

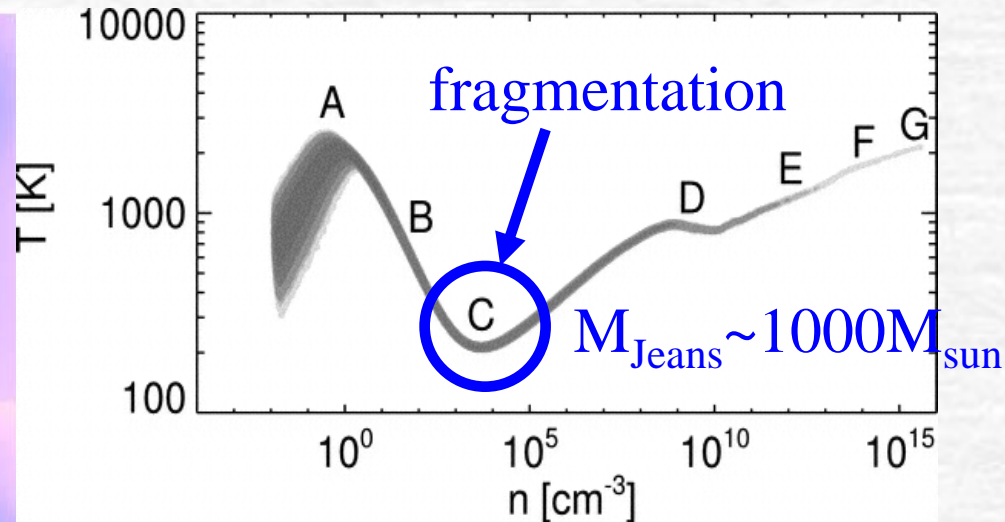
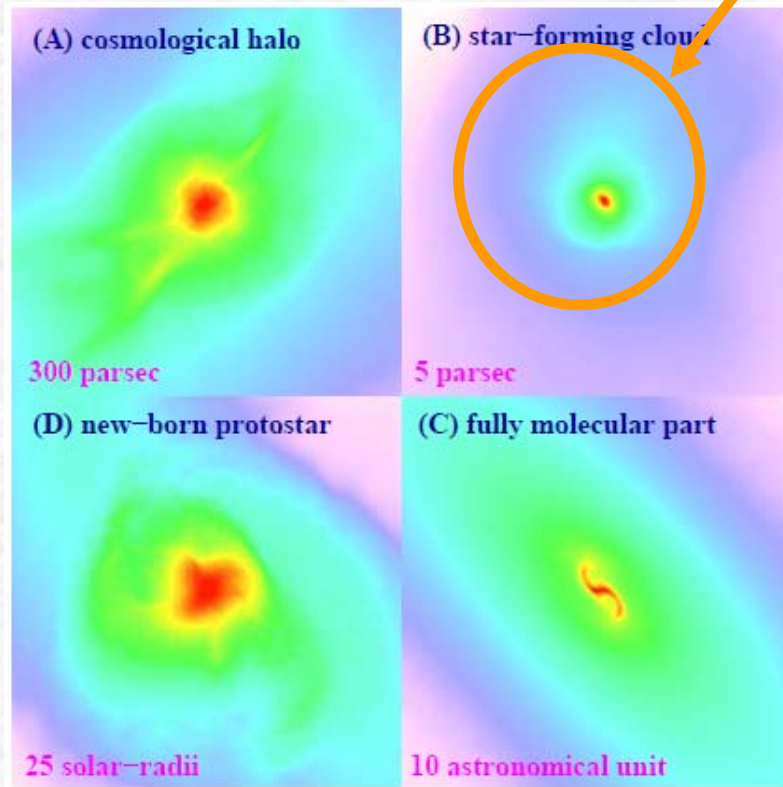
初代星・銀河形成研究会  
@甲南大、神戸  
9月8日 (2008)

# 低金属度星の形成理論

大向一行  
(国立天文台)  
釣部通  
(大阪大)

# 初代星(種族III.1)形成

dense core (fragment)  $\sim 1000M_{\text{sun}}$



分裂スケール

$M_{\text{分裂}} \sim M_{\text{ジーンズ}} @ \text{温度最小}$

その後の降着過程を考慮しても、  
超大質量星( $>100M_{\text{sun}}$ )が形成

# Fragmentation and thermal evolution

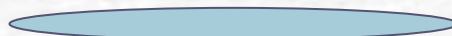
(e.g., Larson 2005)

$$\gamma = d \log p / d \log \rho$$

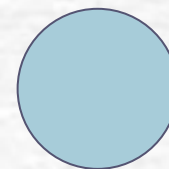
If  $\gamma > \gamma_{\text{crit}}$ , the collapse stops



