

# 様々な金属量でのガスと磁場の 結合の様子について

須佐 元（甲南大）、土井健太郎（構造計画研究所）、大向一行（東北大）

*arXiv:1501.00087*

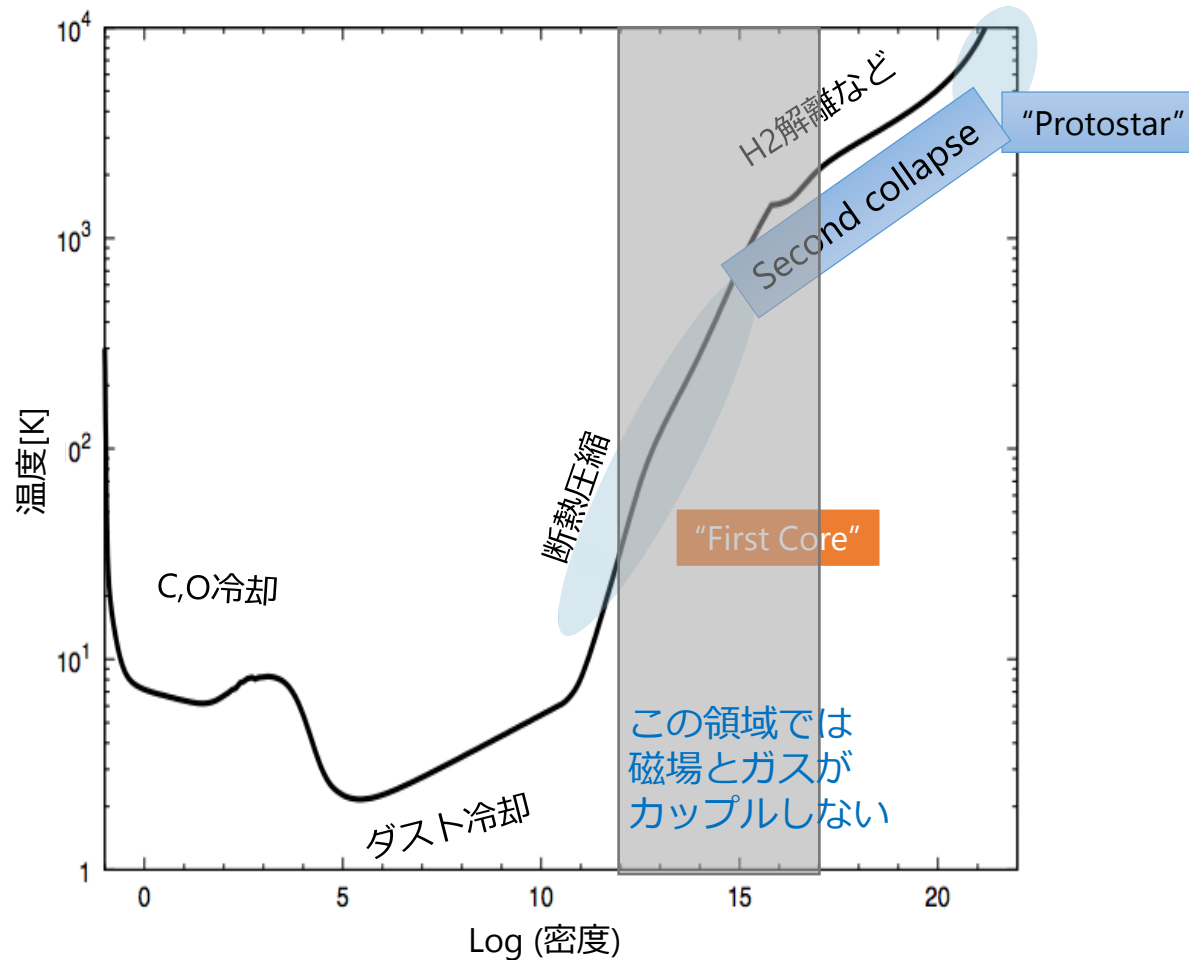
# 初期宇宙の磁場

- 宇宙論的プロセスによる種磁場
  - インフレーション中の電磁場と他の場の結合( $10^{-9}$ - $10^{-35}$ G)
  - 再結合時の二次摂動 (Ichiki+ 2006  $10^{-24}$ - $10^{-20}$ G)
- 宇宙物理的プロセスによる種磁場
  - Biermann Battery
    - 構造形成 Kulsrud+1997  $10^{-21}$  - $10^{-20}$ G, @comoving
    - 銀河形成 Davis & Widrow 2000;  $10^{-17}$ G @galactic center
    - Minihalo形成時 Xu+2008  $10^{-9}$ G@ $10^{10}$ cm $^{-3}$
    - 宇宙再電離 Gnedin+ 2000  $10^{-20}$ - $10^{-18}$ G
  - 輻射力
    - Drag : Balbus 1993, Chuzhoy 2004, Silk & Langer 2006
    - Shadow: Langer+2003,2005 Ando+2010, Doi & HS 2011, Shiromoto+2014
  - 星から吐き出す
    - If 1kG@POPIII ( $10^3$ G@ $10^{22}$  cm $^{-3}$ )  $\rightarrow$   $\sim 10^{-9}$ G@ $10^4$  cm $^{-3}$  (B star, Donati+2006など)
- Small scale dynamo
  - Heidelberg 一派, Ryu+2008  $\rightarrow$  primordial minihalos でもequipartition?

