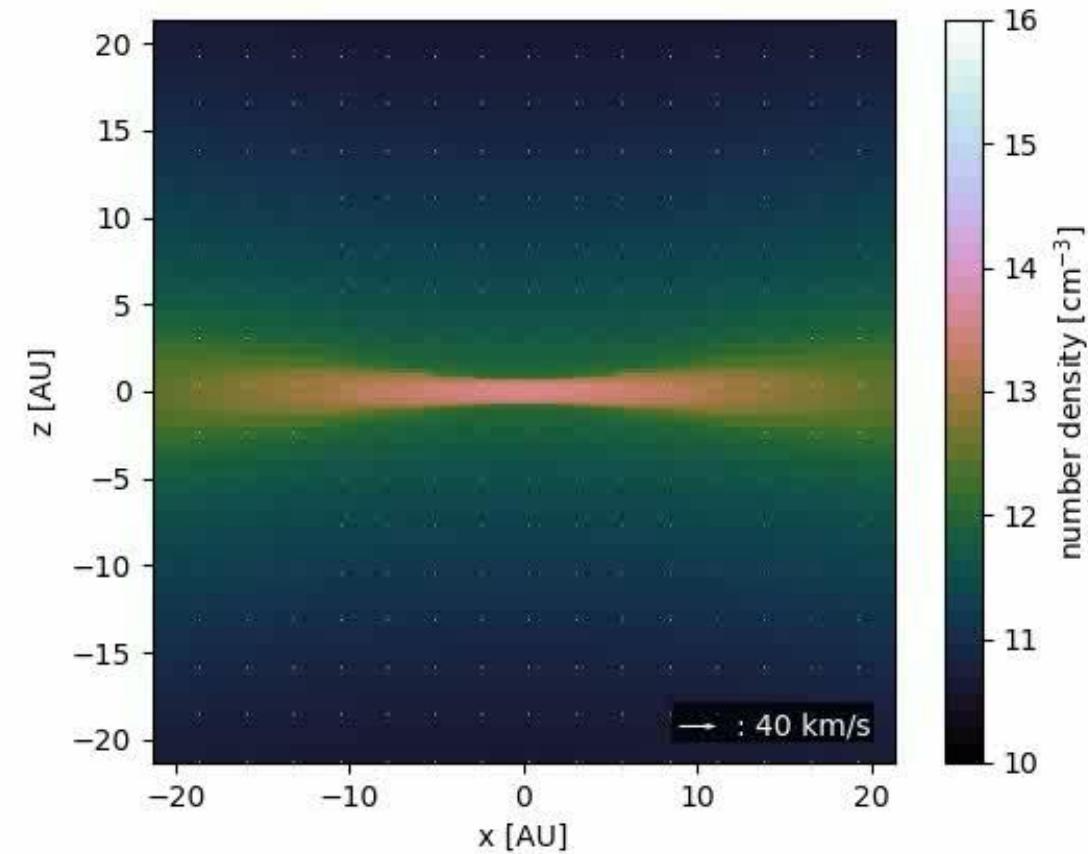
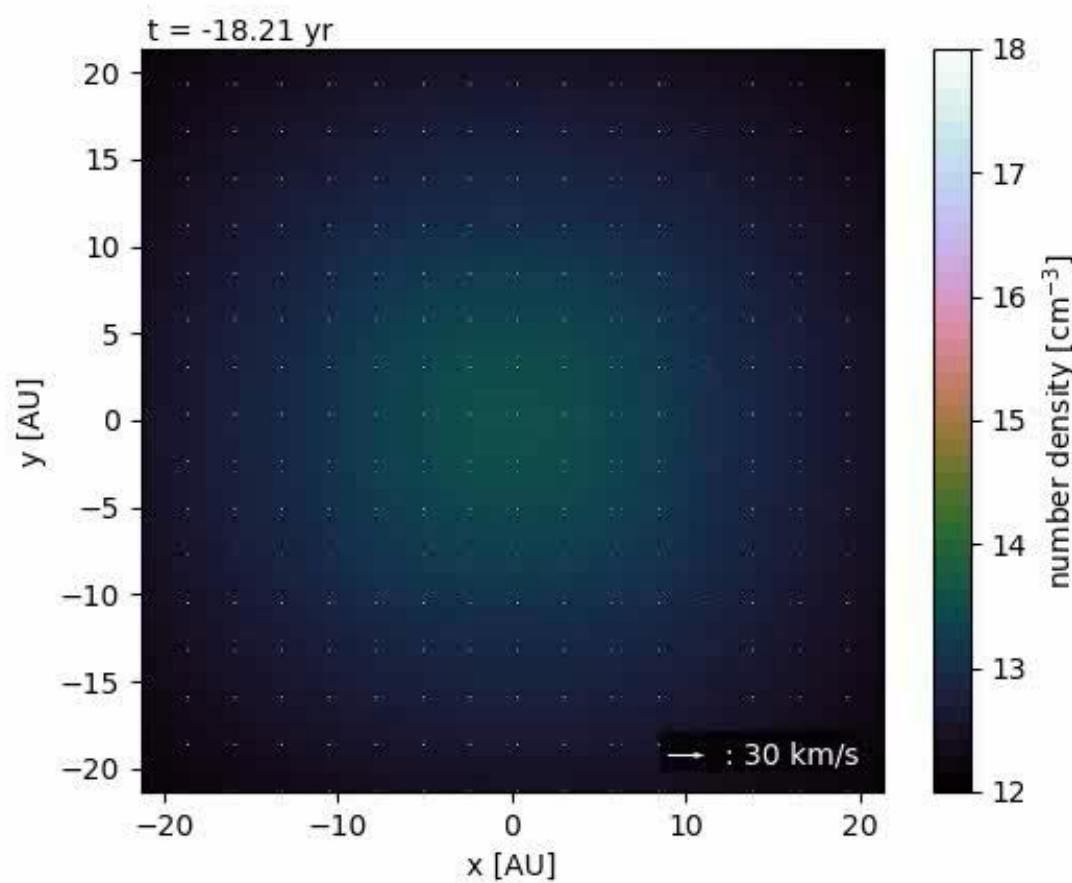
# $Z/Z_{\odot} = 10^{-5}$ モデルの場合