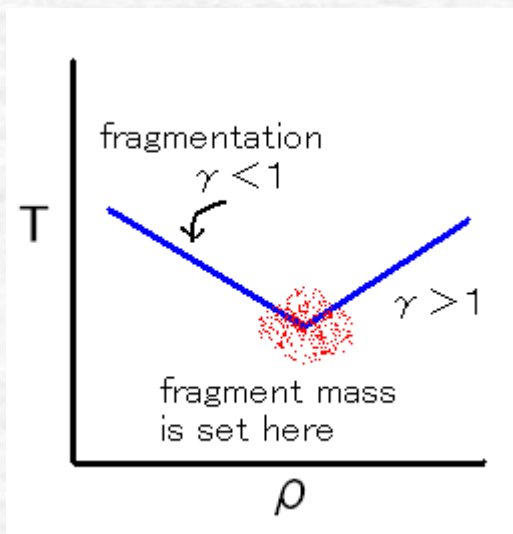
sheet:  $\gamma_{\text{crit}} = 0$



filament:  $\gamma_{\text{crit}} = 1$



sphere:  $\gamma_{\text{crit}} = 4/3$

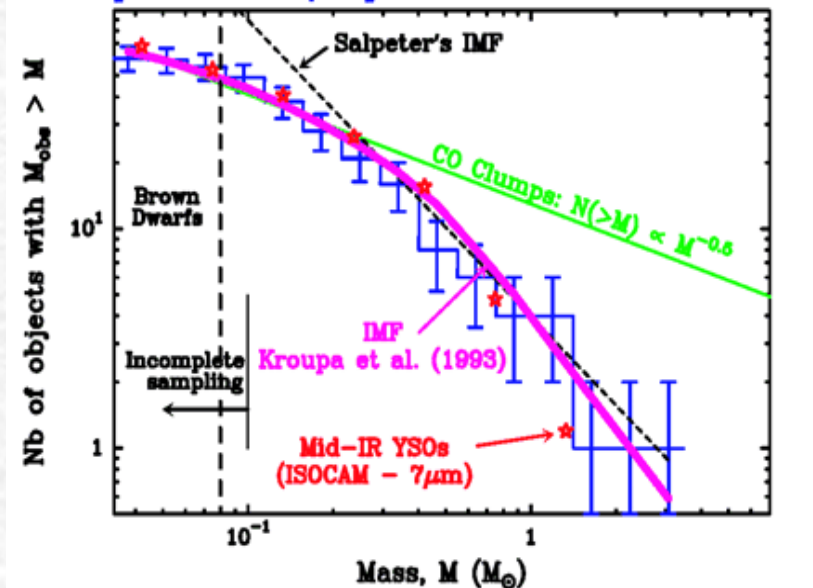


Initially the cloud takes complicated shape.  
Before the fragmentation, it is filamentary.  
As a thumb rule,

Fragmentation occurs while  $\gamma < 1$ , and stops while  $\gamma > 1$

# 太陽近傍( $\sim Z_{\text{sun}}$ )の星の質量

Mass Spectrum of  $\rho$  Oph Prestellar Condensations



Motte et al. 1998

- 星のIMFと高密度コアの質量関数は一致。
- High-mass側でpower-lawで落ちる。  
 $dN/dm \sim m^{-2.35}$   
(いわゆる Salpeter IMF)
- Peakが $0.1-1M_{\text{sun}}$ に存在し、それ以下では分布がflatないし減少となる。

# The Critical Metallicity

## 低金属度星形成研究の中心課題

臨界金属度：

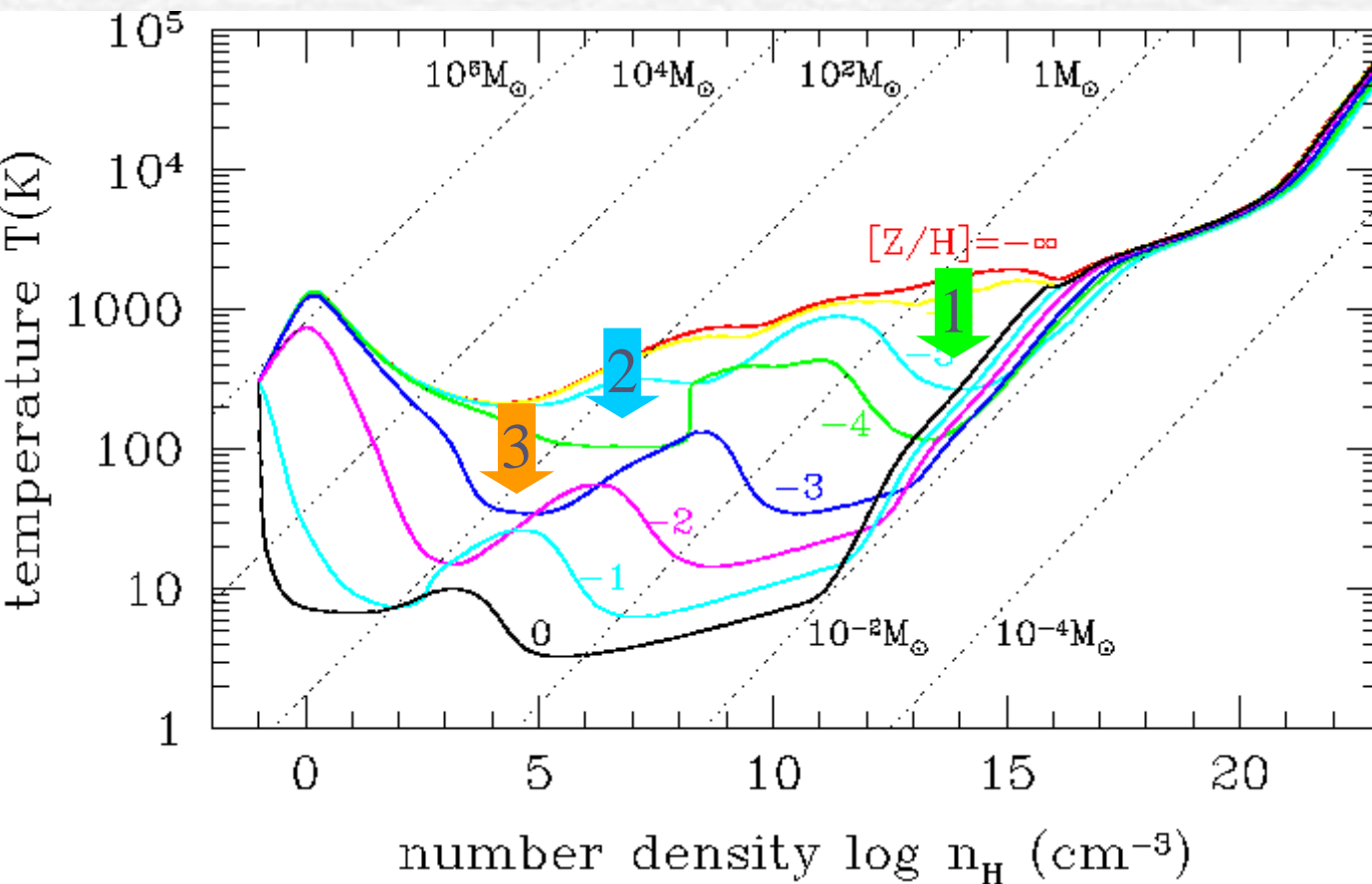
金属度がどれくらいあれば、  
低質量星形成モードに移行するか？

これがどの値か？

どういう物理過程で決まっているのか？

# 星形成コアの熱進化と金属度

- 1) ダストの熱輻射による冷却:  $[Z/H] > -5$
- 2) ダスト上での $H_2$ 形成 :  $[Z/H] > -4$
- 3) 微細構造線による冷却輝線(C とO):  $[Z/H] > -3$

