

星間媒質における磁気雲の形成過程 ～なぜHI雲の磁場は μG なのか？～

T. Inoue, S. Inutsuka, & H. Koyama 2007, submitted to ApJL

京都大学・理・天体核研究室

井上 剛志

共同研究者：犬塚 修一郎（京都大学）

1. Introduction

➤ 星間媒質の中低温成分は CNM, WNM からなる2相系

Cold Neutral Medium(CNM) : $T \sim 10^2$ K, $n \sim 10^2$ cm⁻³ ... HI雲, 分子雲

Warm Neutral Medium(WNM) : $T \sim 10^4$ K, $n \sim 10^{-1}$ cm⁻³ ... 星雲間ガス

CNMはThermal InstabilityによりWNMが相転移して形成されると考えられており、その形成過程が近年世界中で精力的に研究されている (Inoue et al. 2006, 2007, Koyama & Inutsuka 2006, Audit & Hennebelle 2005, Heitsch et al. 2005, 2006, Vazquez-Semadeni et al. 2006, Brandenburg et al. 2006)

➤ 星間磁場強度問題 Troland & Heiles (1986)

- CNM, WNMの磁場はそれぞれ吸収線の Zeeman 効果や偏光の Faraday rotation を用いて測定されており、それらはCNMとWNMがほぼ同程度の磁場を帯びていることを示している ($B \sim \text{a few } \mu\text{G}$)

$$\text{plasma } \beta \sim P_{\text{thermal}}/P_{\text{mag}} \sim 1$$

- CNM が Thermal Instability により形成されるとすればその過程で密度は100倍に圧縮される

➡ 凝縮の過程で磁場も増幅されるはずが、観測はその兆候を示していない！！

- Ideal MHD simulation を用いた過去の研究から
 - ... 磁気圧によって Thermal Instability の成長は著しく阻害される (Hennebelle & Perault 2000)
 - ... TI で形成されるCNMは $\beta \ll 1$ であり観測と矛盾 (Lim et al. 2005)
- しかしながらこれまでの研究はプラズマドリフトを無視した Ideal MHD での計算

ISMは部分電離プラズマであるためプラズマドリフトによる磁場のすり抜けを考慮した研究が必要！！

2. Thermal Instability の基本的性質

Thermal instability (TI): 暴走的冷却(加熱)により流体が凝縮(膨張)する不安定性

➤ TI の時間・空間スケール

熱的不安定な中性ガスの線形解析 (Field 1965)

成長時間: $t_{\text{grow}} \simeq t_{\text{cool}} = \sqrt{\frac{k_B T}{n \Lambda}} \sim 1 \text{ Myr} \cdots \text{cooling time}$

Most unstable scale: $l_{\text{TI}} \simeq \sqrt{l_F l_a} \sim 1 \text{ pc}$

$l_a = c_s t_{\text{cool}} \sim 10 \text{ pc} \cdots \text{Acoustic scale,}$

$l_F = \sqrt{\frac{\kappa T}{n^2 \Lambda}} \sim 0.1 \text{ pc} \cdots \text{Field length}$

MHD での場合

$t_{\text{grow}} \simeq (1 + \beta^{-1}) t_{\text{cool}}, \beta = p_{\text{thermal}} / p_{\text{mag}}$

