

# 分子雲コアの形成について

小山洋(神戸大)

# 分子雲のモデル

- 普遍的な性質
  - Non thermal な速度分散
  - “乱流”
- MHD乱流のシミュレーション
  - Crossing time以下で散逸
    - Ex) 10K 3pc : 1Myr
    - Stone, Ostriker, & Gammie 1998, Mac Low et al. 1998, Mac Low 1999
  - 外からエネルギーを注入することで乱流を維持
    - 乱流のエネルギー源
      - SNe, Stellar wind
      - Vazquez-Semadeni et al. (2000)

# 分子雲コアの形成

- 乱流中での星形成

- 乱流は分子雲全体の重力収縮を妨げるが、小さなスケールのcollapseは妨げない

- (注) energy sourceはLarge scale

- Local collapseによるコアの形成

- » Klessen, Heitsch, & Mac Low (2000)

- » Heitsch, Mac Low, & Klessen (2001)

- » Mac Low, & Klessen (2003)

- » Li, Norman, Mac Low, & Heitsch (2003)

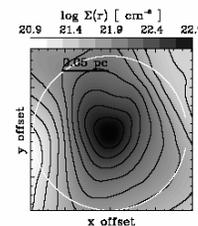
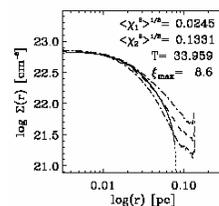
- Ballesteros-Paredes, Klessen, & vazquez-semadeni (2003)

- Bonner-Ebert 的な密度構造は偶々出来る

- 速度分散は0.5-1km/s  $> c_s$

- (注) 観測はもっと静か

- e.g., Tafalla et al. (2004) 0.05km/s



# 乱流のエネルギー源

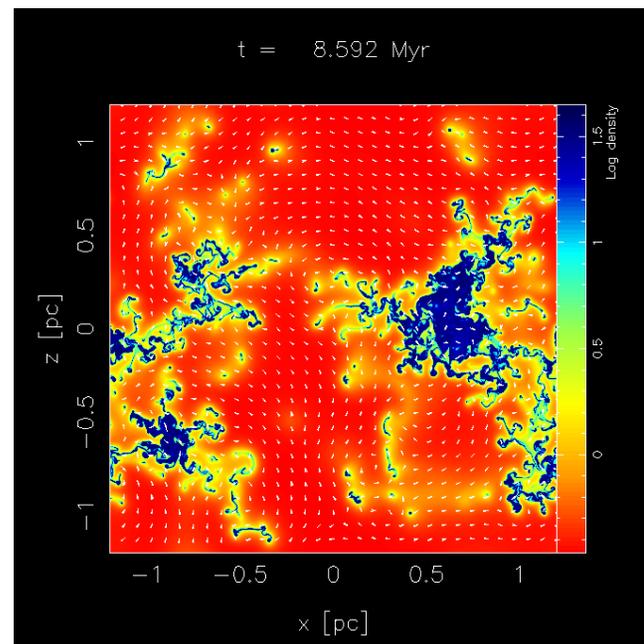
- Thermal Instability
  - Kritsuk & Norman (2002a,b)
    - Thermal instabilityで作られるTwo-phase (Warm & Cold) mediumはdynamical
    - Energy sourceはradiation
      - SNeなどの環境を考えなくても良い
    - (注) crossing time で *dissipate*
      - 熱伝導が無いので非線形成長が正しく追えていない。
      - Koyama & Inutsuka (2004)