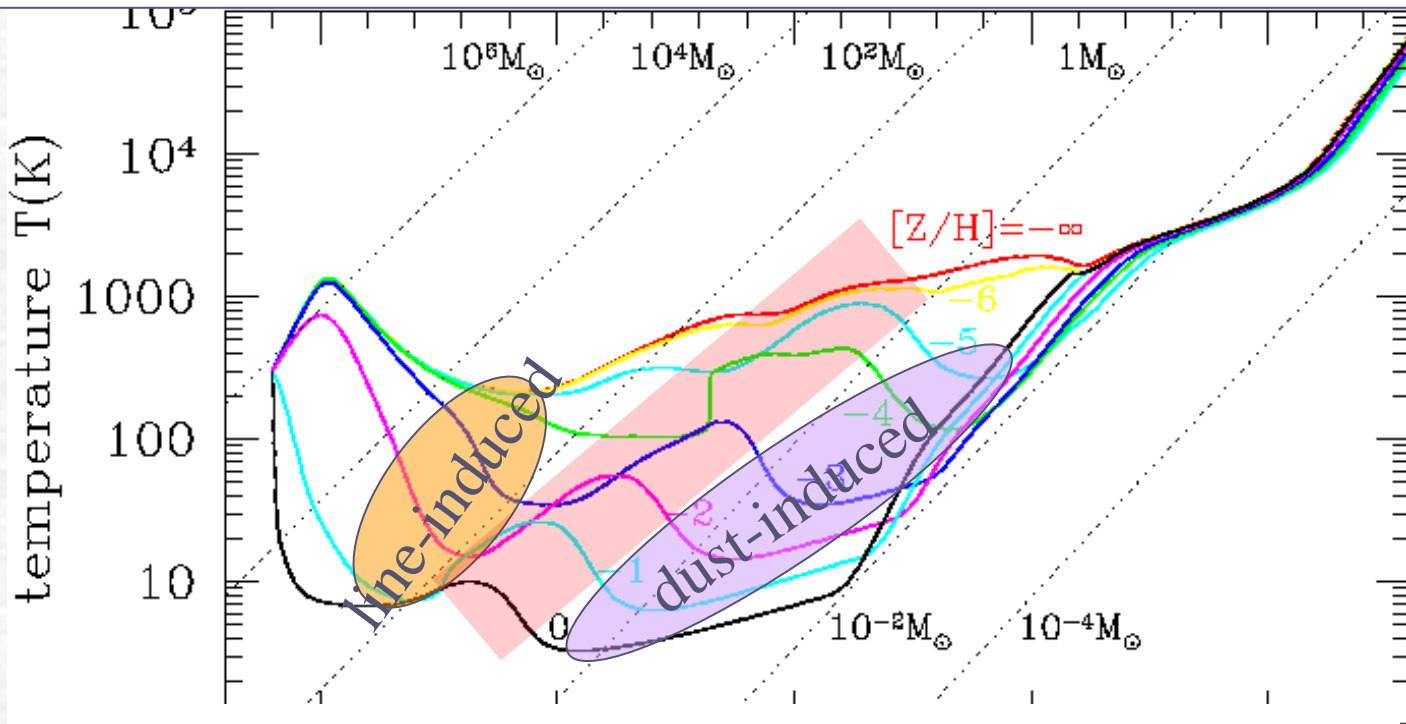


$[Z/H]$   
 $:= \log_{10}(Z/Z_{\text{sun}})$

- one-zone model
- collapses in the free-fall timescale
- core size  $\sim$  the Jeans length
- dust/metal ratio same as local ISM