初めから $\beta \ll 1$ でなければ線形成長段階ではあまり変わらない

➤ 非線形成長の段階

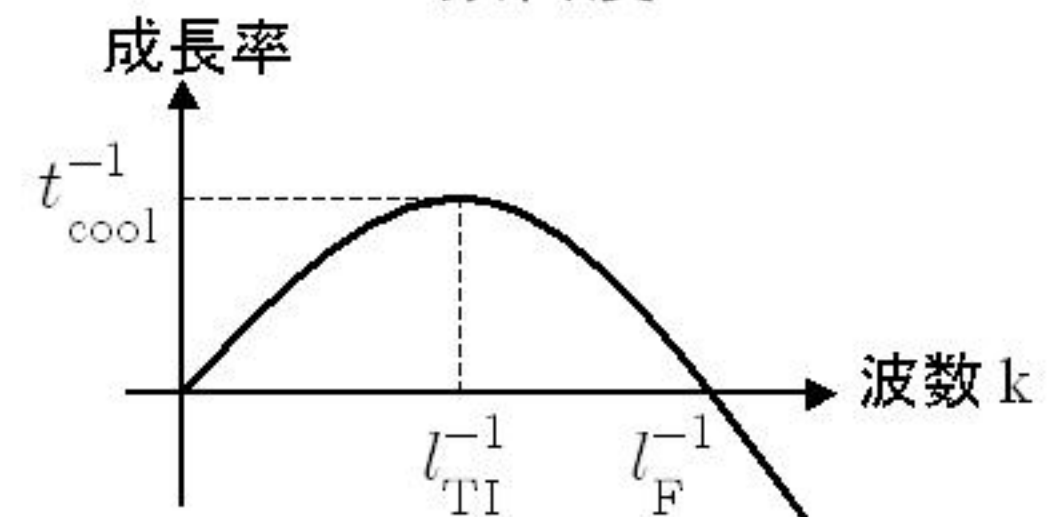
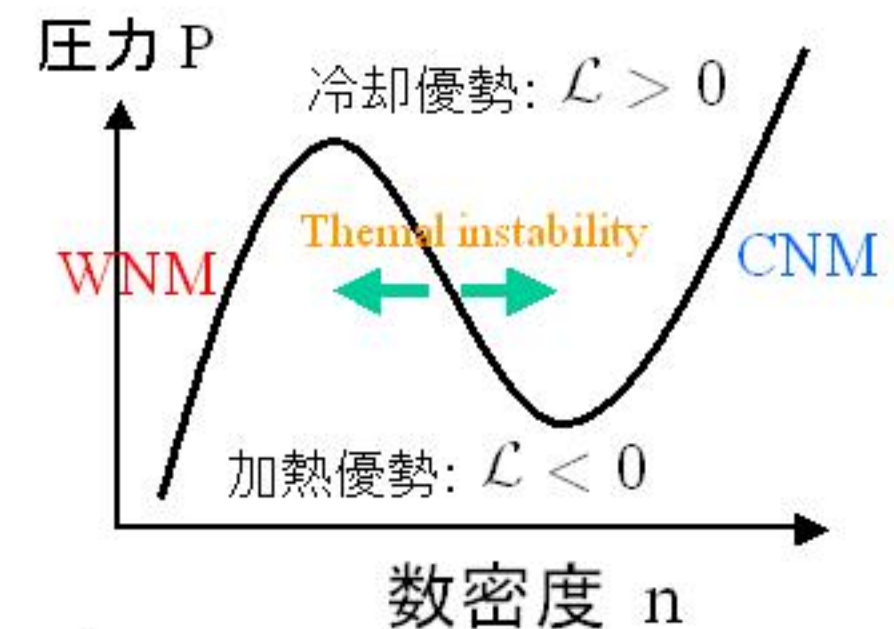
● 中性媒質の場合: TI は stable phase に達するまでほぼ等圧で進化 $\because l_{\text{TI}} < l_a$

● 理想MHDの場合: 凝縮による急速な磁気圧の上昇により成長が止まる $\because p_{\text{mag}} = \frac{B^2}{8\pi} \propto \rho^2$

正味の冷却関数: $\rho \mathcal{L} = n^2 \Lambda(n, T) - n \Gamma$

冷却率

加熱率



3. Two-fluid Model

➤これまで研究されてこなかった TI の非線形成長段階におけるプラズマドリフトの効果を調べる為には 1次元の2流体(中性, イオン) Simulation が必要

Basic equations	for neutral gas	for ionized gas
EOC:	$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_n v_n) = S$	$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i v_i) = -S$
EOM:	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_n v_n) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_n v_n^2 + p_n) = F$	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i v_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i v_i^2 + P_i) = -F$
EE:	$\frac{\partial E_n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(E_n + p_n) v_n = \frac{\partial}{\partial x} \kappa \frac{\partial T_n}{\partial x} - \rho_n \mathcal{L} + \Gamma_n$	$\frac{\partial E_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(E_i + P_i) v_i = \Gamma_i$
IE:		$\frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(v B)$
EOS:	$p_n = \frac{R}{\mu_n} \rho_n T_n$ $E_n = \frac{p_n}{\gamma-1} + \frac{1}{2} \rho_n v_n^2$	$p_i = \frac{R}{\mu_i} \rho_i T_i$ $E_i = \frac{p_i}{\gamma-1} + \frac{1}{2} \rho_i v_i^2 + \frac{B^2}{8\pi}$ $P_i = p_i + \frac{B^2}{8\pi}$