FSFG2025



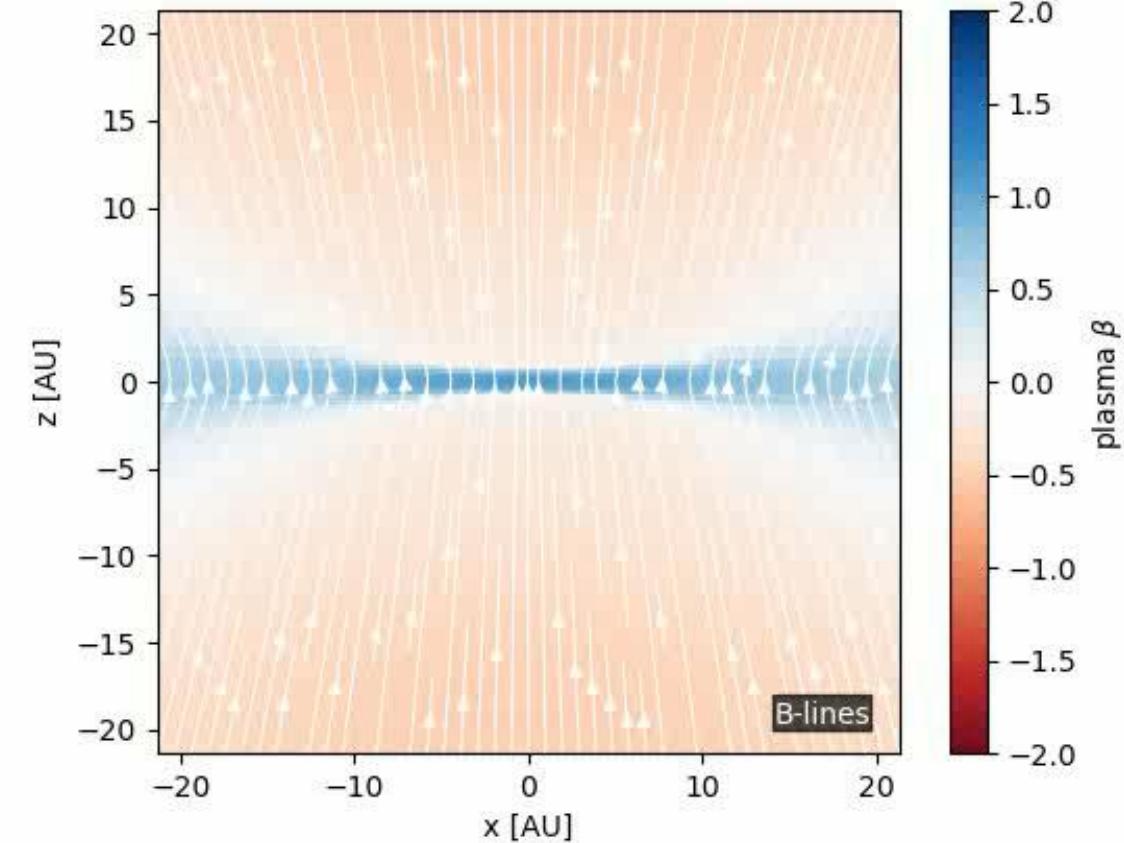
