

星形成における乱流と磁場の 役割について

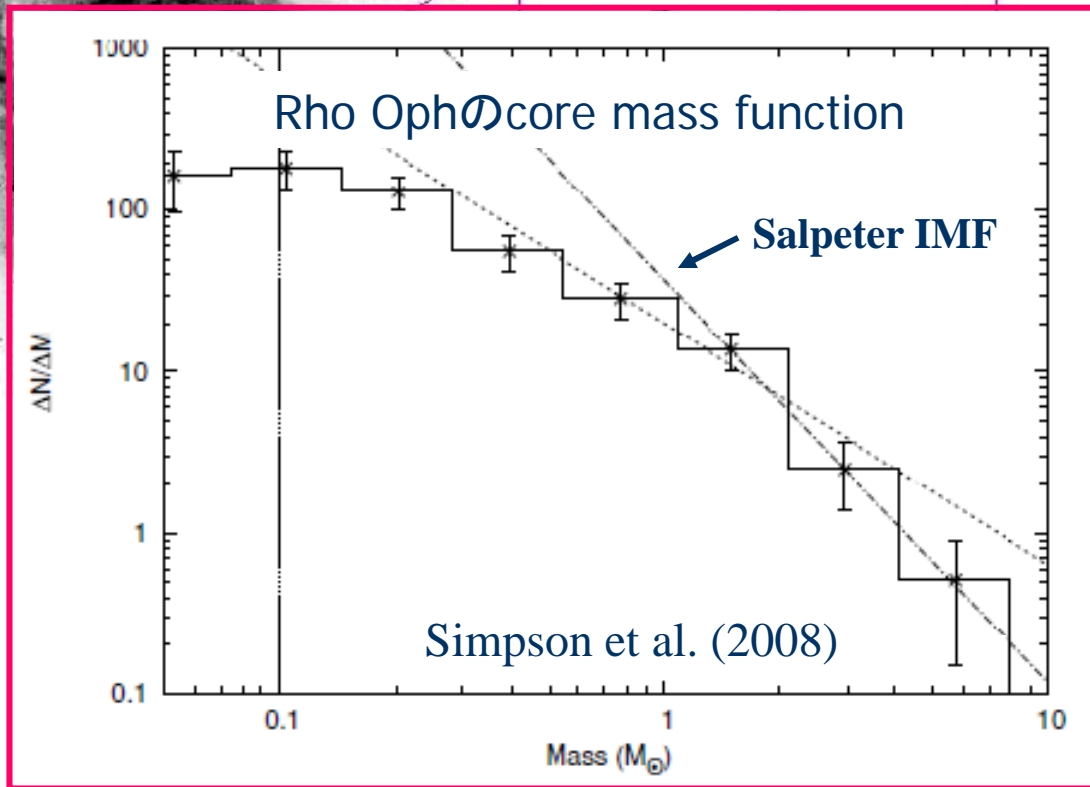
中村文隆(新潟大学)

星の誕生過程

我々の銀河系

星間分子雲

分子雲コア



tenths of a pc

原始星、原始惑星系円盤、ジェット

星の誕生

CMFはstellar IMFと相似

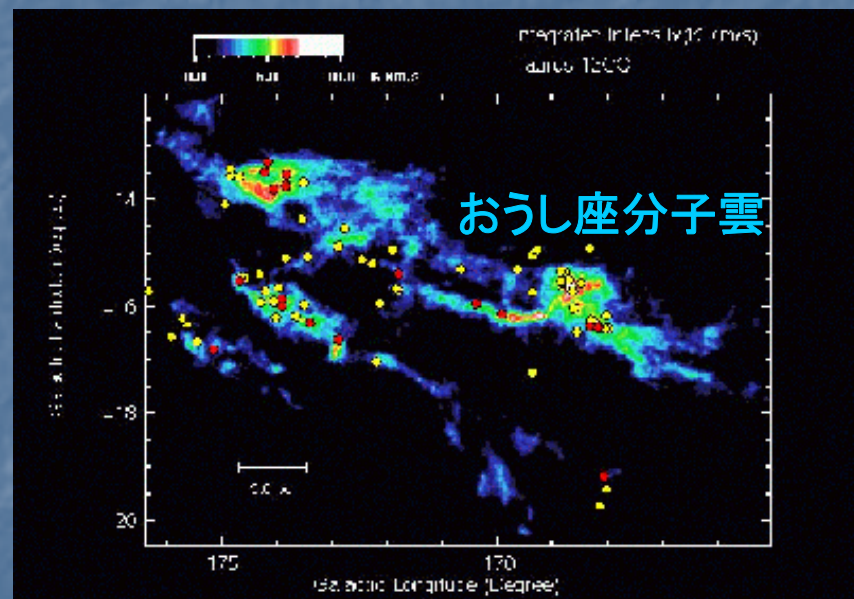
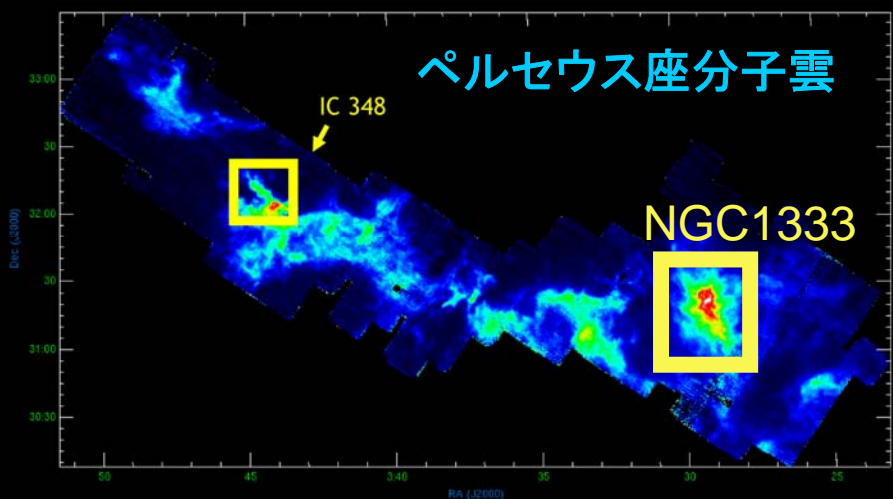
我々の銀河系内の星形成