よわい種



# Present-day での Prestellar coreの進化



# 現在の星形成のダイナミクスにおける散逸の重要性

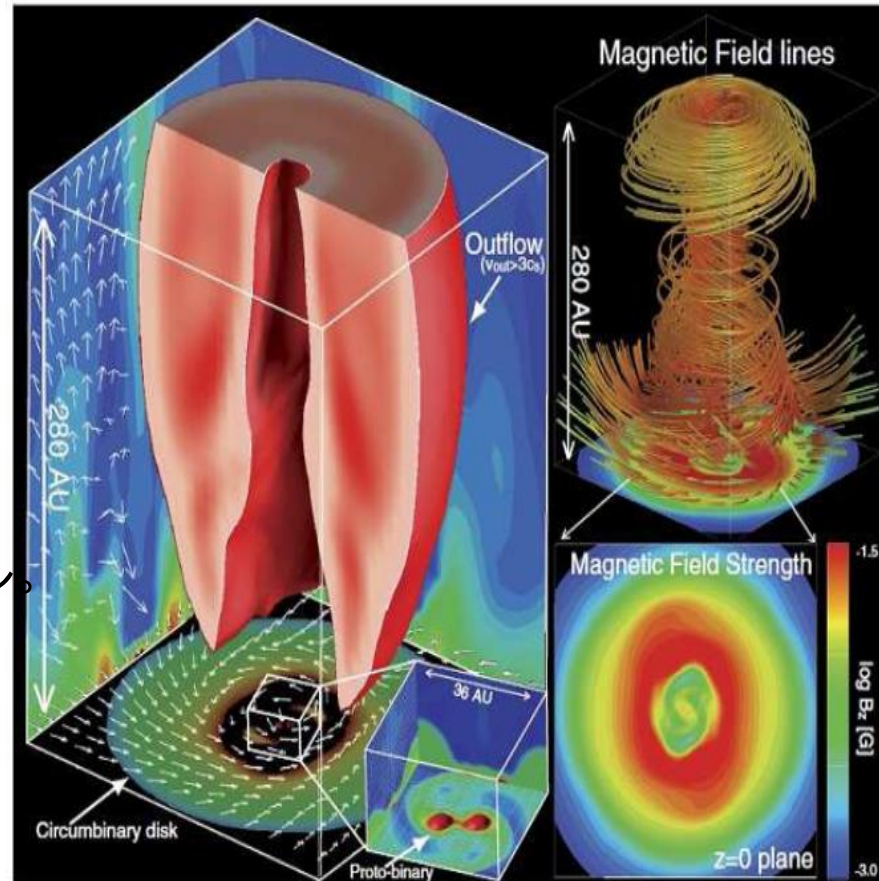
First CoreができるときにはBはガスとカップル。

角運動量は輸送  
FC付近でJet生成、  
Magnetic Breaking



Coreのさらに内部で再び  
収縮を始めるとBはデカップル。

角運動量は輸送されずに  
コンパクトなバイナリ形成



Machida+ 2009

磁場散逸の時期が系の進化に重要な役割

# 調べること

- 様々な金属量の環境における星形成において磁場とガスの結合の様子はどのようなであろうか？
- その結果生まれる星にどのような特徴があるか予言できるとよい（な）。

# Low metallicity での1-zone 収縮計算

- Omukai+2005 改
- + Li, Li+, LiH, Li++, Li+++, Li-, LiH+
- + Metals (M+, M。Mgのrateで代表、Na, Mg, Al, Ca, Fe, Ni)
- + Charged dust particles (G++, G+, G, G-, G--)
- $1e18$  /cc 以上でSahaの式  
(H, H<sub>2</sub>, He, H+, e, He+, He++) に接続
- $1e18$  /cc以下でも非平衡計算が収束しないときには平衡に切り替える ( $1e16$ - $1e18$ の間で切り替わるものあり)。