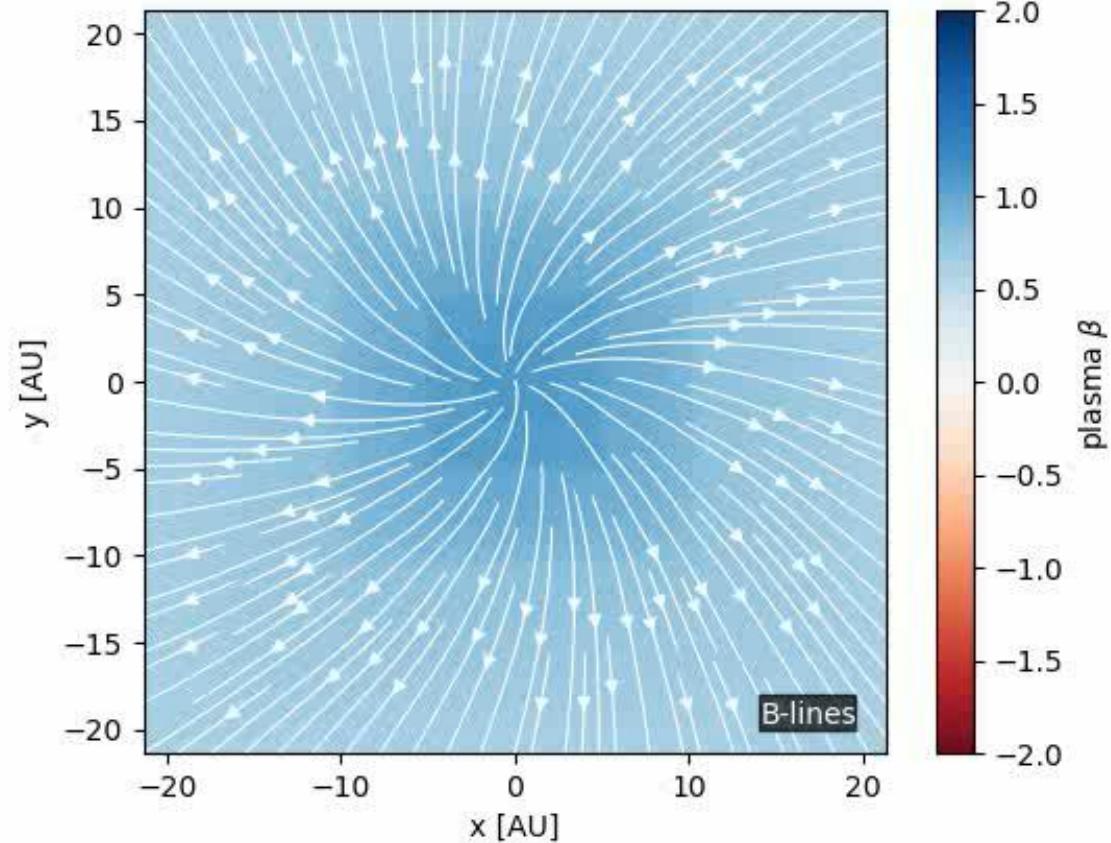
# $Z/Z_{\odot} = 10^{-4}$ モデルの場合