星団形成領域 (Clustered Star Formation) :

オリオン分子雲, NGC1333
大小質量星が誕生
高い星形成効率 (SFE ~ 10%)

小質量星形成領域 (Distributed Star Formation) :

おうし座分子雲、小質量星のみ
形成される
低い星形成効率 (SFE ~ 1%)

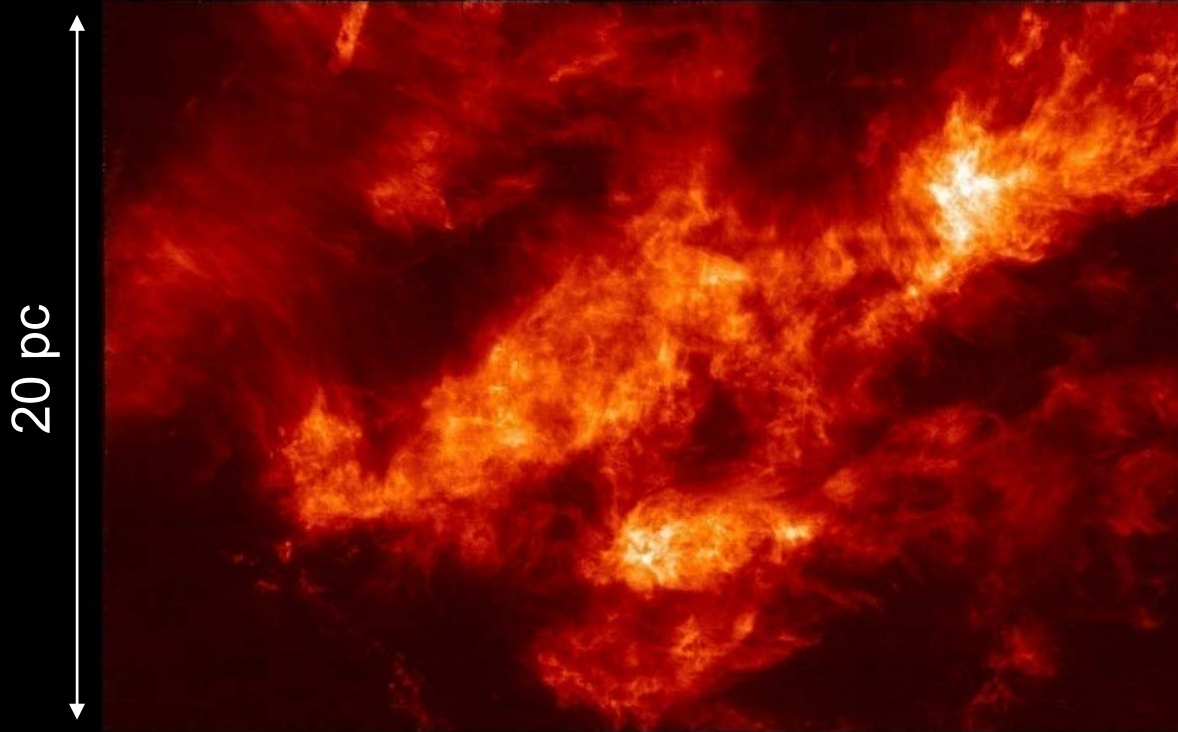


Magnetically supercritical、乱流 > 磁場
原始星アウトフローによる乱流生成

Magnetically subcritical、乱流 < 磁場
乱流圧縮による磁気拡散の加速 → 星形成の加速

おうし座分子雲

^{12}CO map of Taurus clouds