# 環境 (Cosmic Ray , Radioactive)

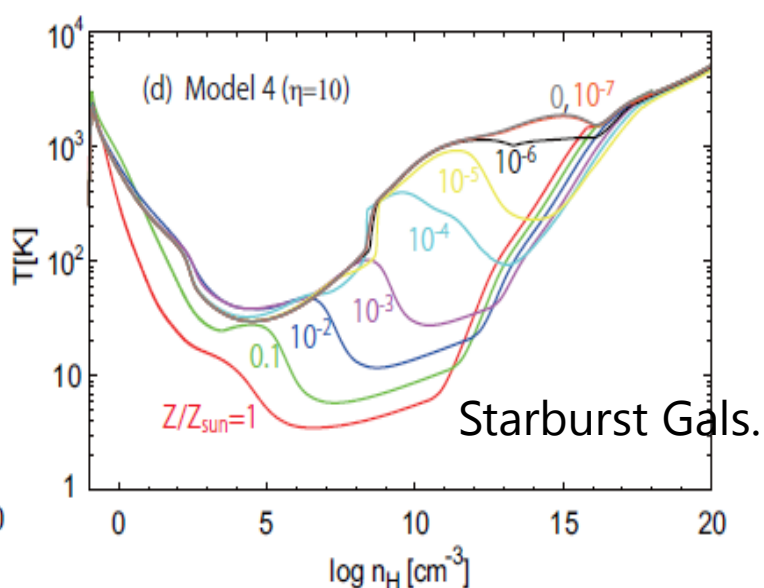
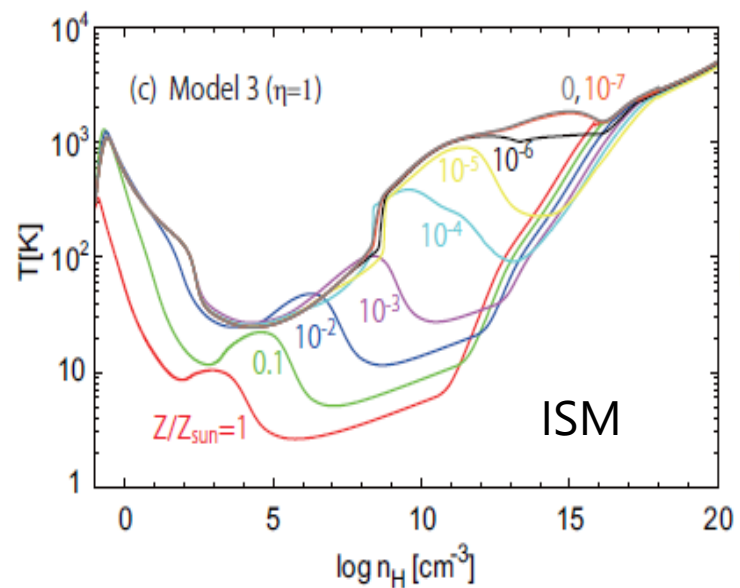
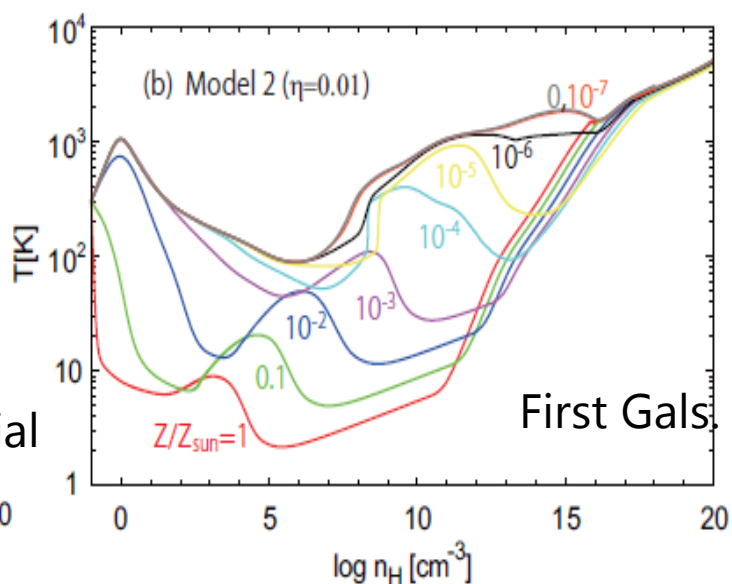
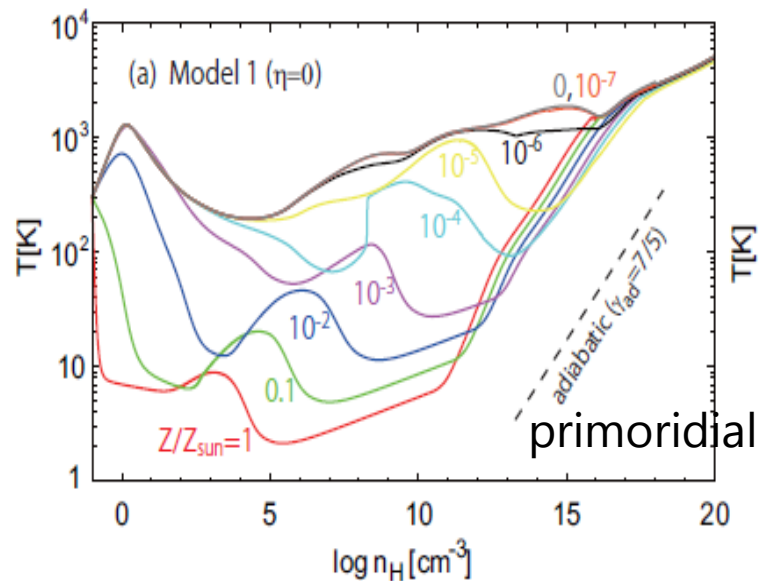
$$\zeta = \zeta_{\text{CR}} + \zeta_{\text{RE,short}} + \zeta_{\text{RE,long}}.$$

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{\text{CR}} &= \eta \zeta_{\text{CR},0} \exp\left(-\frac{\rho R_J}{\lambda}\right) \\ \zeta_{\text{RE,short}} &= 7.6 \times 10^{-19} \text{s}^{-1} \eta. \end{aligned} \right\} \text{SNなどSF activityに比例すると思う。}\eta\text{でパラメトライズ。}$$

$\zeta_{\text{RE,long}} = 1.4 \times 10^{-22} \text{s}^{-1} Z/Z_{\odot}$  長寿命なのでパイルアップすると思ってZに比例とする。

- Primordial :  $\eta=0$
- First Galaxies :  $\eta=0.01$  (Stacy+2007, Nakauchi+2014など)
- ISM :  $\eta=1$  (Umebayashi+2009)
- Starburst Galaxies:  $\eta=10$  (Lacki+2014)