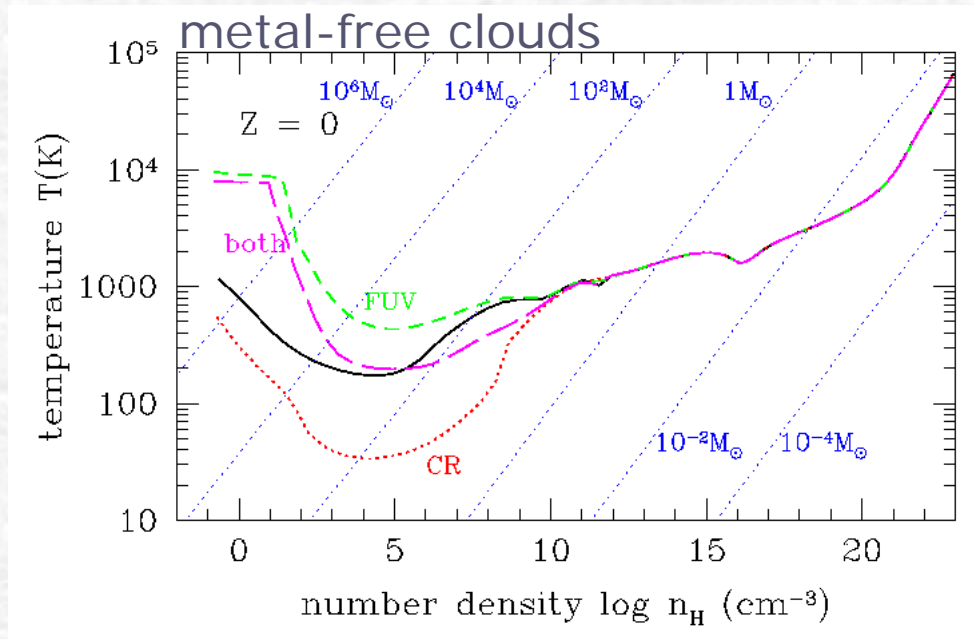
# Fragmentation mass scales

- Mass scales dependent on  $Z$  only weakly
  - Line-induced fragmentation ( $10^2\text{-}5\text{cm}^{-3}$ ,  $100\text{-}1000M_{\text{sun}}$ )
  - Dust-induced fragmentation (higher density,  $0.1\text{-}1M_{\text{sun}}$ )



For low-mass ( $<1M_{\text{sun}}$ ) star formation, dust is indispensable

# Radiation Effects on low-Z gas (1)



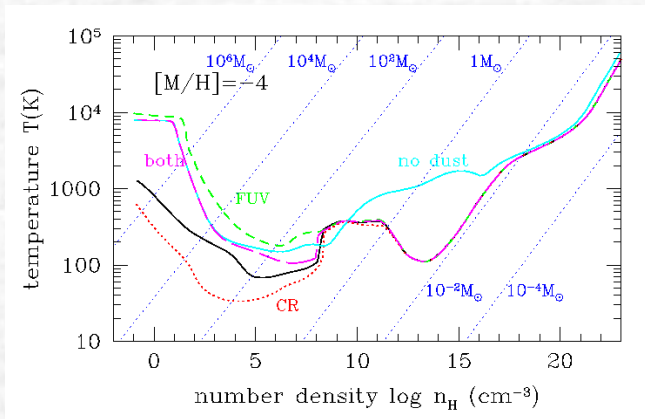
Galactic level  
radiation considered

$$G_0 = 1.71$$
$$\zeta = 3 \times 10^{-17}$$

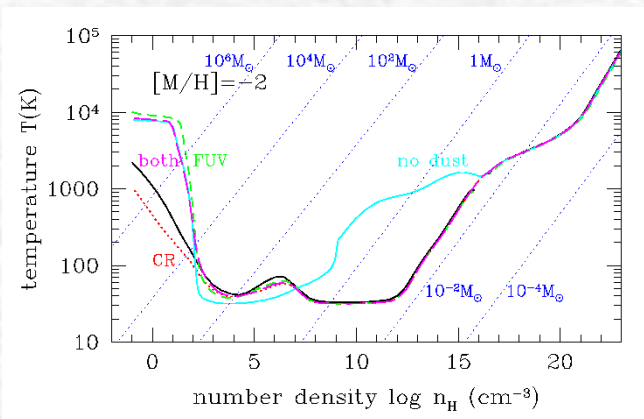
- Far UV effects → Heating
  - photoelectric heating
  - photodissociation
- Cosmic ray effects → Cooling
  - ionization, heating



# Radiation effects on low-Z gas (2)



- Radiation affects only low density evolution where the Jeans mass is still high ( $> \sim 10 M_{\text{sun}}$ ).
- ➔ NOT relevant to low-mass ( $< \sim 1 M_{\text{sun}}$ ) star formation

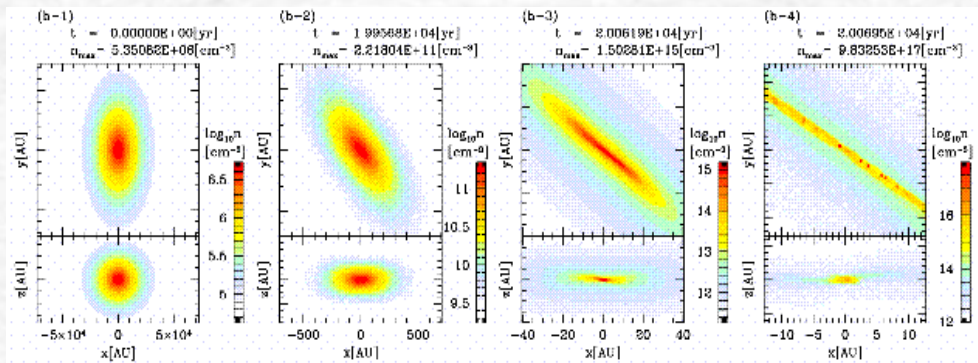


- Without dust, temperature continues to increase in high densities (no fragmentation).
- ➔ Dust is needed for low mass star formation.

# Dust-induced fragmentation

Tsuribe & K.O. (2006; 2008)

$[Z/H] = -5.5$  ( $Z = 3 \times 10^{-6} Z_{\text{sun}}$ )

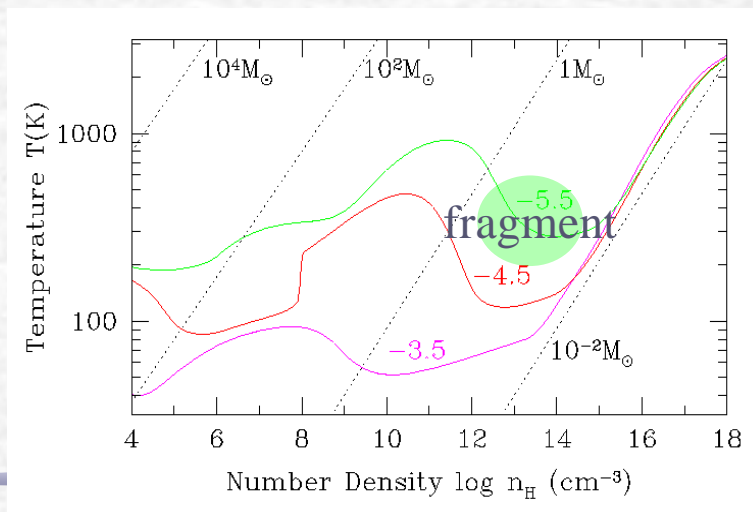


With gas-dust ratio

$Z > \sim 10^{-6} Z_{\text{sun}}$   
(first dust: smaller grains)