# Two-phase ISMにおける熱伝導の役割

- 自発的な運動の生成

- 小さな雲 ←

- *熱伝導によって蒸発*
- LocalなPressure増大
- *周りの雲に質量降着*
- *降着表面の不安定性で分裂*



青: Cold phase 赤: Warm phase

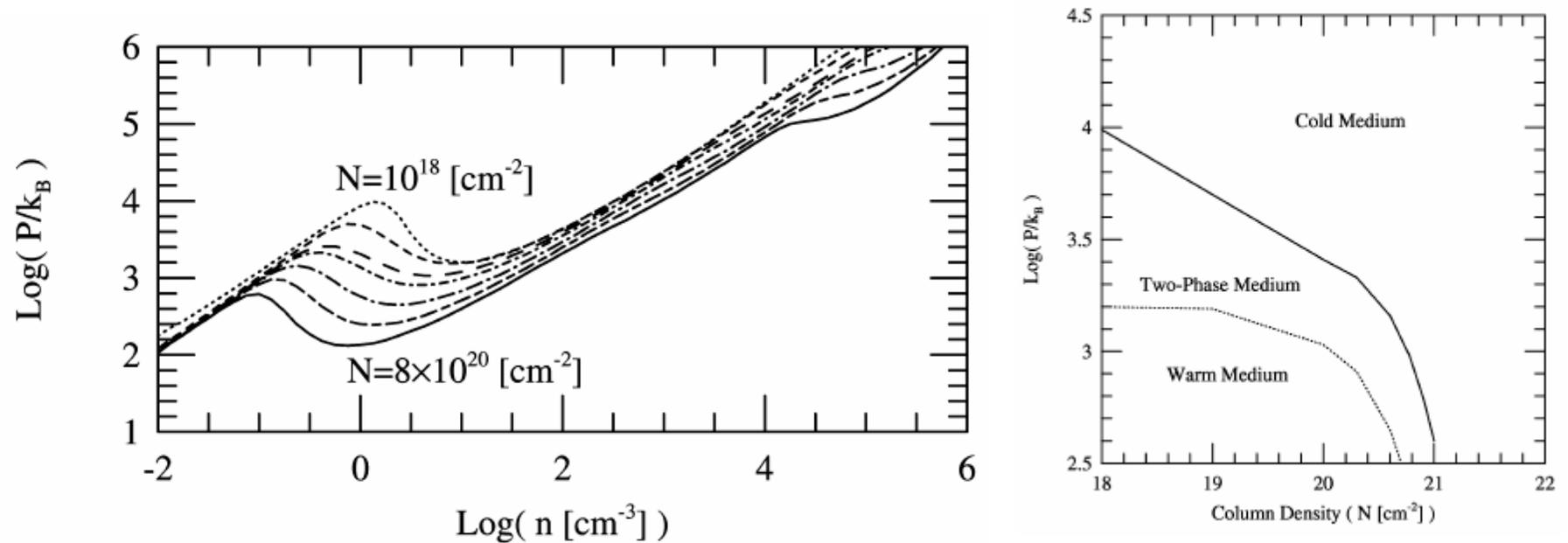
8.5 Myr

$v \sim 0.6 \text{ km/s} (=0.8c_s)$

- 運動(乱流)を持続する系

- 熱伝導によって実現

# Two-phaseの共存する条件

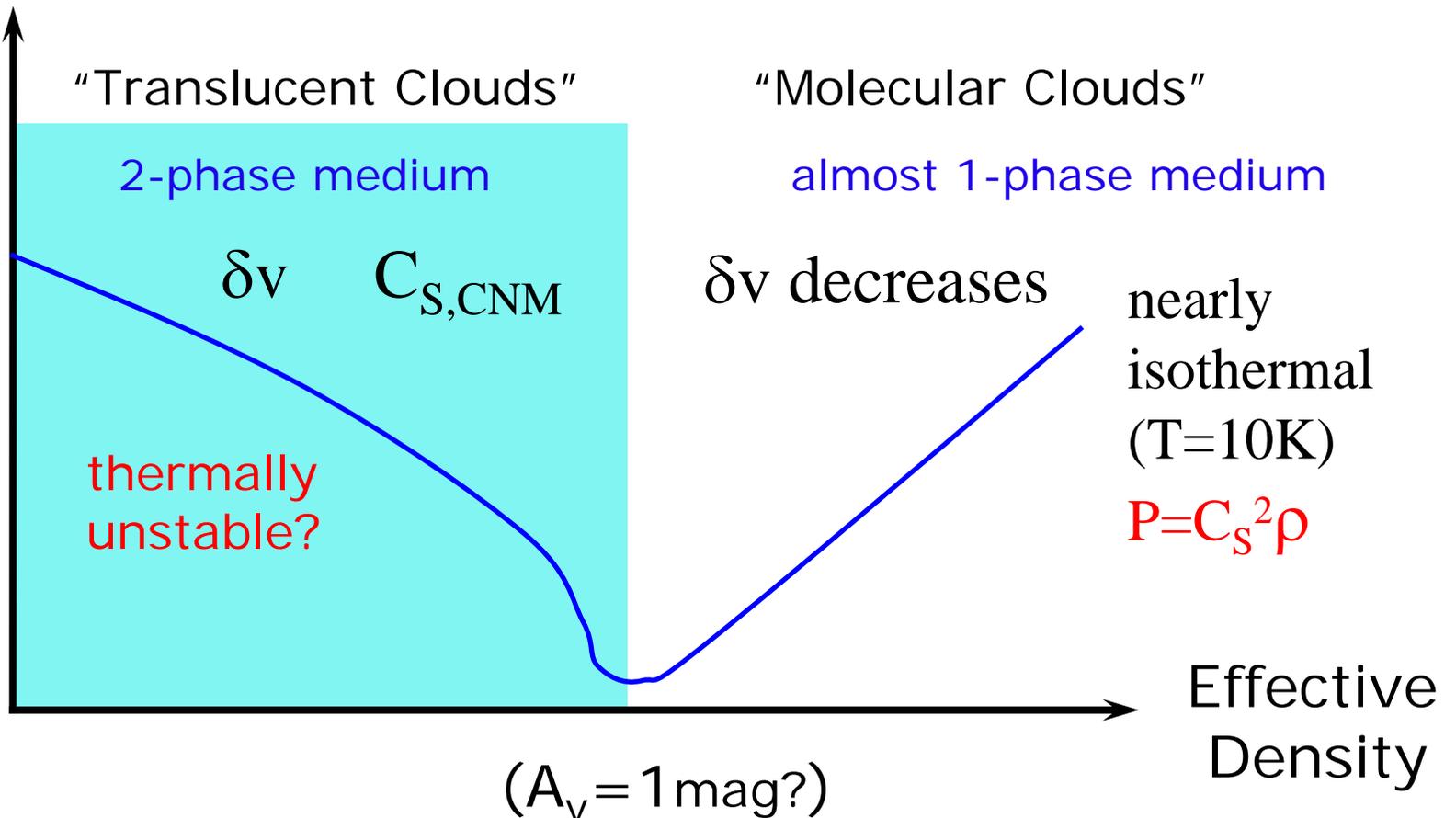


Inutsuka & Koyama (1999)

# Effective Equation of State

approximate

Effective Pressure