Goldsmith et al. 2008

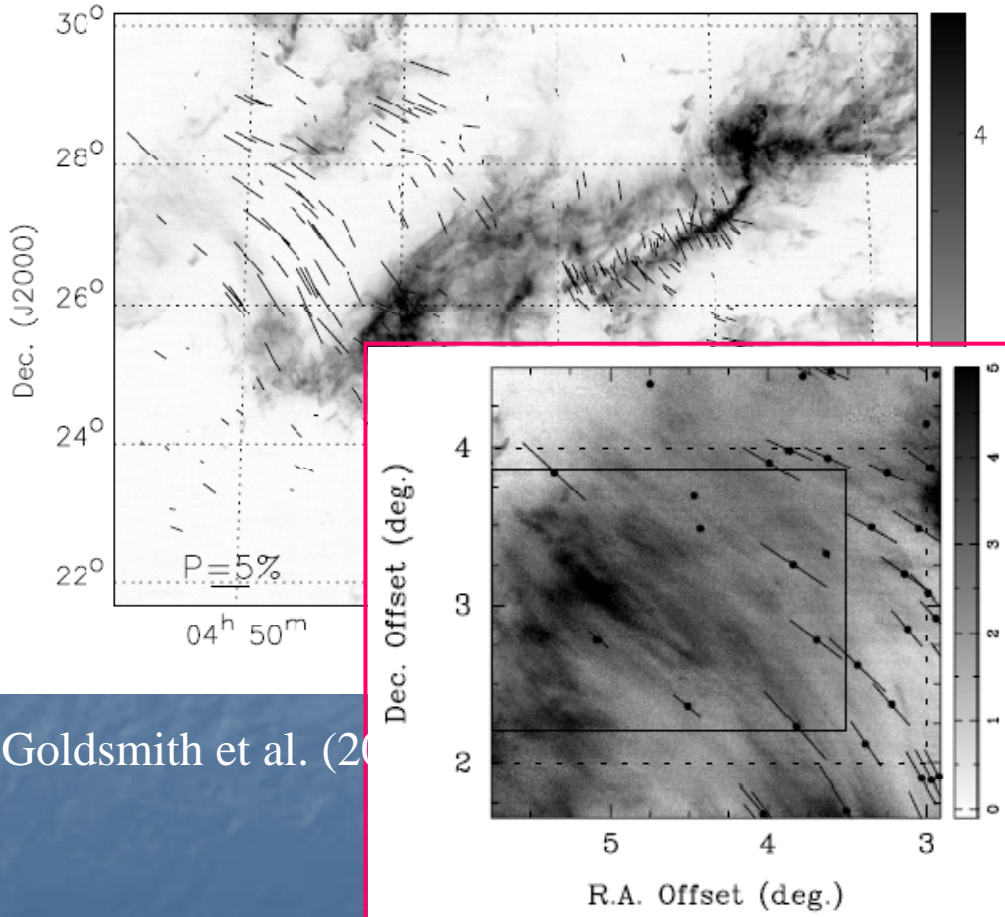
■ Inefficient star formation

cloud mass $\sim 2.4 \times 10^4 M_{\odot}$ $N_{\text{star}} \sim 300$ ($M_{\text{star}} \sim 0.6 M_{\odot}$)

SFE = stellar mass / total mass $\sim 0.8\%$

分子雲におけるMHD乱流の観測例

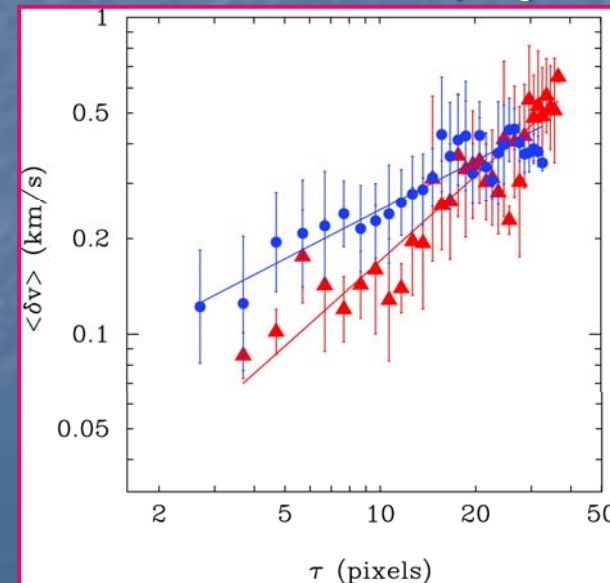
おうし座分子雲の ^{13}CO 積分強度図と磁場分布



Goldsmith et al. (2008)