FSFG2025



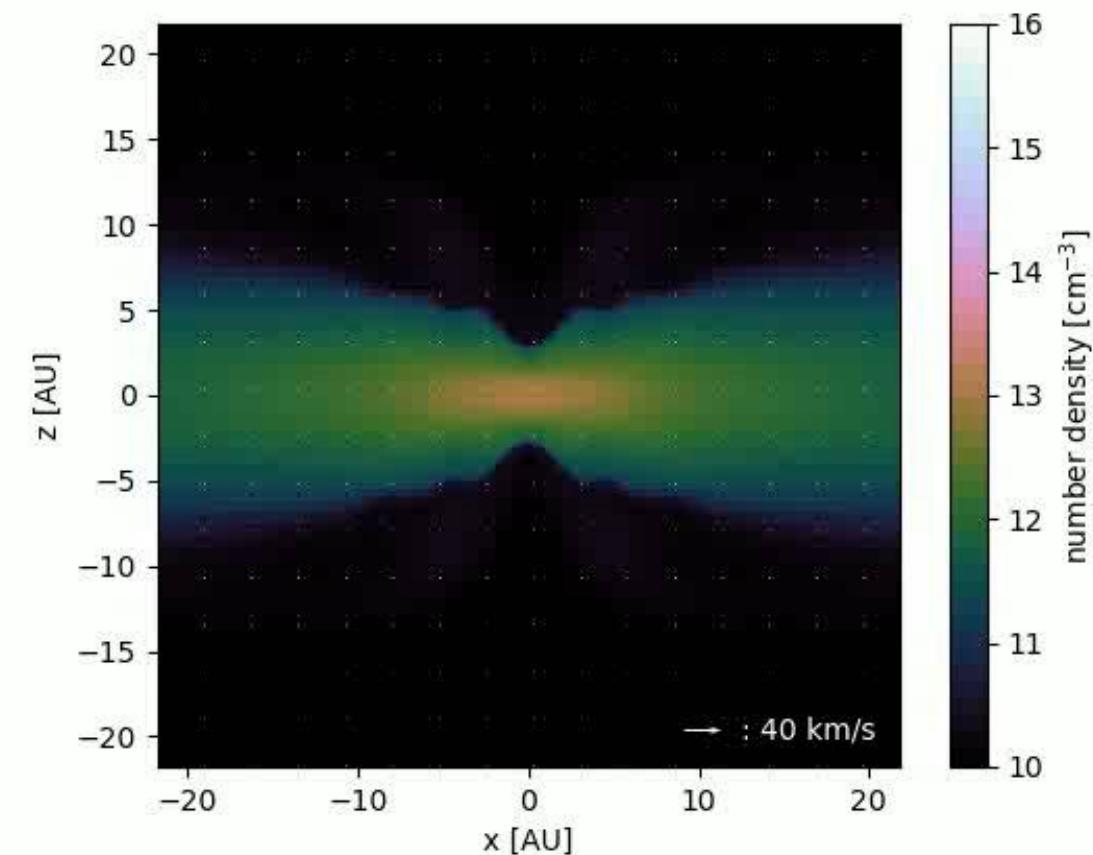