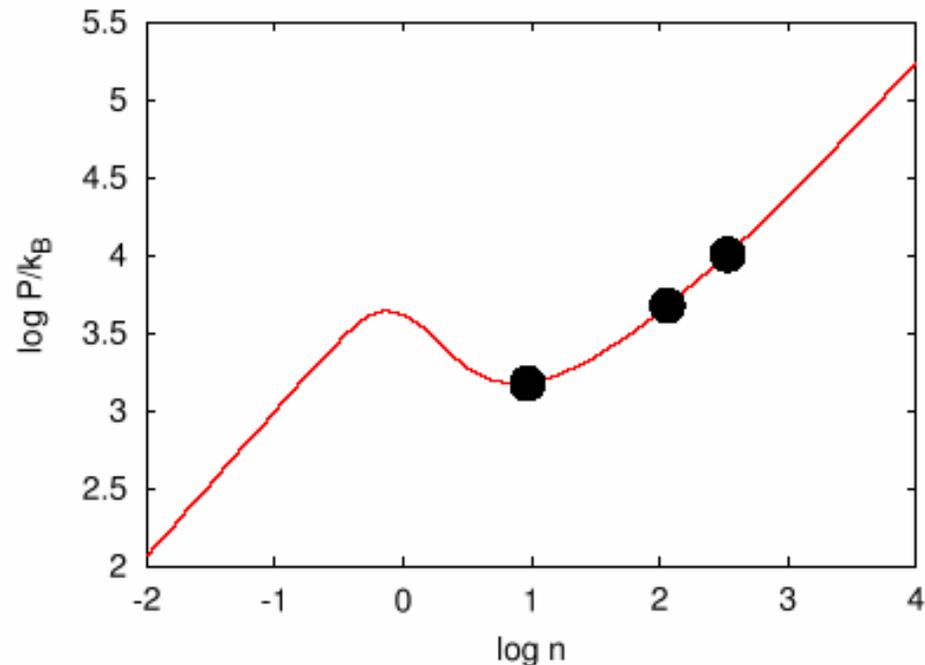
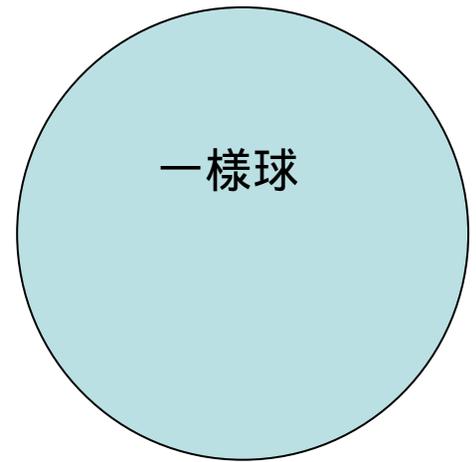
$A_v > 1$ で自己重力的 (Hartmann et al. 2001)

# 数値実験

- 1次元球対称ガス流体
- 自己重力
- 加熱: UV, 宇宙線, X線, H<sub>2</sub>形成
- 冷却: HI, CII, OI, SiII, FeII, CO, H<sub>2</sub>, dust
  - 低密度 Wolfire et al. (1995) 高密度 Glassgold & Langer (1978)
- 化学反応
  - HII HI H<sub>2</sub> (Tielens & Hollenbach 1985)
  - CII CO (Nelson & Langer 1997)
- 輻射場の遮蔽
  - Plane parallel近似