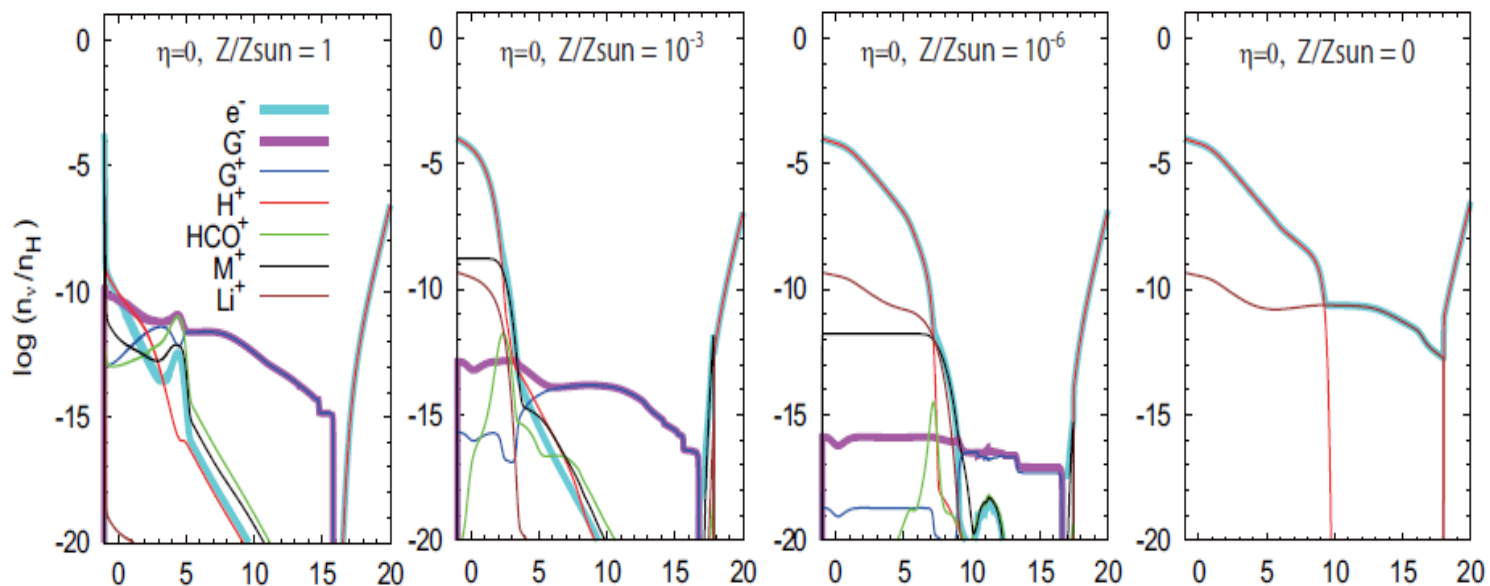
# 熱進化



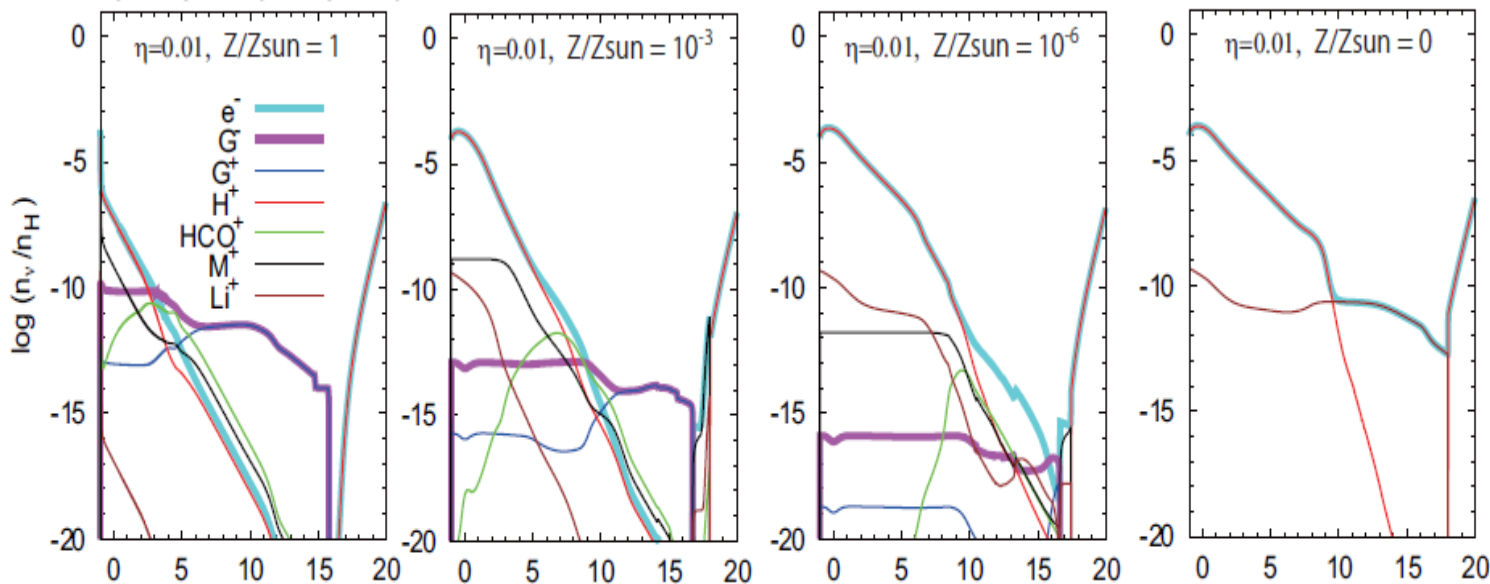


# 電荷(1/2)

Primordial