→ long filament forms during dust-cooling phase

→ fragmentation into low-mass ( $0.1 - 1 M_{\text{sun}}$ ) objects



Standard dust

$$Z_{\text{cr}} \sim 10^{-6} - 10^{-5} Z_{\text{sun}}$$

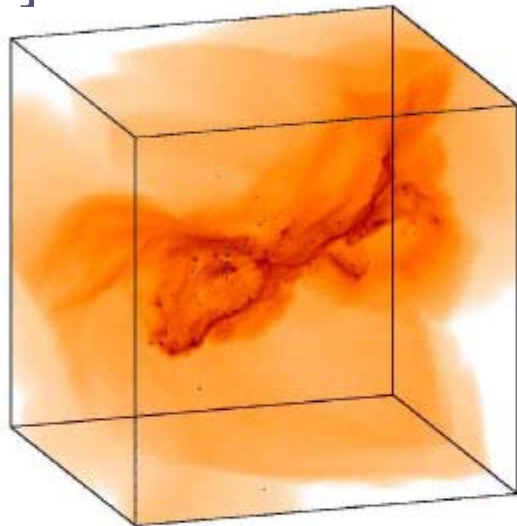
First dust

# 乱流的な初期条件でもOK

Clark, Glover, & Klessen (2008)

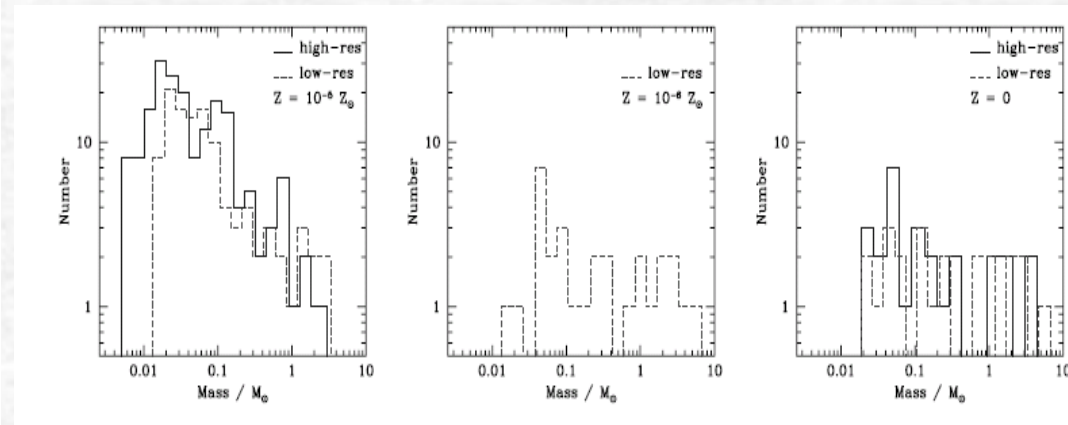
状態方程式を密度の関数として与えて、  
乱流的な初期条件から星間雲の進化を計算。