Sources

Ionization & Recombination: $S = \rho_i^2 \alpha_2 - \rho_n \xi_{X,CR}$

α_2 : recombination of H⁺

$\xi_{X,CR}$: ionization of H due to X-ray and CR

Collisional Force:

$$F = A \rho_n \rho_i (v_i - v_n) \quad A: \text{drag coefficient due to H+H}^+ \text{ collision}$$

Collisional Heating:

$$\Gamma_n = \frac{m_i (v_i - v_n)}{m_n + m_i} F + A \frac{3k_B \rho_i \rho_n (T_i - T_n)}{m_n + m_i} \quad \Gamma_i = \frac{m_n (v_i - v_n)}{m_n + m_i} F + A \frac{3k_B \rho_i \rho_n (T_i - T_n)}{m_n + m_i}$$

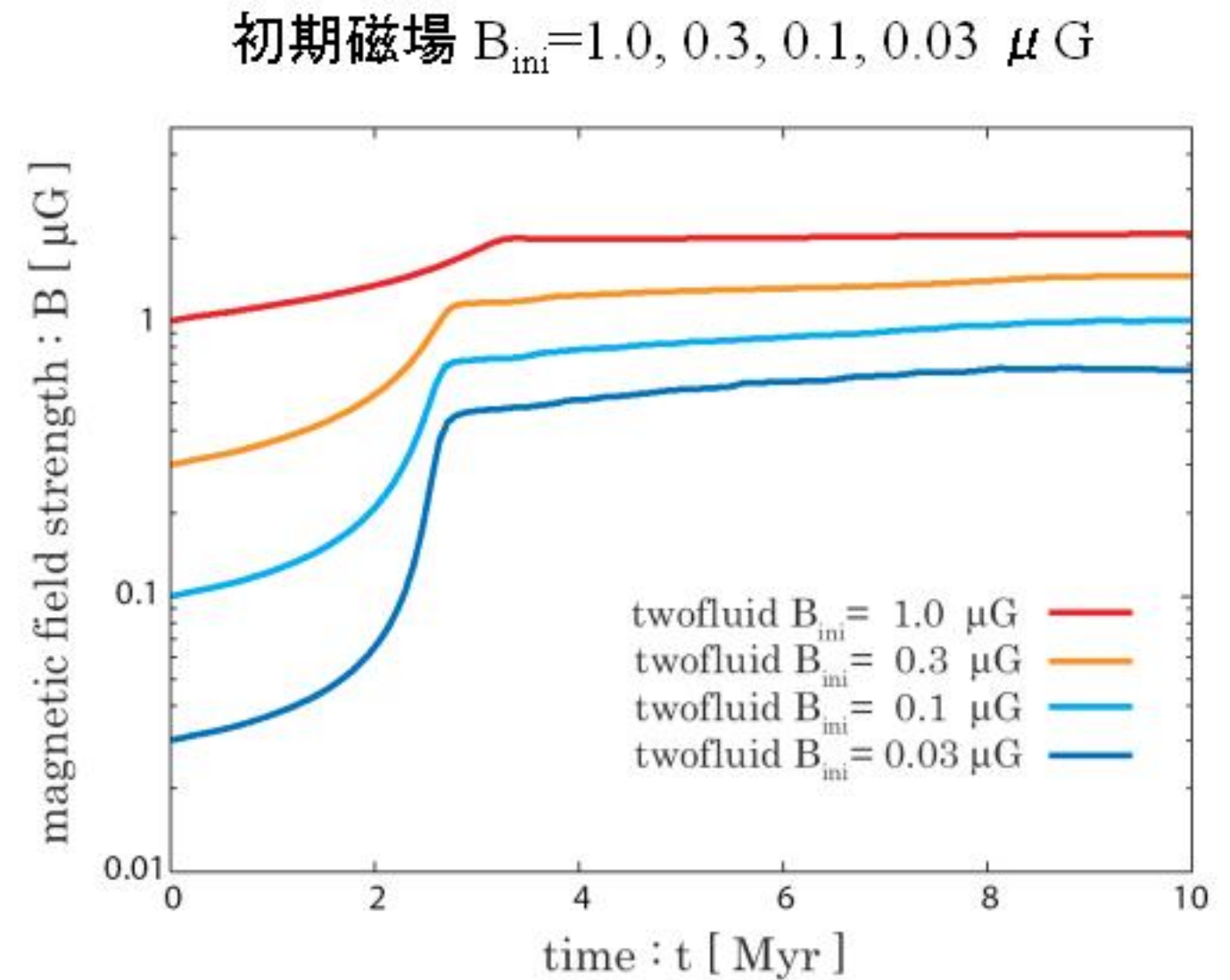
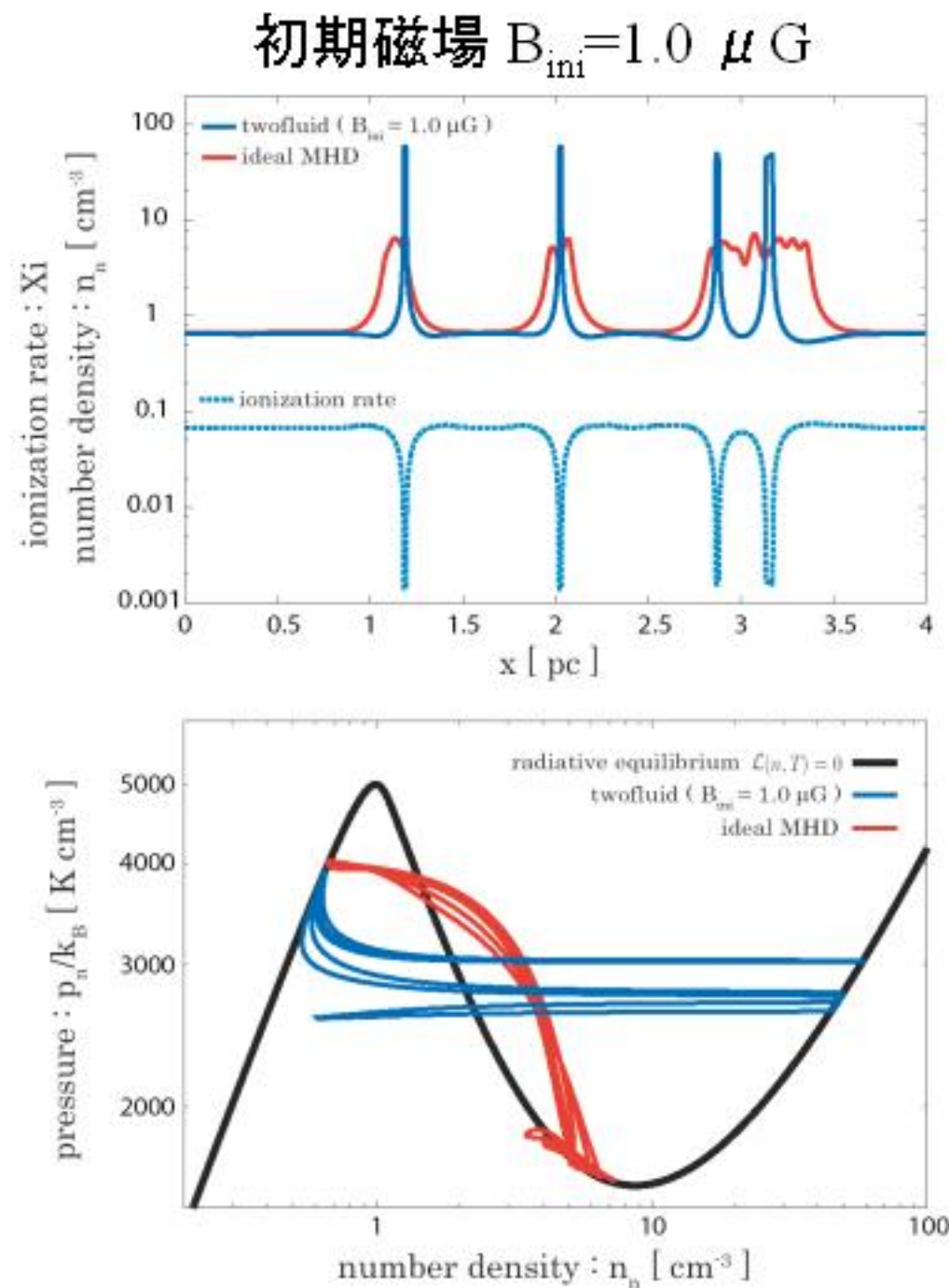
Thermal Conduction: κ due to neutral atomic collision