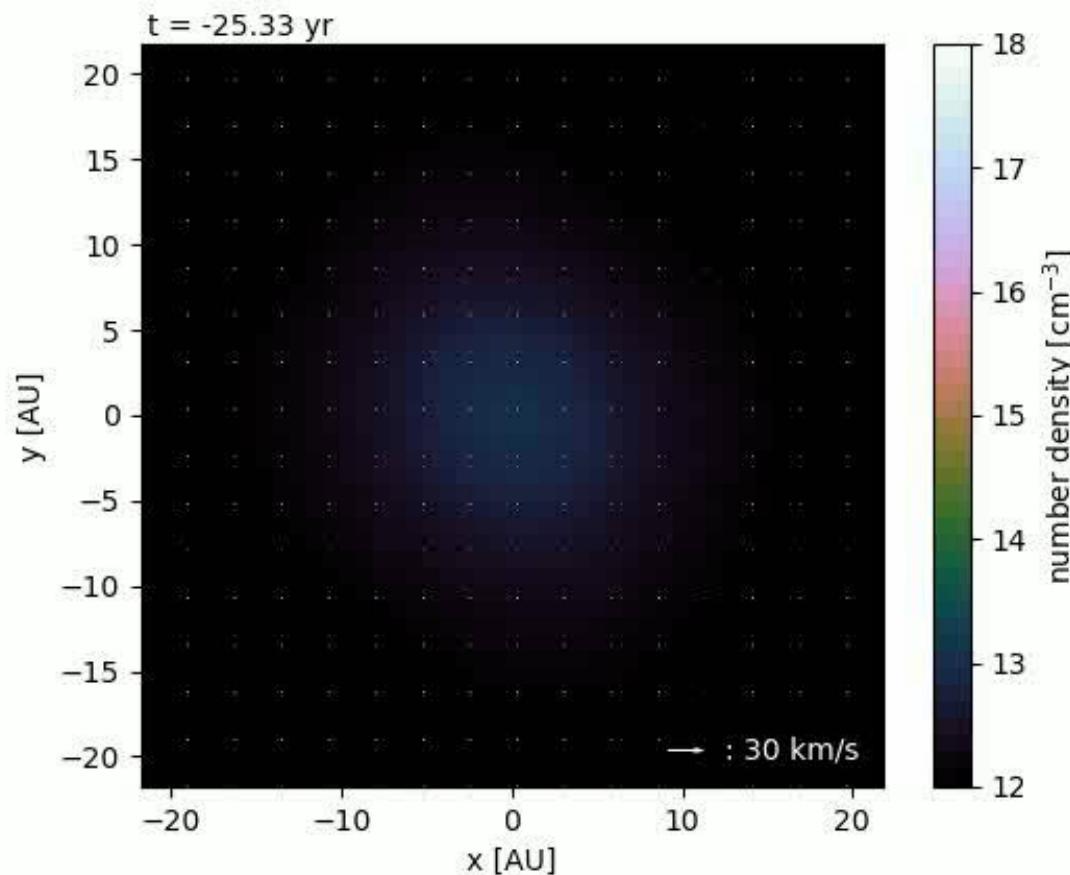
# $Z/Z_{\odot} = 10^{-4}$ モデルの場合