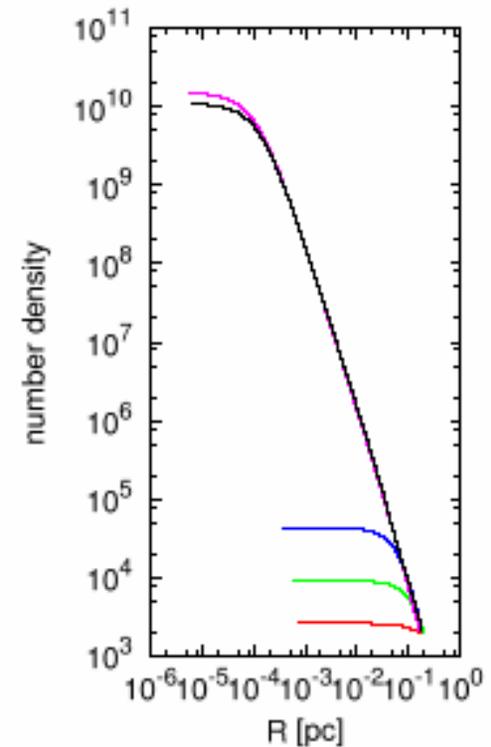
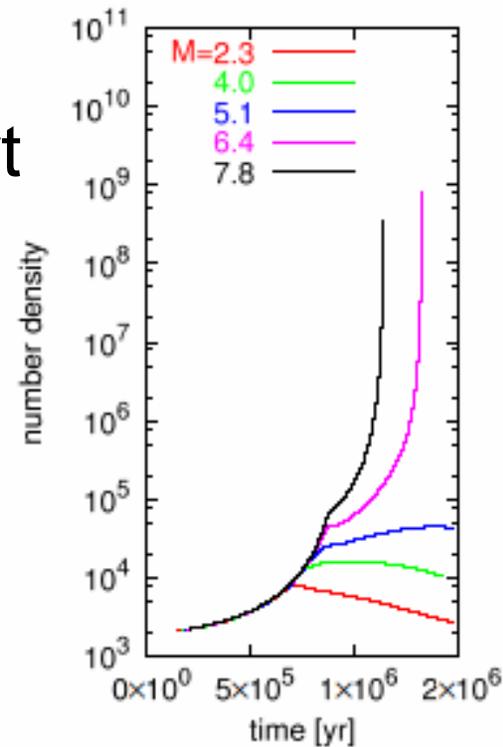
# Initial condition

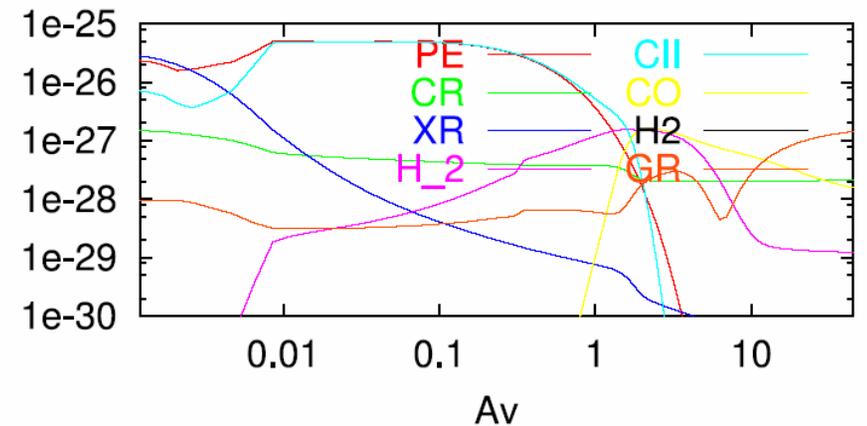
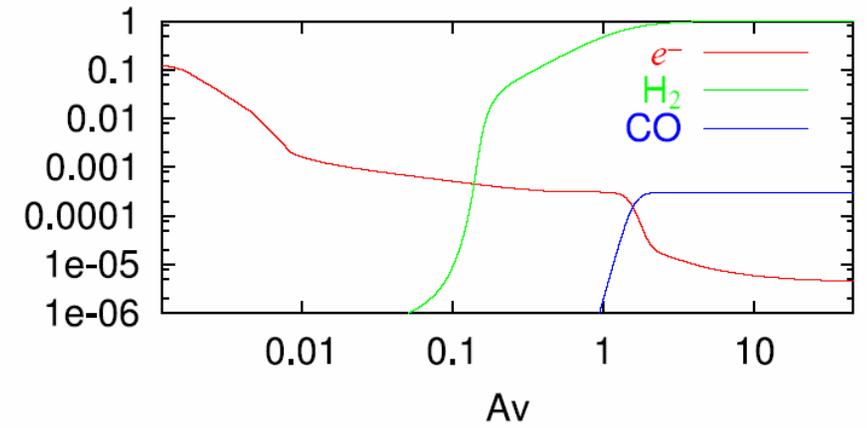
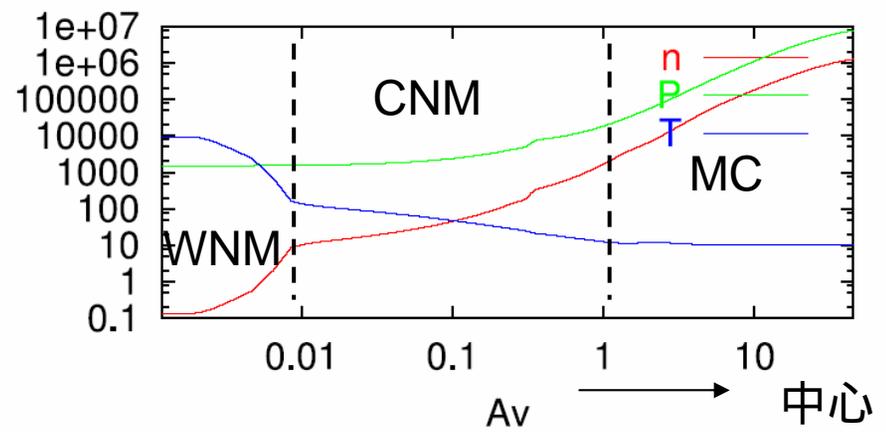
- $G_0=1.7$
- 100% HI
- $T_d=10\text{K}$
- $P_{\text{ext}}$  fix
  