Cooling Function: $\mathcal{L}(n, T)$ due to line-emissions and photoelectric heating

4. Results

Numerical Scheme: 時間空間2次精度の Godunov 法

Initial Condition: 一様な熱的不安定媒質 + 5%の密度揺らぎ, 初期イオン化率 $X_i = n_e/n_i = 0.03$ (イオン化平衡)



最高密度部の磁場強度の時間発展

CNMにおける磁場強度は初期条件によらず μG になる！！

$t = 25$ Myr での neutral gas の密度構造とイオン化率
2流体の場合はドリフトによりCNMが形成されるが
Ideal MHD 場合は磁気圧により凝縮できない。

5. なぜ形成されるCNMの磁場は μG か?

Neutral \Rightarrow TI で CNM を形成したがる

Ion \Rightarrow Neutral に引きずられるが磁気圧が抵抗



互いに摩擦を感じながらすり抜けていく
(ambipolar diffusion)

➤ Drift speed

EOM for neutral & ionized gas

$$\rho_n \frac{d\vec{v}_n}{dt} = -\nabla p_n + \vec{F}_{\text{fric}}$$

$$\rho_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = -\nabla p_i + \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} - \vec{F}_{\text{fric}}$$

イオン化率が小さければ、

$$\vec{F}_{\text{fric}} \equiv A \rho_i \rho_n (\vec{v}_i - \vec{v}_n) \simeq \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}$$

$$\longrightarrow v_{\text{drift}} \equiv v_i - v_n = \frac{(\nabla \times B) \times B}{4\pi \Lambda \rho_n \rho_i} \sim \frac{B^2}{4\pi \Lambda x_i \rho_n^2 l_{\text{TI}}}$$

➤ 一方 TI の condensation speed は $v_{\text{TI}} \sim \frac{l_{\text{TI}}}{t_{\text{cool}}}$

- $v_{\text{TI}} > v_{\text{drift}}$ であれば磁場は圧縮され強くなる
- $v_{\text{TI}} < v_{\text{drift}}$ であれば collapse より早く磁場が抜ける

➤ $v_{\text{TI}} \sim v_{\text{drift}}$ で磁場は決まる

$$B_{\text{crit}} = \sqrt{4\pi \Lambda X_i \rho_n^2 c_s l_{\text{F}}} \simeq 3.2 \left(\frac{p_n / k_B}{4000 \text{ K cm}^{-3}} \right)^{1.475} \left(\frac{n_n}{50 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-0.4875} \mu\text{G.} \quad \text{in typical ISM}$$

数値実験, 観測結果を非常によく説明できる!!

6. Conclusion

- 中性ガス, イオンの2流体 MHD Simulation によって Thermal Instability による磁気雲形成を調査した

➡ プラズマドリフト (Ambipolar diffusion) の効果によって適度に磁化された磁気雲 ($\beta \sim 1$) の形成に成功

- 解析的計算によって初期条件に依らず Thermal Instability で形成される星間雲は常に

$$B \simeq 3.2 \left(\frac{p_n / k_B}{4000 \text{ K cm}^{-3}} \right)^{1.475} \left(\frac{n_n}{50 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-0.4875} \mu\text{G},$$