$[Z/H]=-5$



$t = t_{SF} + 420 \text{ yr}$

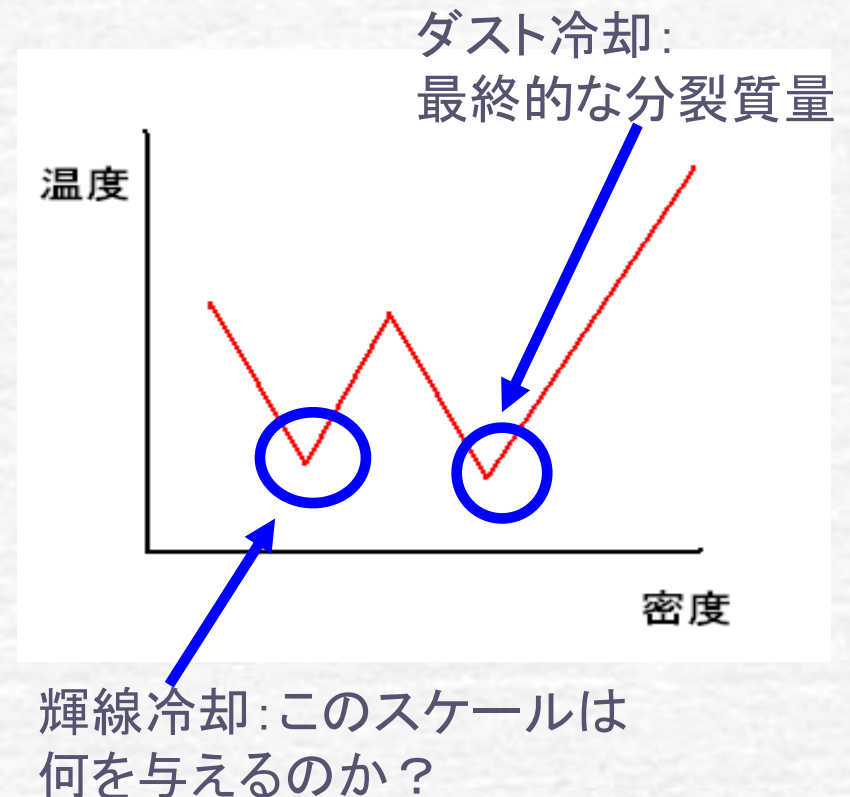
質量分布



$[Z/H]=-5$ では小質量コアが  
形成されている。

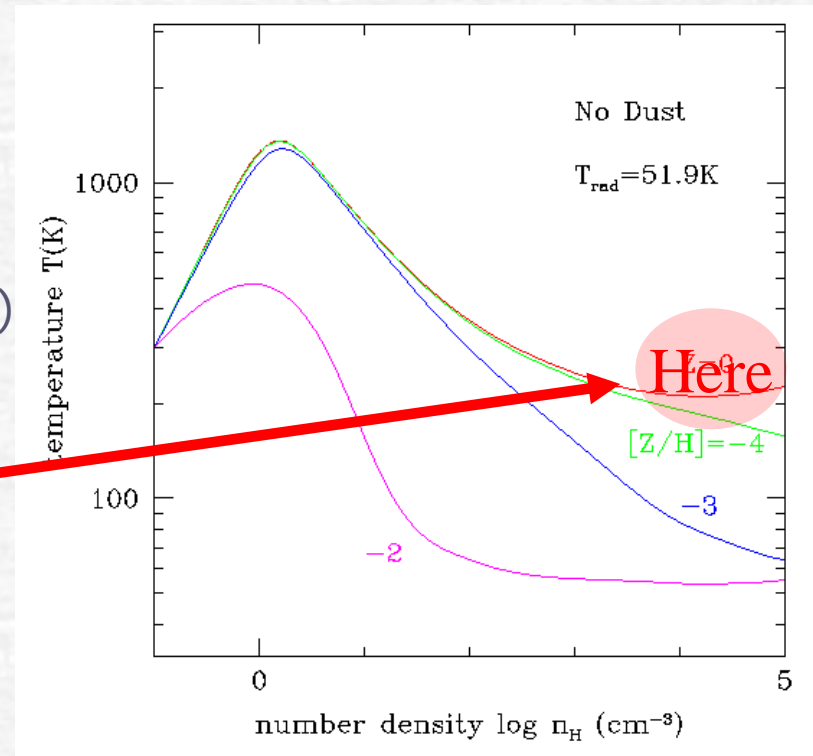
## 輝線冷却の役割？

- ✓  $[Z/H] \sim -3.5$ 以上では  $H_2$ より $[C, O]$ が冷却に効く。
- ✓ 小質量星 ( $< 1M_{\text{sun}}$ ) 形成過程としては分裂スケールが大きすぎる ( $> 10M_{\text{sun}}$ )
- ✓ 星団の質量スケールか？



# Low-mass fragments by fine-structure-line cooling?

- Some studies claim that low-mass fragments are formed by fine-structure line cooling.  
(Bromm & Leob 2003, Santoro&Shull2006 )
- Those arguments compare  $\Lambda_{\text{H}_2}$  VS  $\Lambda_{\text{fine-str.}}$  @ T min of Z=0  
 $\rightarrow Z_{\text{cr}} \sim 10^{-3.5} Z_{\text{sun}}$
- This only assures  $M_{\text{frag}} < M_{\text{frag}}(Z=0) \sim 1000 M_{\text{sun}}$



# 輝線冷却分裂過程のシミュレーション

## 温度進化

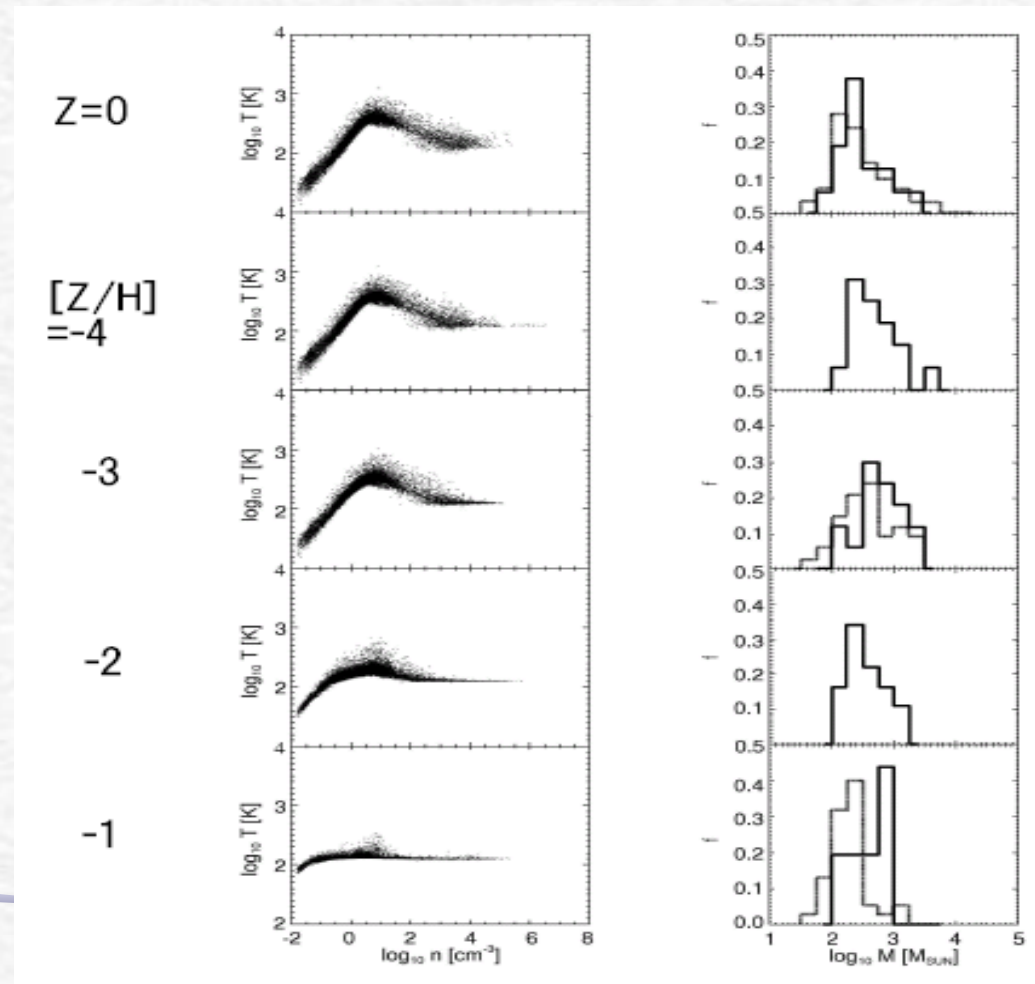
Jappsen et al. 2007

流体 + 化学輻射過程

初期条件: ハローの最大膨張期  
(トップハット + 揺らぎ)