FSFG2025



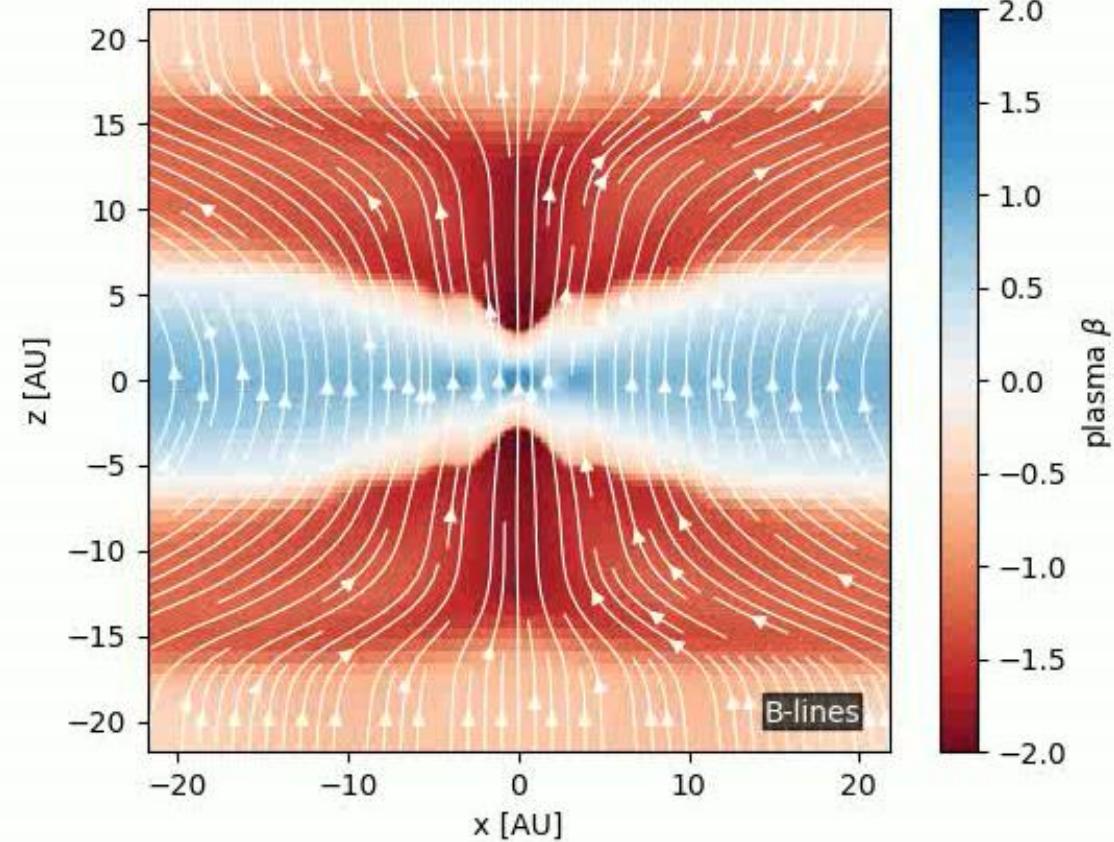