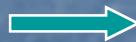
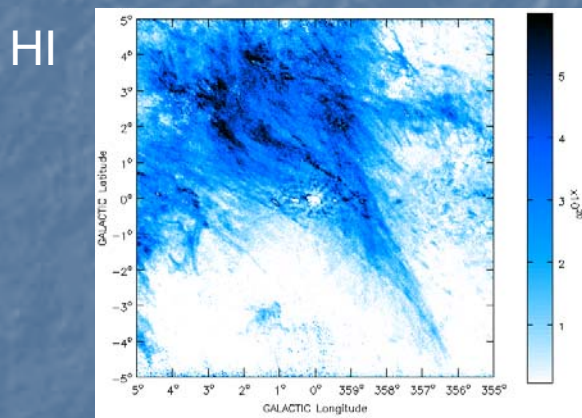
Heyer et al. (2008)

- 大局的に揃った磁場
- Cloud envelopeで磁場に沿ったフィラメント構造
- MHD乱流のカスケード
- (Goldreich & Sridhar 1995)
- 非等方な速度場 (Heyer et al. 2008)

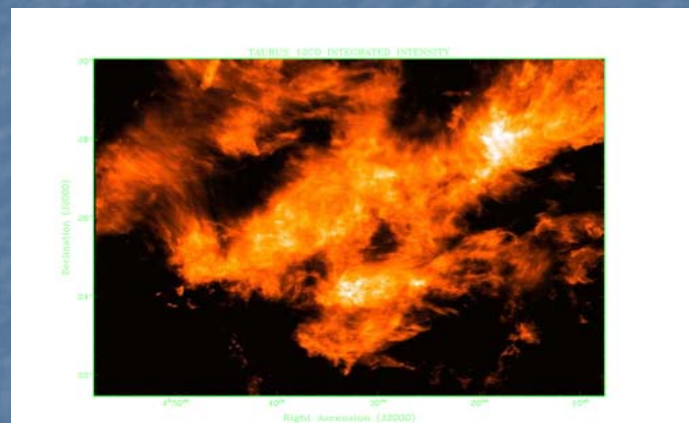


小質量星形成領域の星形成モデル:おうし座の場合

- HIガス (Magnetically subcritical) の凝縮により小質量の分子雲が形成
 $\Gamma_{cr} \equiv \Phi / M_{cr} = 2\pi G^{1/2}$, $\Phi = \text{magnetic flux}$ ($M < M_{cr}$) Magnetically subcritical
- 形成された分子雲はMagnetically subcritical or nearly critical



H₂



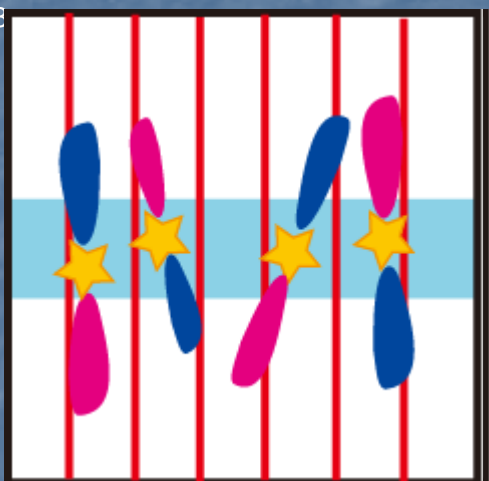
- If magnetically subcritical, low star formation efficiency (SFE) expected.
(Shu et al. 1987, Mouschovias & Ciolek 1999)
- 分子雲コアは乱流圧縮領域で磁場が散逸して形成される
磁気拡散のタイムスケール $\sim 10-100 t_{ff}$ (10-100 Myr @ 100cm⁻³)
- **Turbulence-accelerated, magnetically regulated star formation**

(Li & Nakamura 2004, Nakamura & Li 2005, Kudoh & Basu 2007, Nakamura & Li 2008)

Magnetically Subcritical case: 計算モデル

- 3次元MHDシミュレーション、周期境界
- 一様密度 250 cm^{-3} , 等温ガス ($T=10\text{K}$)
- The box size = $2 L_J (= 2.44 \text{ pc})$, The total gas mass = $253M_{\odot}$
- 一様磁場 ($=16\mu\text{G}$)
- Magnetic flux-to-mass ratio $\Gamma = 1.2$ (magnetically subcritical)
- Stirred at $t=0$ by supersonic turbulence of rms Mach 3

$n=250 \text{ cm}^{-3}$
 $M= 253M_{\odot}$
 $B=16\mu\text{G}$
 $T=10\text{K}$



$2.44 \text{ pc} = 12.6 L_s$

Central density of the gas sheet

$$\rho_s = \frac{\pi G \Sigma_0^2}{2 c_s^2} = \frac{\pi^2 n_J^2}{2} \rho_0 = 4.9 \times 10^3 \left(\frac{n_J}{2}\right)^2 \left(\frac{n_{H_2,0}}{250 \text{ cm}^{-3}}\right) \text{ cm}^{-3}$$