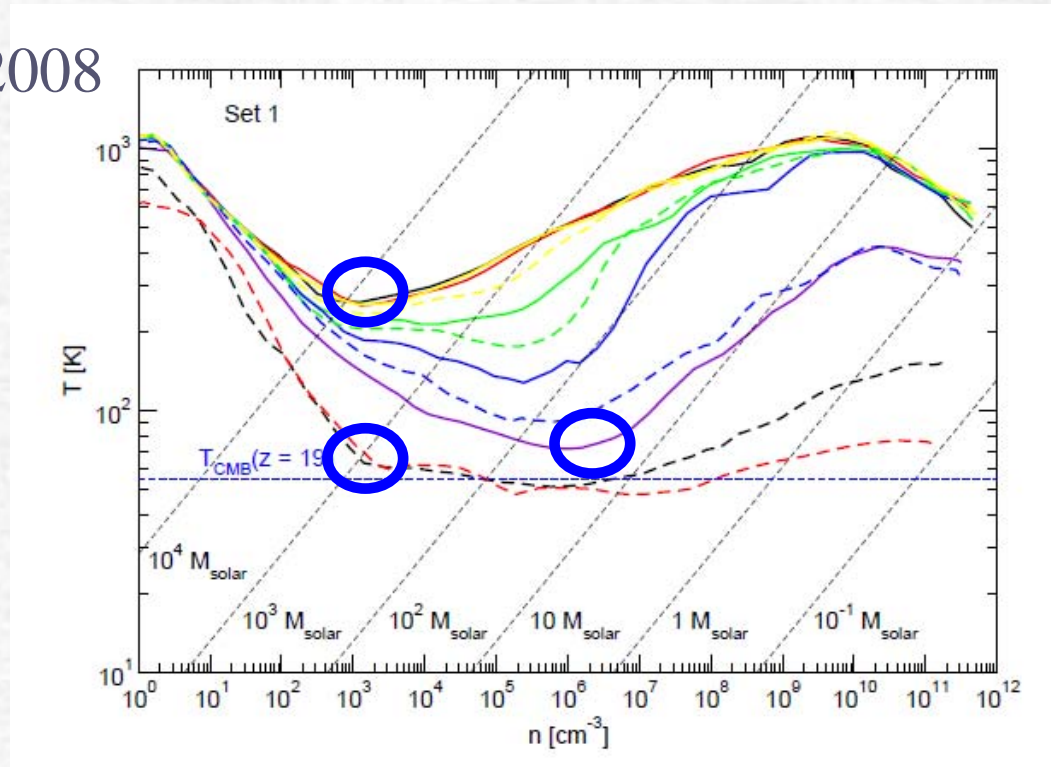
CMB温度 105K

- ✓  $Z < 0.1 Z_{\text{sun}}$  で特に分裂スケールに差はみられない
- ✓ いずれの場合も大質量コアが形成



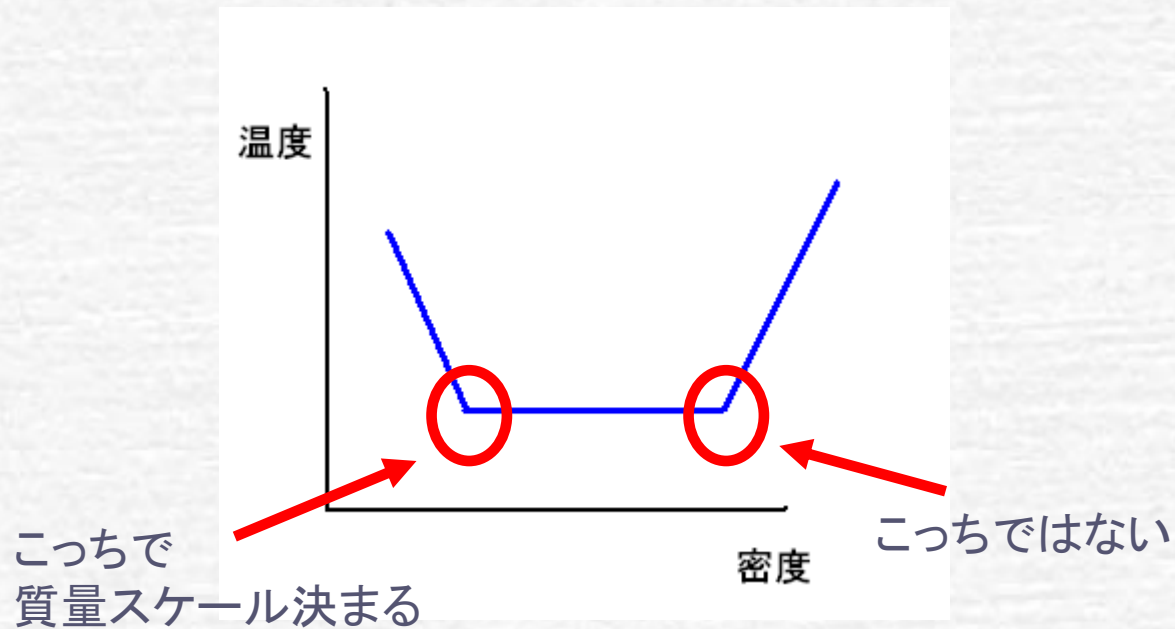
# CMBの効果

Smith et al. 2008



- ✓  $[Z/H] < -3.75$  大質量星 数10-数100Msun
- ✓  $-3.75 < [Z/H] < -2.5$  比較的小質量 数Msun
- ✓  $-2.5 < [Z/H]$  CMBの影響 大質量星 数10Msun