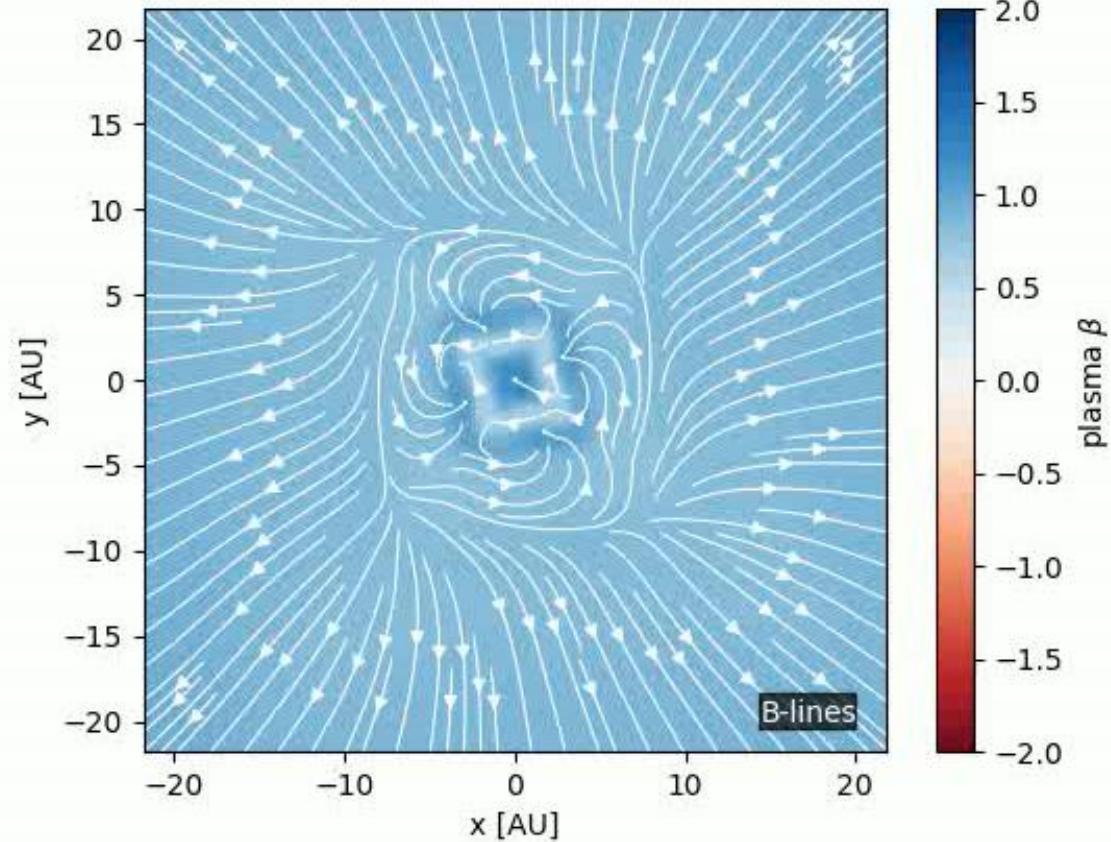
# $Z/Z_{\odot} = 10^{-3}$ モデルの場合