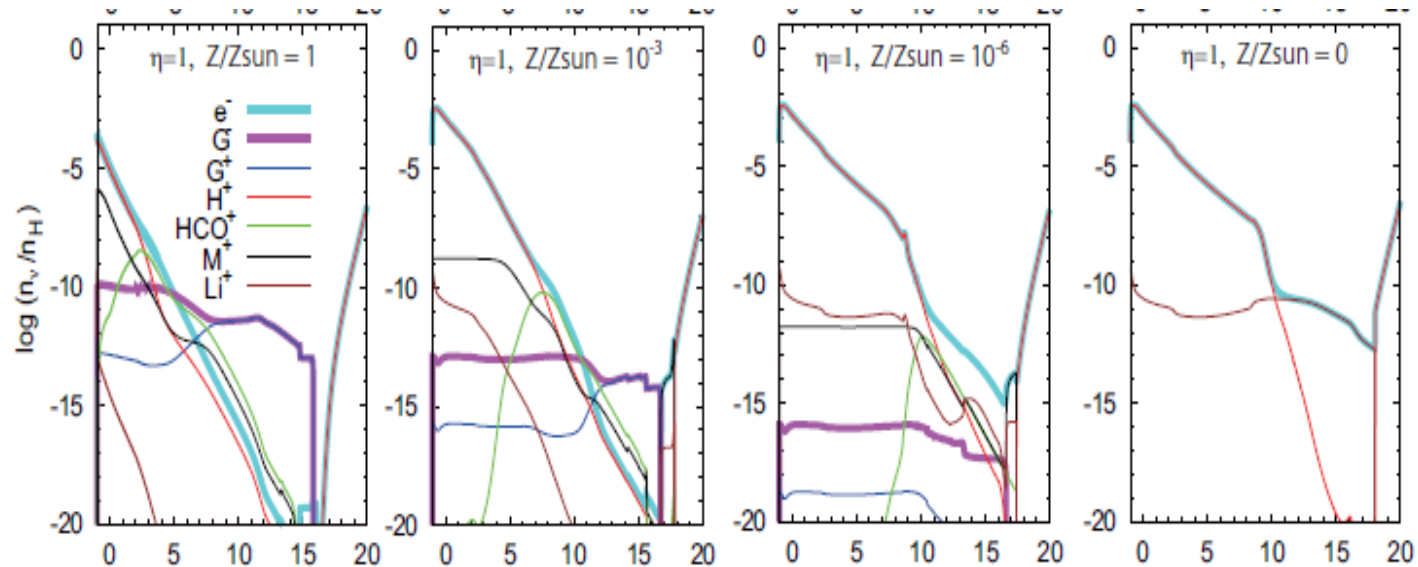


First Gals

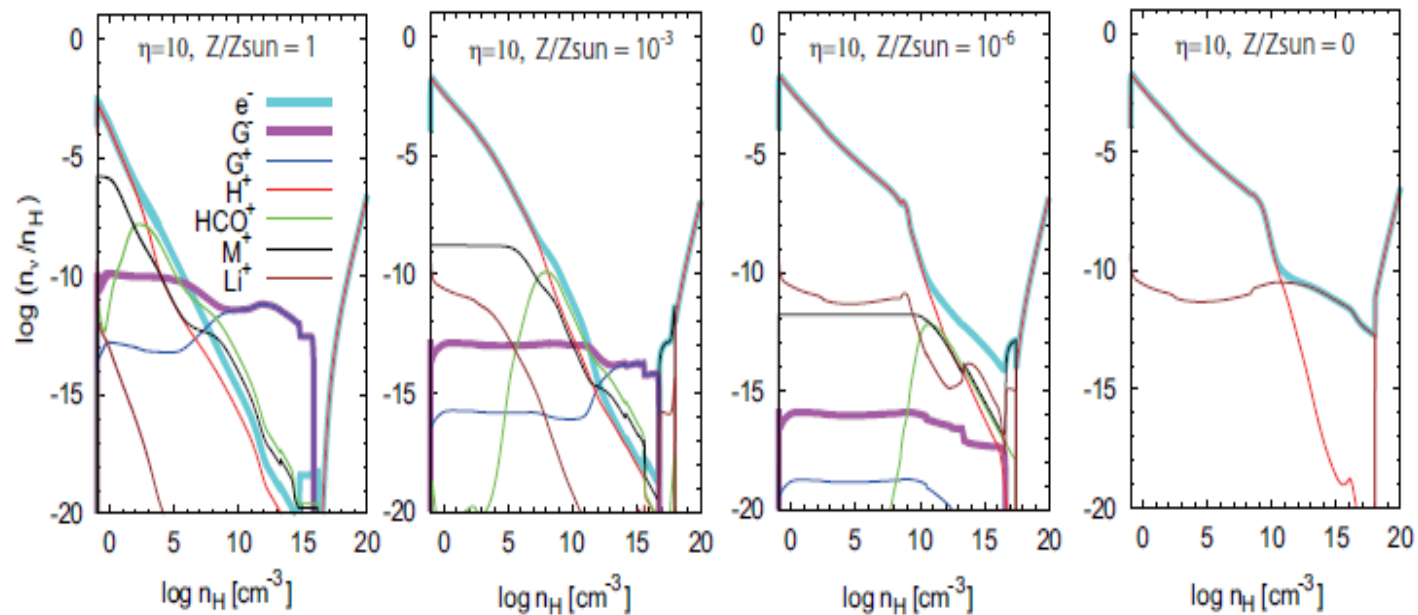


# 電荷(2/2)

ISM



Starburst Gals.