Jeans length of the gas sheet

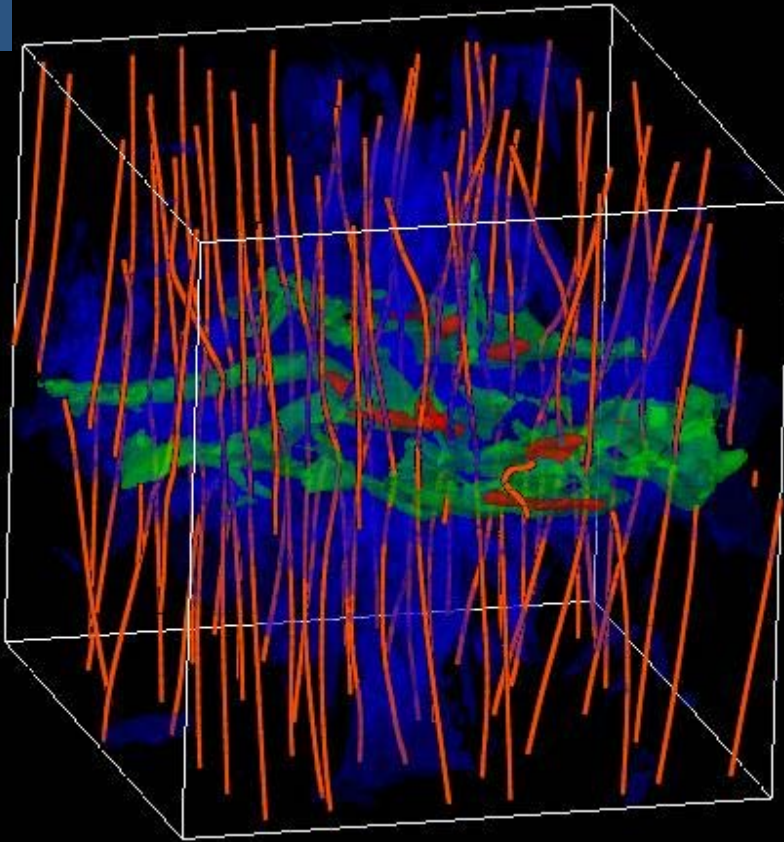
$$L_s \equiv \frac{c_s^2}{G \Sigma_0} = \frac{1}{\pi n_J} L_J = 0.195 \left(\frac{2}{n_J}\right) \left(\frac{T}{10\text{K}}\right)^{1/2} \left(\frac{n_{H_2,0}}{250 \text{ cm}^{-3}}\right)^{-1/2} \text{ pc}$$

Gravitational collapse time of the gas sheet

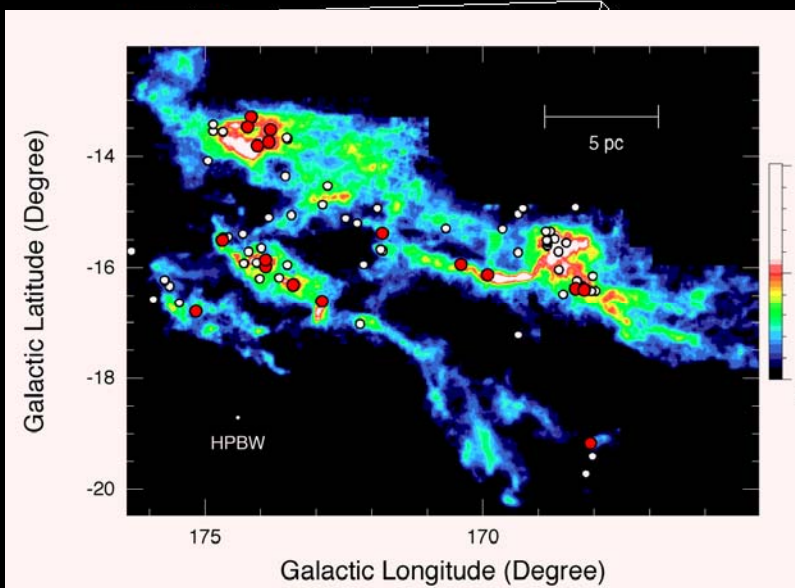
$$t_s \equiv \frac{L_s}{c_s} = \frac{c_s}{G \Sigma_0} = \frac{1}{\pi n_J} t_g = 1.01 \times 10^6 \left(\frac{2}{n_J}\right) \left(\frac{n_{H_2,0}}{250 \text{ cm}^{-3}}\right)^{-1/2} \text{ (years)}$$