- $t = 3 \times 10^7 \text{ yr}$ 
  - $t_{\text{ff}} = 10^7 n_1^{-1/2} \text{ yr}$



# TEST Problem

- Isothermal sphere
  - 10 K
  - $P_{\text{ext}}=1 \times 10^4$
- Critical Bonner-Ebert
  - $M_{\text{crit}}=5.2$





- model

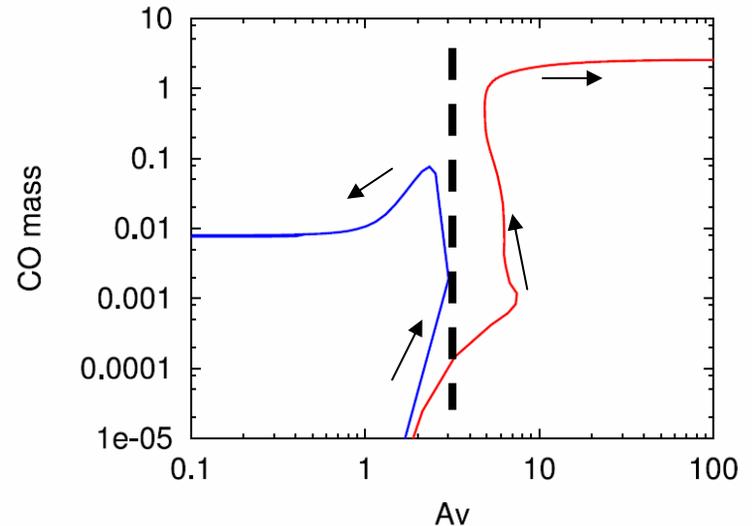
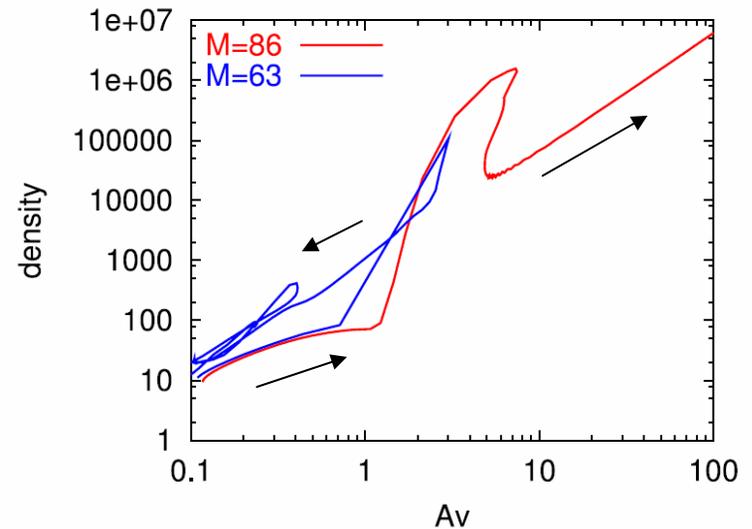
- $n_{\text{initial}} = 9.33$
- $P_{\text{ext}}/k_B = 1510$
- $M_{\text{total}} = 86 M_{\odot}$

- 7Myr (水素原子からからスタートして)

- $M_{\text{CO}} = 7.7 \times 10^{-4} = 2.5 X_{\text{CO}}$ 
  - $X_{\text{CO}} = 3 \times 10^{-4}$