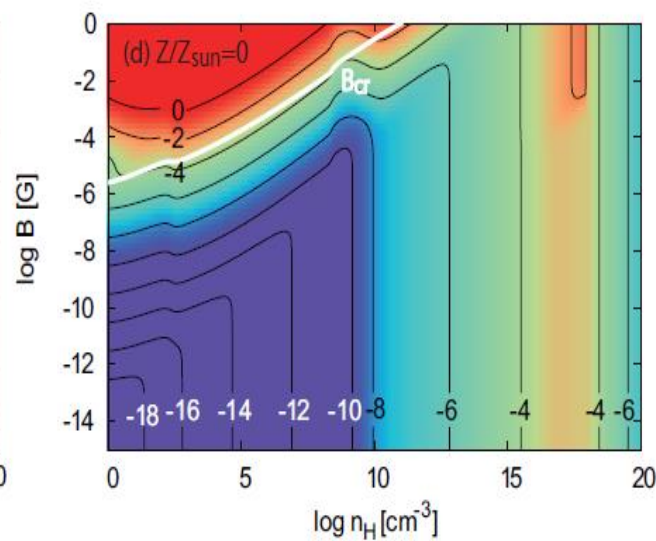
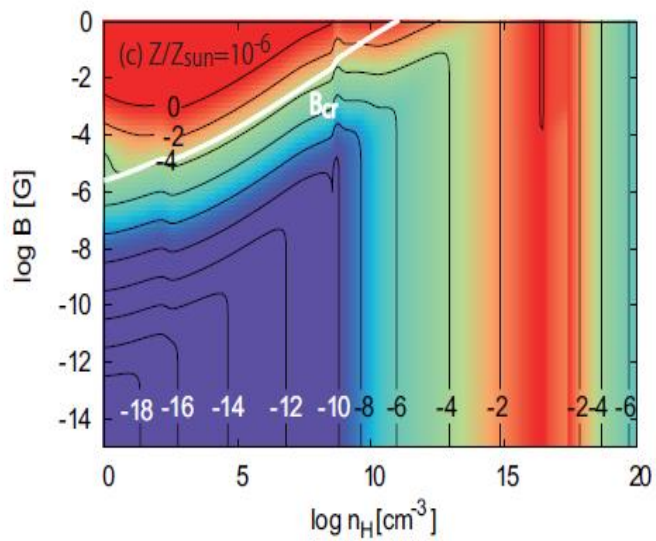
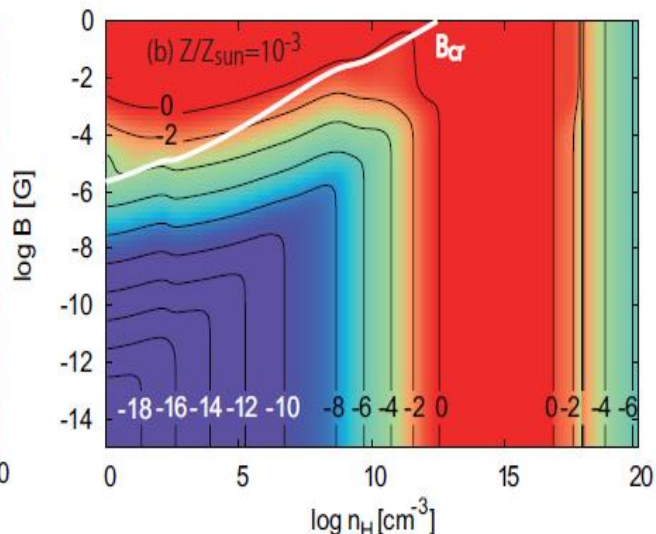
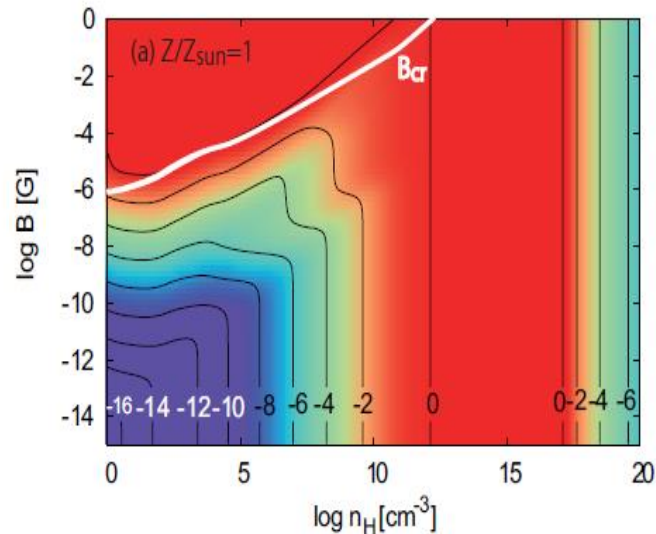
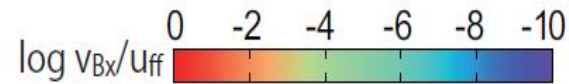
# ISM環境：Jeans Scale での散逸

$\frac{v_{Bx}}{u_{ff}}$  のコントラスト

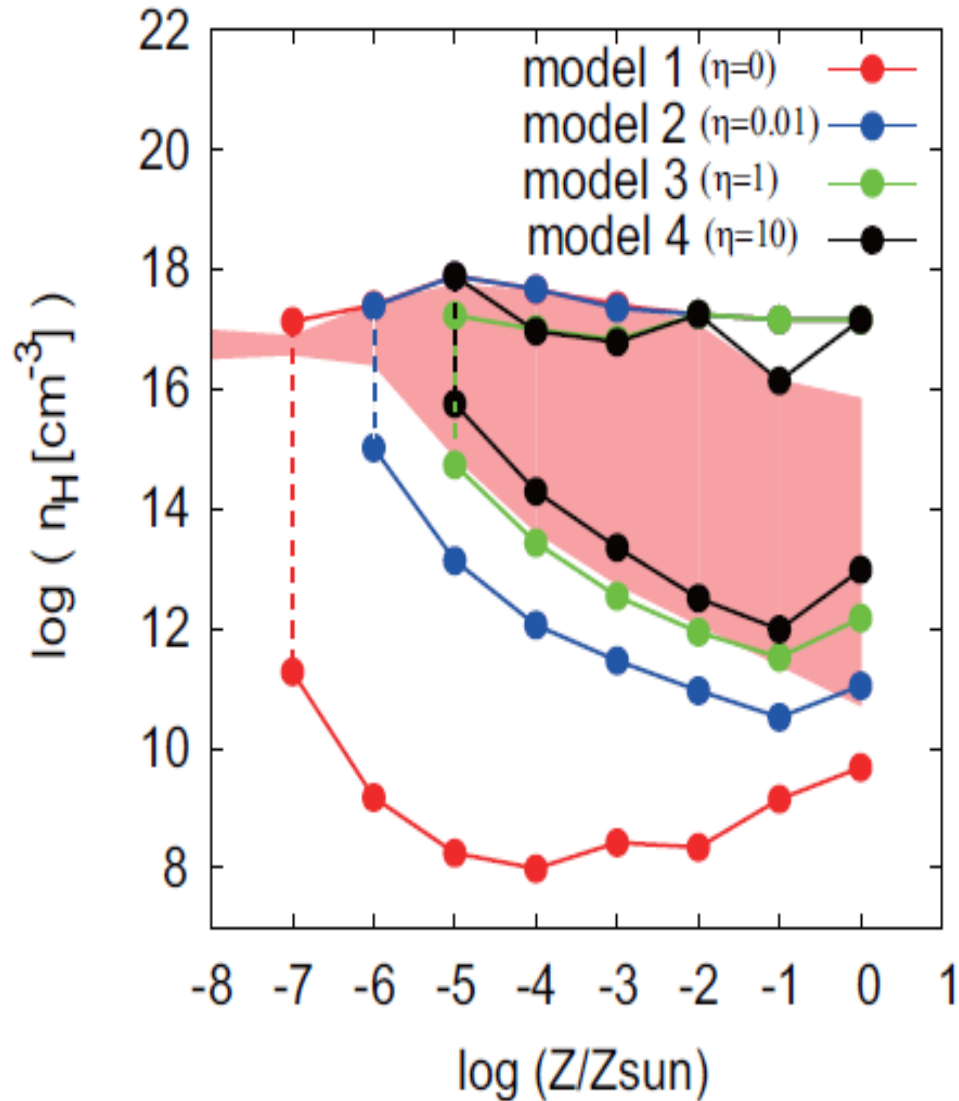
$$v_{Bx} \sim \begin{cases} \frac{c^2}{4\pi\sigma_c R} & (\text{Ohm}) \\ \frac{\tau_i B^2}{\rho_i 4\pi R} & (\text{ambipolar}) \end{cases}$$