計算結果

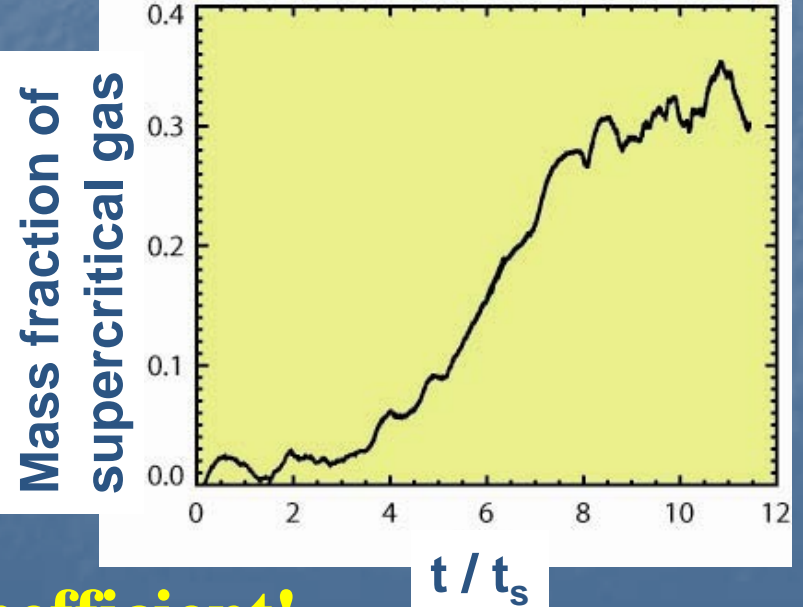
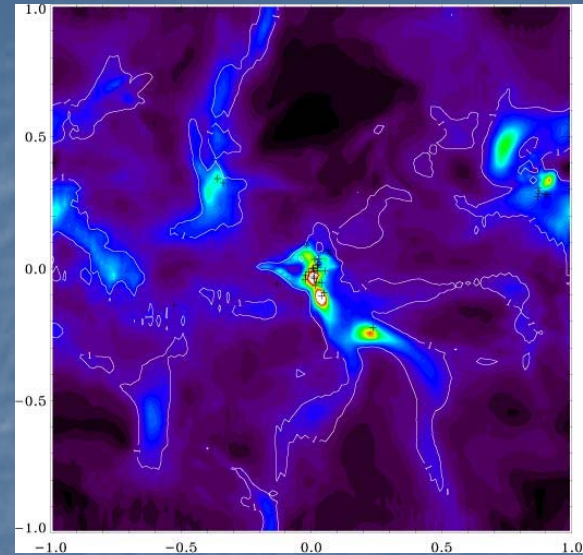
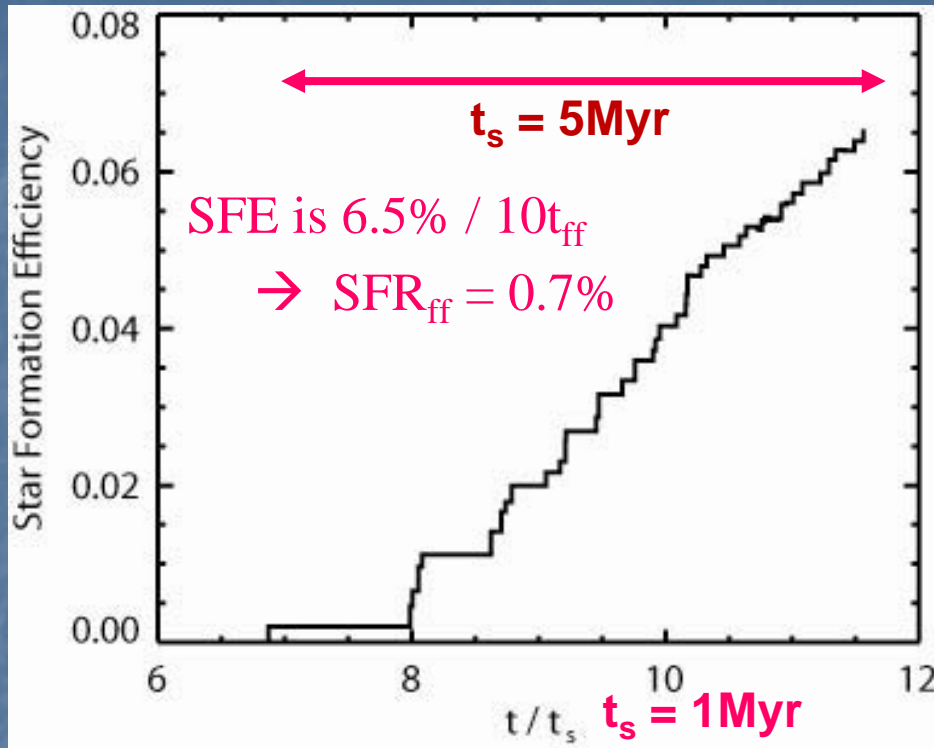
$t = 11 t_s$



without AD
Ideal MHD ($t = 11 t_s$)