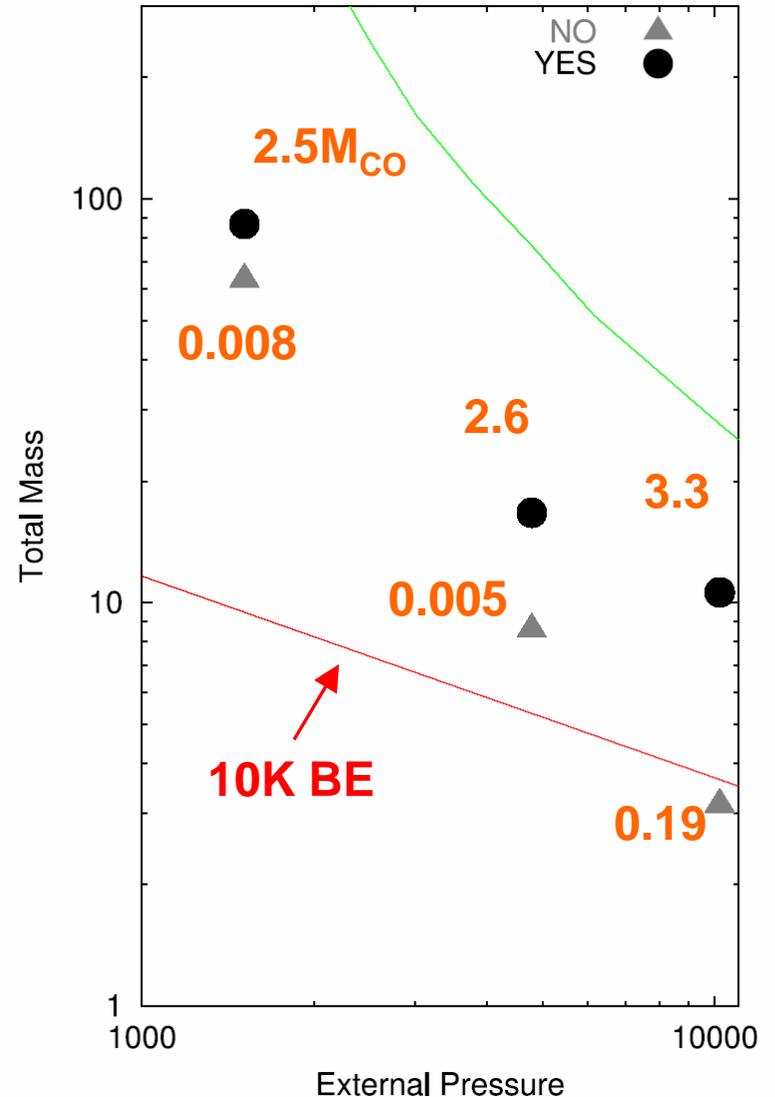
# 進化トラック

- 初期進化:
  - 輻射遮蔽によって出来る圧力勾配で中心に波が伝播
- 中心密度
- $n_c \sim 10^3 A_v^2$ 
  - $n_c \sim R^{-2}$
- $A_v \sim 3$ 付近にthreshold
  - Collapse
  - Bounce



# Effective Jeans Mass

- 10K Bonner-Ebert
- Initial parameter( $n_0, T_0$ )のBE
- CollapseしたCore
  - CO mass :  $\sim 2-3 M_{\odot}$



# まとめ

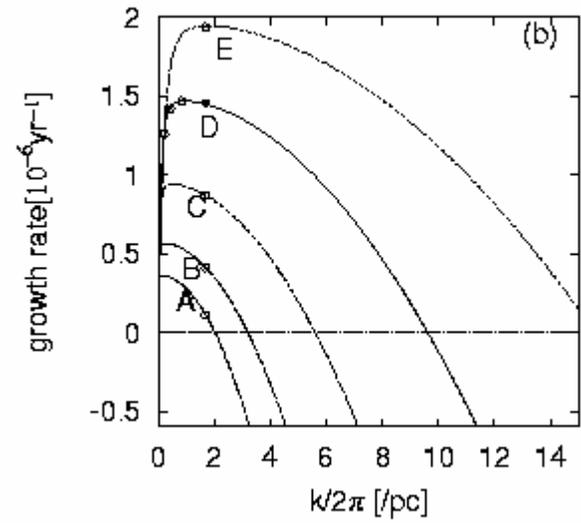
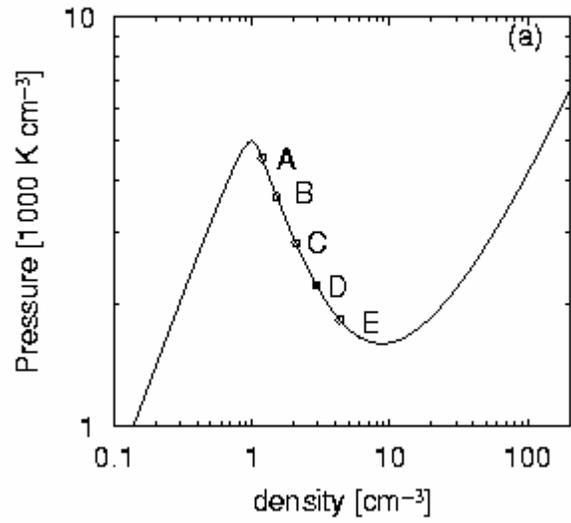
- Two-phase (Warm + Cold) Diffuse medium (optically thin)の流体力学的性質
  - 乱雑な運動の持続(自ら乱流を維持する機構)
- 輻射の遮蔽に伴うTwo-phaseの進化
  - 1次元球対称数値実験
  - $A_V \sim 3$ を境に自己重力Core
    - CO mass  $\sim 2-3M_{\odot}$