FSFG2025



# $Z/Z_{\odot} = 10^{-3}$ モデルの場合

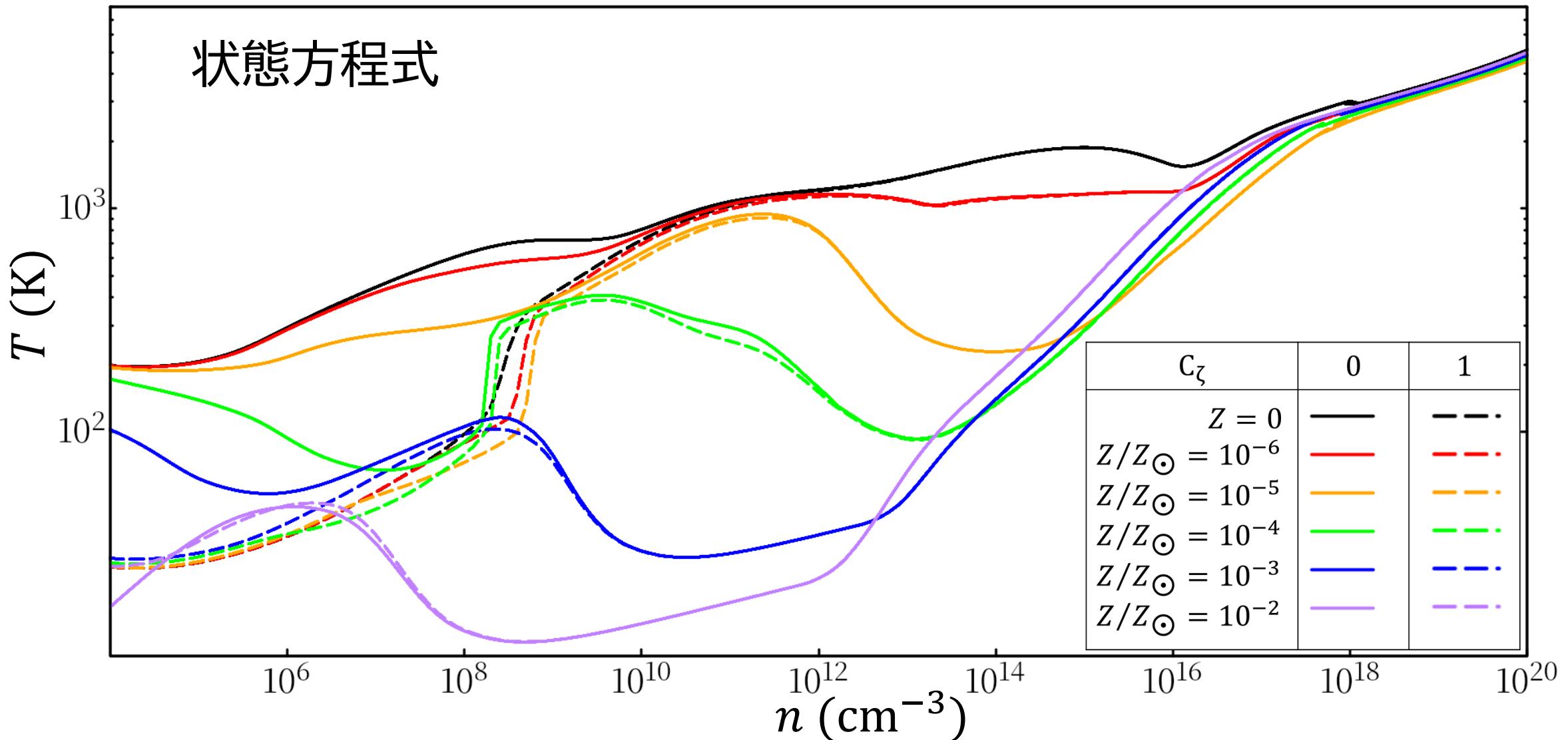
FSFG2025



$\eta$	1					
金属量： $Z/Z_{\odot}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	0
中心数密度	$n = 10^4 \text{ cm}^{-3}$					
質量磁束比	$\mu_0 = \frac{M/\Phi}{(M/\Phi)_{\text{cri}}} = 3$					
磁场： $B(\mu\text{G})$	10.9	11.4	11.1	10.9	10.9	10.9
質量： $M(\times 10^2 M_{\odot})$	1.97	2.44	2.28	2.16	2.15	2.15

# One-zone 近似計算( $\eta$ による違い)

FSFG2025



One-zone 近似を用いて計算(Susa et al. 2015, Omukai et al. 2005)

イオン化度 $\zeta$ :  $\zeta = \zeta_{\text{CR}} + \zeta_{\text{RE,short}} + \zeta_{\text{RE,long}}$  (e.g., Susa et al. 2015)

---

## 放射性元素(RES)の崩壊

- 短寿命放射性元素
- 長寿命放射性元素

$$\zeta_{\text{RE,short}} = 7.6 \times 10^{-19} \text{s}^{-1} \eta$$

$$\zeta_{\text{RE,long}} = 1.4 \times 10^{-22} \text{s}^{-1} (Z/Z_\odot)$$

## 宇宙線(CR)

$$\zeta_{\text{CR}} = \eta \zeta_{\text{CR,0}} \exp\{-\rho R_J/\lambda\}$$

$\eta$	環境
1	銀河系(CR強度 $\zeta_{\text{CR,0}} = 1 \times 10^{-17} \text{s}^{-1}$ )
0	始原的な環境(CR, RESによるイオン化なし)