星形成効率(Star Formation Efficiency)の時間進化



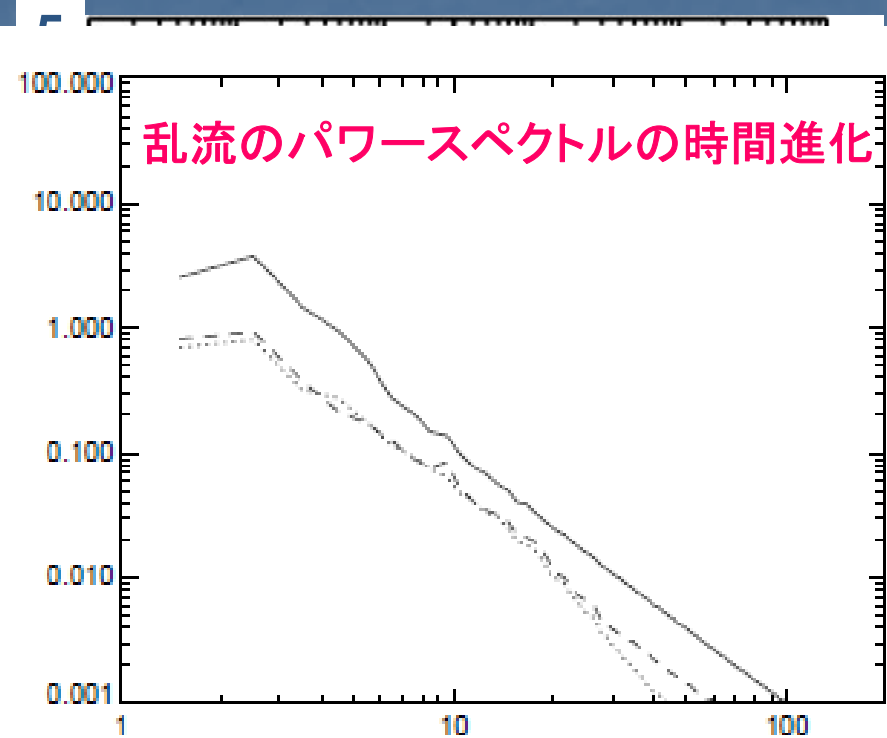
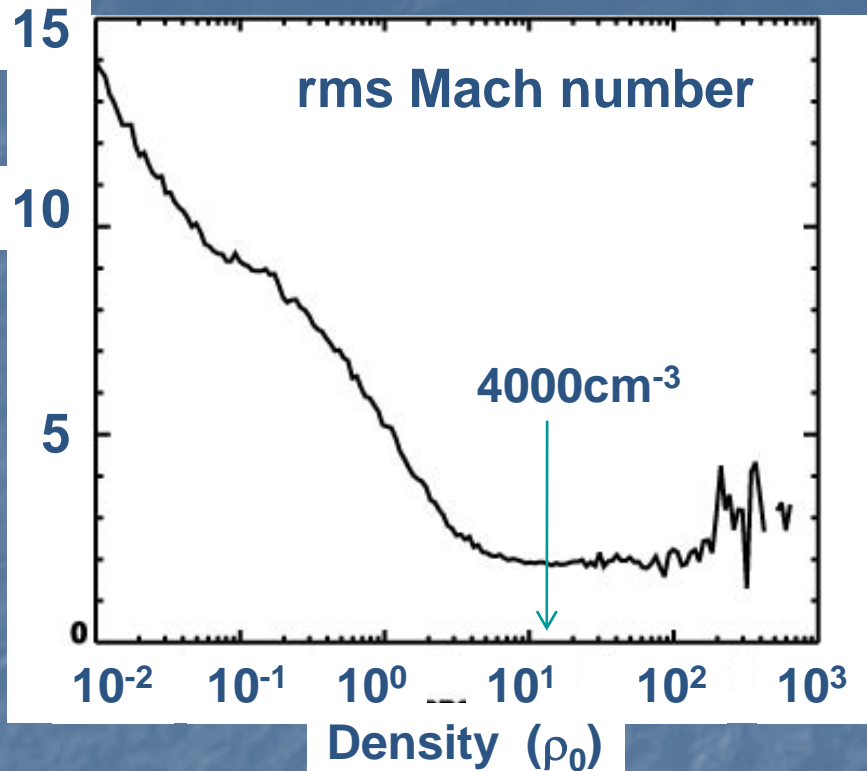
Ambipolar diffusionの典型的タイムスケール