# Basic Equations

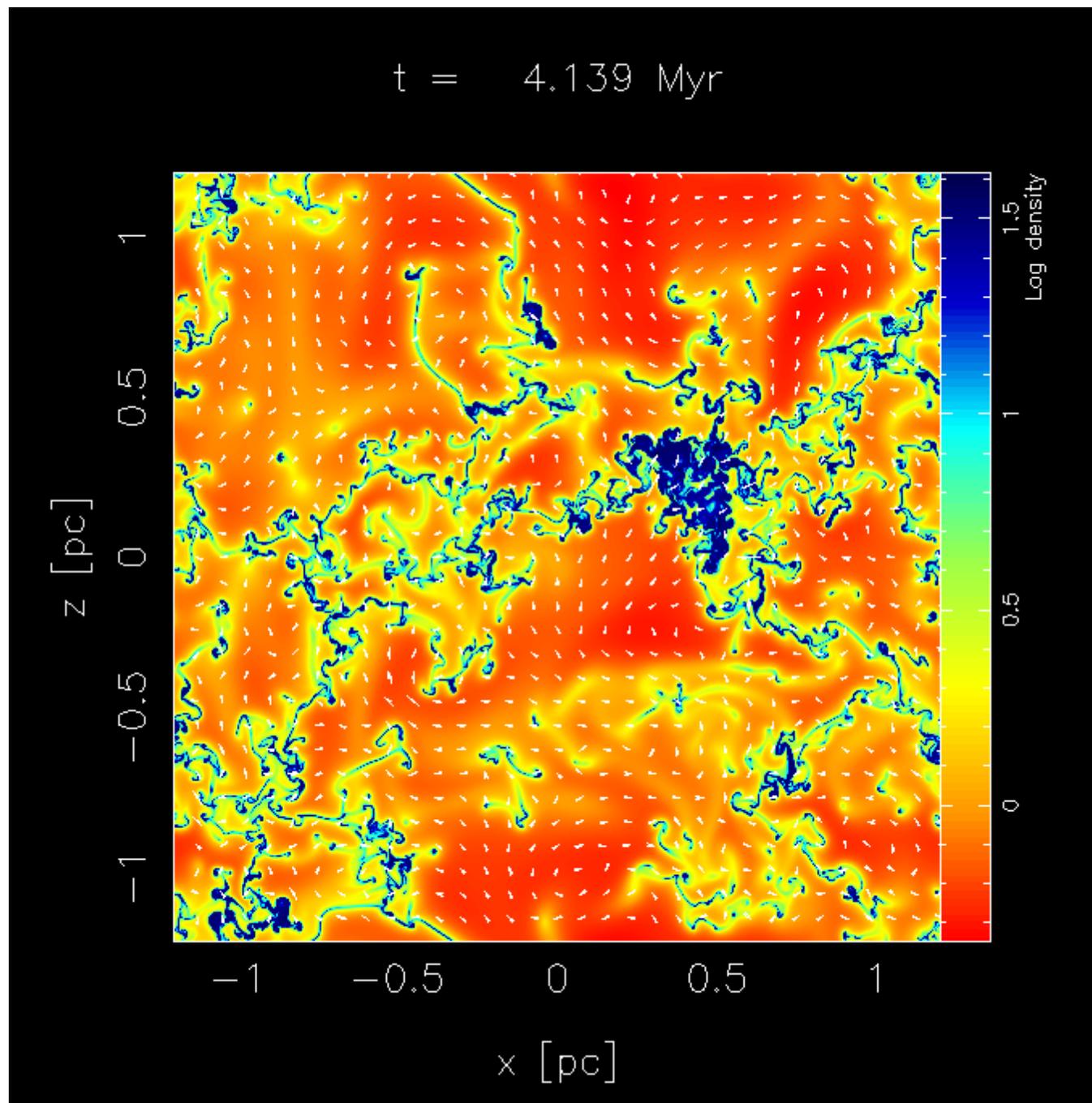
- *Eq. of continuity*  $\rho_{,t} + (\rho v_j)_{,j} = 0$
- *Eq. of motion*  $(\rho v_i)_{,t} + (\rho v_i v_j)_{,j} = -P_{,i} + \tau_{ij,j}$
- *Eq. of energy*
- $(\rho e)_{,t} + (\rho v_j h)_{,j} = (\tau_{ij} v_i)_{,j} + (KT_{,j})_{,j} + \dot{q}$  -
- *Eq. of state*  $P = \rho / m_H k_B T$ 
  - Heating( ) and cooling( )
  - Thermal conduction  $K$
  - Stress tensor
    - $\tau_{ij} = \mu (v_{i,j} + v_{j,i} - 2/3 \delta_{ij} v_{k,k})$
    - $\mu$  :Molecular viscosity