基本的に  
Zが大きいほど散逸領域  
が広がる

Model 3 ( $\eta=1$ )



# 散逸領域とFirst Core



- ISMのモデルでは、 $Z > 0.1$ でのみFCの方が広い領域を占める。→  $Z > 0.1$  ではFCで磁場がねじられるが $Z < 0.1$ ではそうではない。
- より原始環境の場合にはFCよりも散逸領域が大きい。→FCで磁場がねじられない。



$Z=0.01-0.1$  を境として定性的に異なる振る舞いが期待される

## Discussion1 : 金属量によるMHD効果の違い

非理想磁気流体計算(e.g. Machida+)によってFCで磁場とガスがカップルしている領域で磁気流体的な効果 (Outflow駆動・Magnetic breaking) がおきることが知られている。

今回の計算からは、 $Z=0.01 - 0.1Z_{\text{sun}}$ 付近に分かれ道があり、低金属量ではFCであまり磁場とガスがカップルしていないことを示唆している。

低金属量でOutflowなし、Mag.Breakingなし

$M^*$  ↗

$M^*$  ↘

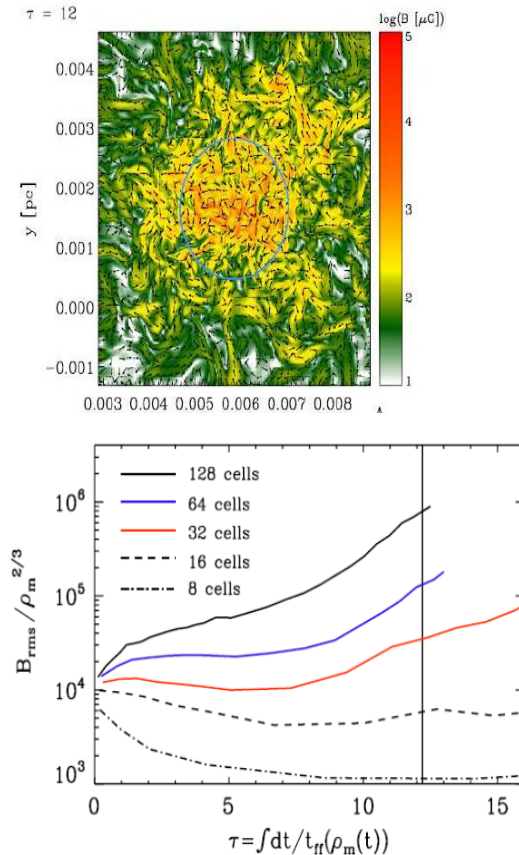
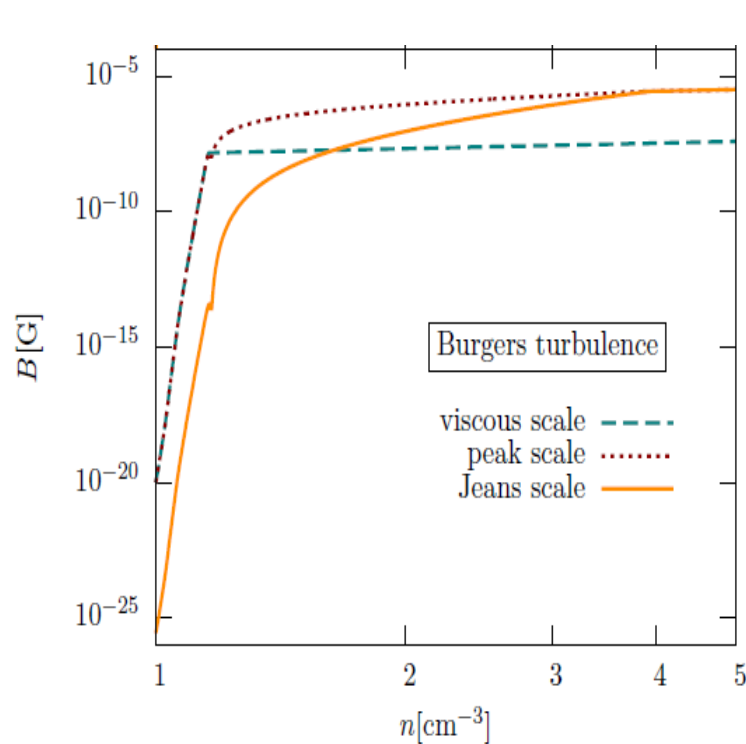
# Discussion2: Small Scale Dynamo