程度の磁場を帯びることを示した

- Troland & Heiles (1986) によって提唱されて以来未解決であった「星間磁場強度問題」は本研究により解決された！

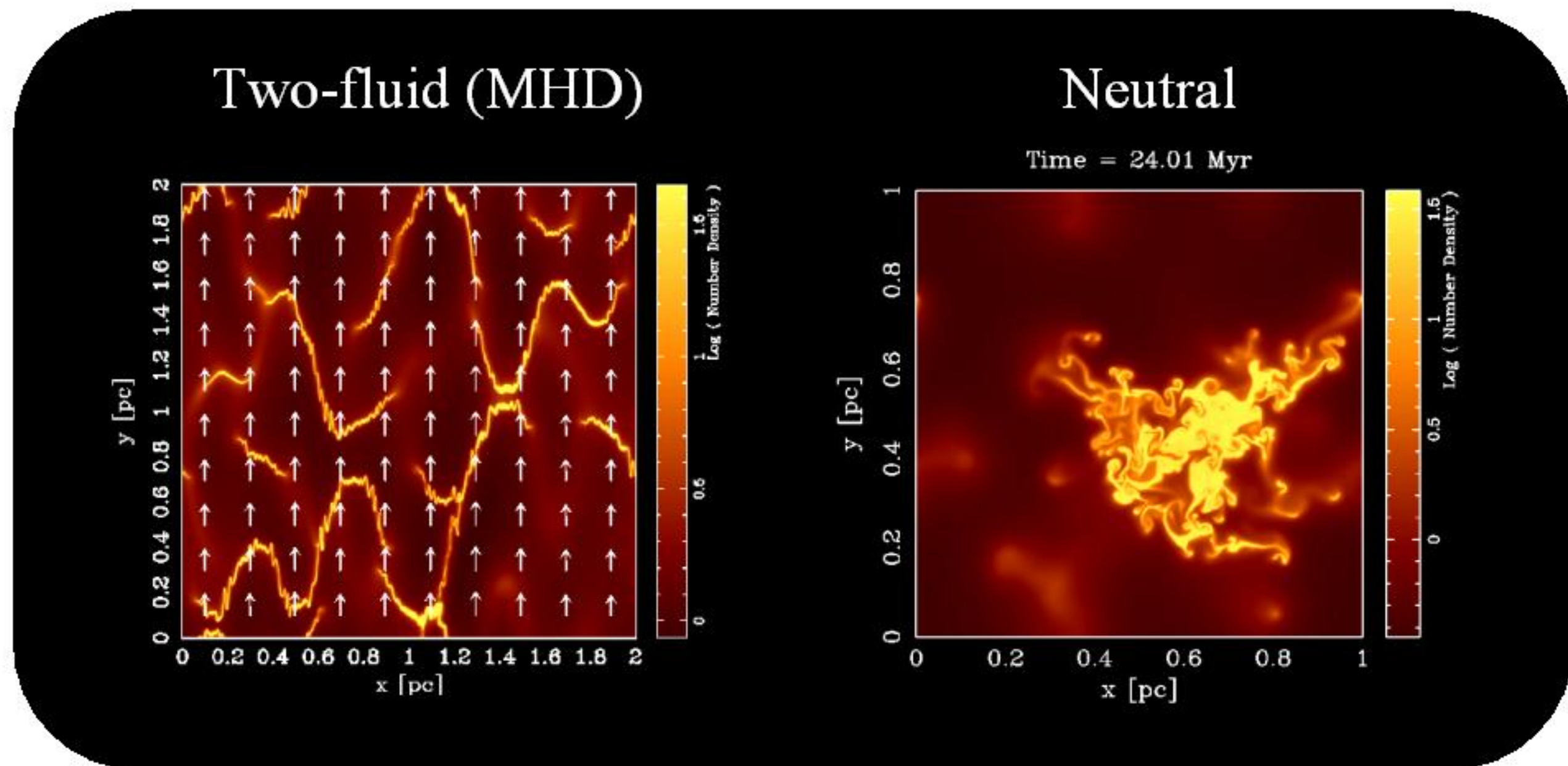
星間磁場強度問題・・・

HI 雲 (CNM: $n \sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$) は星雲間ガス (WNM: $n \sim 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$) が100倍以上圧縮されてできるにも関わらず同程度の磁場強度を観測的に示しているのはなぜか？

7. 現在取り組んでいる課題

2.5次元 2流体 MHD Simulation による Thermal Instability の成長と2相媒質形成後の乱流状態の統一的研究

Code 開発は完了し現在計算中



詳細は天文学会@神奈川で発表予定