$$t_{\text{AD}} = 10 - 100 t_{\text{ff}} \approx 10 - 100 \text{ Myr}$$

乱流圧縮によってAmbipolar diffusionが加速

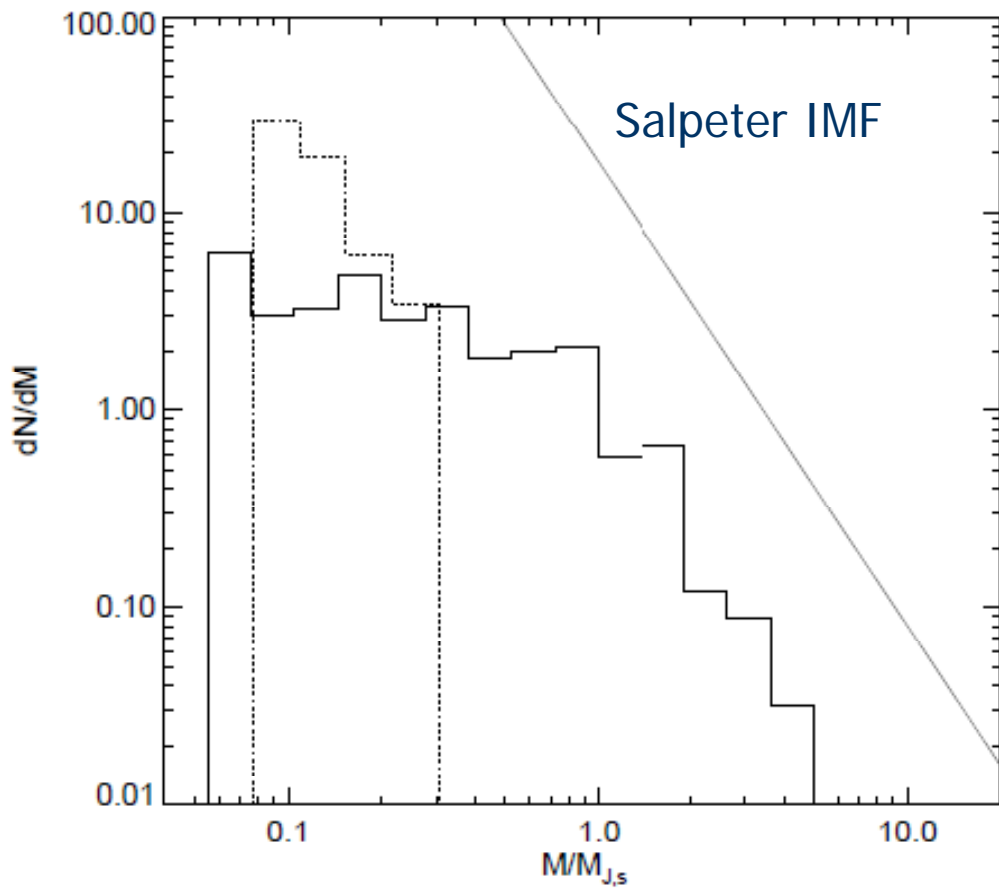
◎ Star formation is slow and inefficient!

超音速乱流の散逸

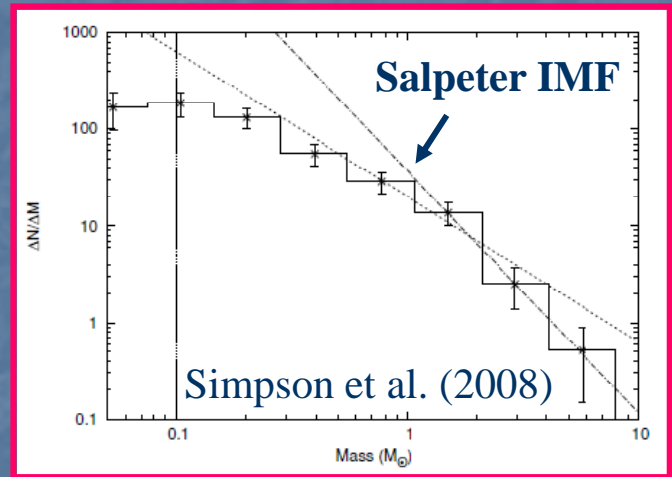


- In dense gas, $M = 2.3$ @ $n > 4000\text{cm}^{-3}$ (C¹⁸O gas)
Taurus $M=2.4$ (Onishi et al. 1996)
- Without external energy input, moderately supersonic turbulence can maintain for a relatively long time.
- Additional turbulent motions are driven by a combination of outflows and ambipolar diffusion –induced gravitational acceleration

分子雲コア質量関数



Rho Ophのcore mass function



CMFはstellar IMFと相似

まとめ:分子雲コアの形成過程

- 乱流状態にある磁気分子雲の3次元MHDシミュレーション
- 磁場と乱流の関係によって星形成のモードが決まる
- Magnetically subcritical case (磁場が相対的に強い)
乱流圧縮によるambipolar diffusionの加速
→ 星形成の加速
乱流はglobalなcollapseを抑制するが、localには圧縮によって星形成を促進
- **Turbulence-accelerated, magnetically regulated star formation (Nakamura & Li 2005, Kudoh & Basu 2007)**
- Magnetically Supercritical case (乱流が相対的に強い)
より活発に星形成が起こる → 星団形成
原始星アウトフローによる乱流生成
protostellar turbulence (Nakamura & Li 2007)

今後の課題

分子雲コア形成時の外圧の効果(特に星団形成の場合)
観測される分子雲コアとの性質の比較 → ALMA