Primordial Mini-halo (は実は乱流的 Heidelberg 一派

→ 乱流場のエネルギーが磁場のエネルギーへ

“ Kazantsev Theory ”

Small Scale では乱流の eddy time が短いのであつという間に磁場が増幅する。



本当なら  $Z=0$  の星形成に甚大な影響が予想される。

# PrimordialでViscus Scaleで磁場との結合を見る。

Consider a scale  $\alpha R_J$

$$u_{\text{turb}} \propto R^\vartheta \rightarrow u_{\text{turb}} = \alpha^\vartheta u_{\text{ff}}$$

$$v_{Bx} \propto \alpha^{-1}$$

$$\left. \frac{v_{Bx}}{u_{\text{turb}}} \right|_{\alpha R_J} = \frac{v_{Bx}(R_J)}{u_{\text{ff}}} \alpha^{-(\vartheta+1)}$$

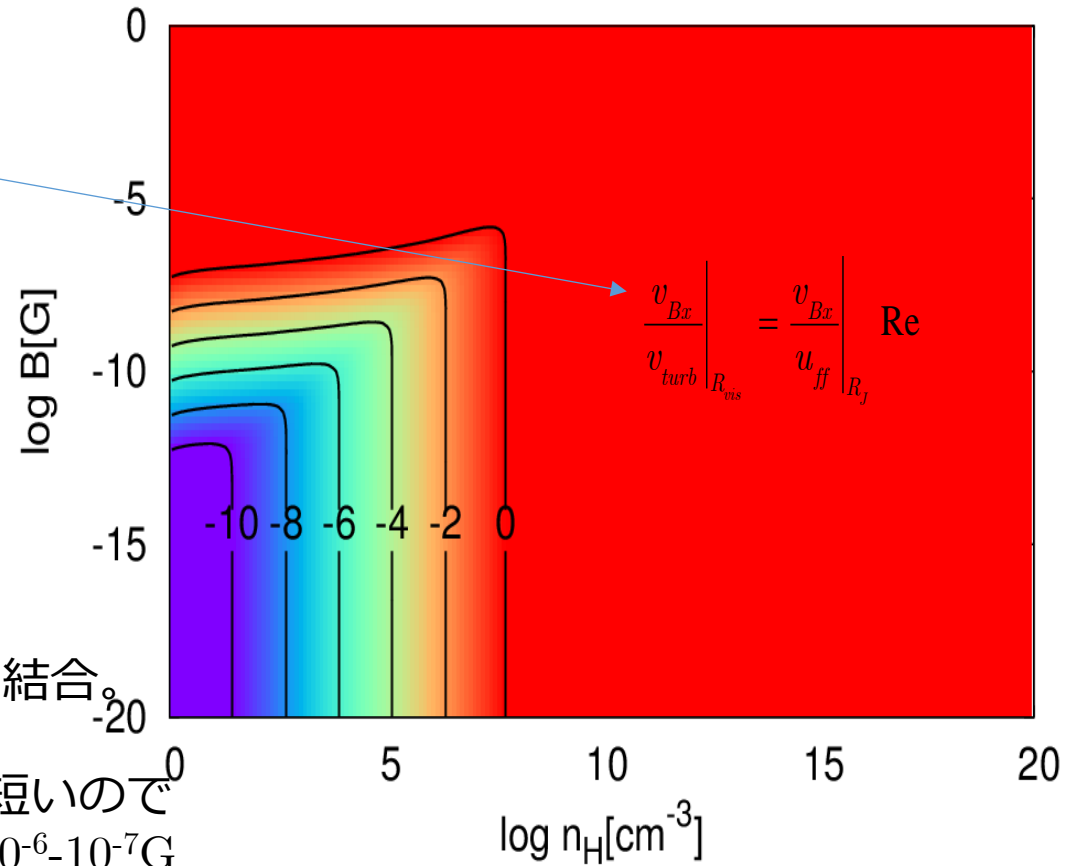
$$u_{\text{turb}} R_{\text{vis}} = \nu_{\text{vis}}$$

$$\text{Re} \equiv u_{\text{ff}} R_J / \nu_{\text{vis}}$$

$$R_{\text{vis}} \simeq R_J \text{Re}^{-1/(\vartheta+1)}, \text{ i.e., } \alpha = \text{Re}^{-1/(\vartheta+1)}$$

$$\text{Re} \sim 10^6 (n_{\text{H}} / 1 \text{cm}^{-3})^{1/2}$$

$n_{\text{H}} < 10^8 \text{cm}^{-3}$  かつ  $B < 10^{-6} - 10^{-7} \text{G}$  で結合。



Viscus Scaleでeddy time は非常に短いので  
低密度で十分乱流的であれば磁場は $10^{-6} - 10^{-7} \text{G}$   
程度まで成長する。

十分乱流的か？ Inverse Cascade ? Still open questions !

# まとめ

- $Z=0 - 1Z_{\text{sun}}$ の範囲で1zone model により、磁場とガスの結合の様子を調べた。
- $Z > 0.01-0.1$ ではFC段階でしばらく磁場がガスと結合しているが、 $Z < 0.01-0.1$ では最初からdecoupleしている。
- 電離モデルによるが $10^{-6} - 10^{-8} Z_{\text{sun}}$ 以下では散逸領域は現れない。
- いずれも $n_{\text{H}} > 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 程度で結合は回復される。
- Low metal のFCではNo outflow, No mag. breaking.
- Primordial 環境で Small Scale dynamoをサポートするという示唆
- ここから先はResistive MHDへ。