# Equilibrium

- Isothermal sphere
  - Ebert (1955), Bonner(1956)
  - Polytrope
  - Negative-index polytrope
    - Turbulent pressure (Maloney 1988)
  - Logotrope
    - $P/P_c = 1 + A \ln(\rho / \rho_c)$
    - McLaughlin & Pudritz (1996,1997)



- $L=2.4\text{pc}$
- $4096^2\text{cells}$
- $\text{Pr}=2/3$



# 一方で観測は

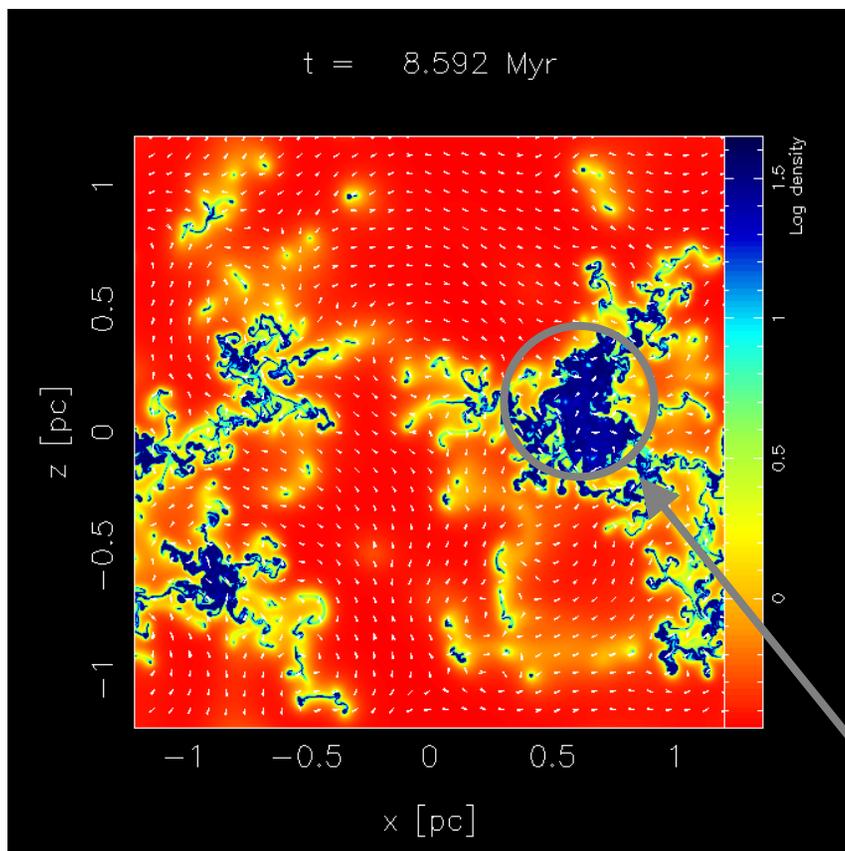
- 静かなBonner-Ebert sphere的なものが多い
  - Johnstone et al. (2001)
  - コア内部での速度分散は小さい
  - Tafalla et al. (2004)
  - 乱流モデルで作られたコアとは合わない
  - 静かなコアを a few Myrでどうやって作るのか？
  - $M_{BE} \sim 2.6 T_1^2 (P_{ext}/2 \times 10^4)^{-1/2} M_{\odot}$
  - 外圧の不定性

# Rapid Formation of Clouds

- Hartmann et al. (2001)
- **分子雲が分子である為には分子形成の条件**
  - H<sub>2</sub>, CO shieldingに十分な柱密度があること
    - $N_H > 1 - 2 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ , or  $A_V > 0.5 - 1$
  - **水素分子の形成のタイムスケール**
    - $t \sim 5 - 15 n_3^{-1} T_1^{-1/2} \text{ Myr}$
  - **この条件を満たすCloud**
    - 自己重力的?

# Two-phase ISMによる乱流

2次元Diffuse mediumのシミュレーション



青: Cold phase 赤: Warm phase

- 一定の速度分散を保ったまま持続
  - Thermal Instabilityによって不安定性が常に生成
  - 不安定性の飽和

$R=0.4\text{pc}$ ,  $N_{\text{H}}=4\times 10^{19}\text{cm}^{-2}$

3次元だと思つと0.1Mo