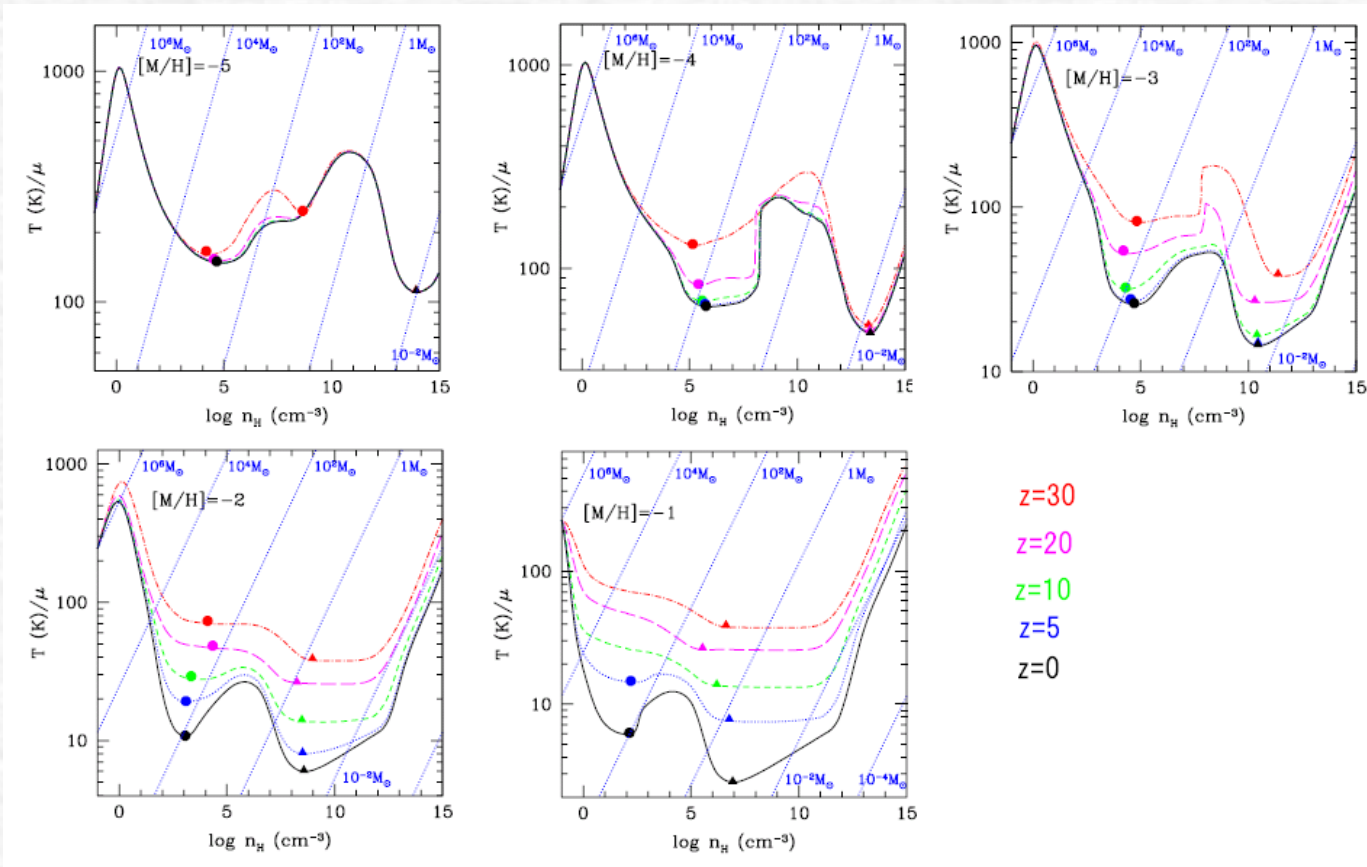
# 疑問点



- ✓フィラメントの重力不安定性からは、等温収縮が終わるときに分裂すると予想される。
- ✓シミュレーションからは「急速な冷却期」が終わるときに分裂が起こるようである。

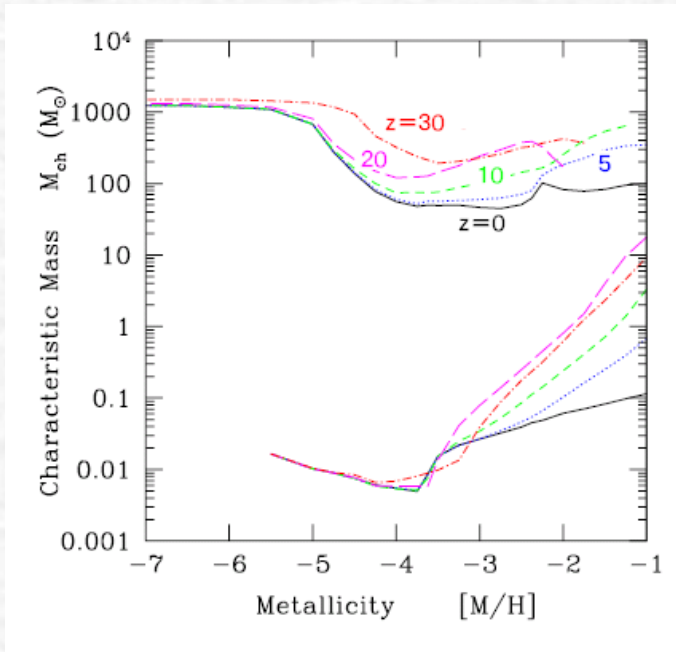


# 温度進化へのCMBの影響

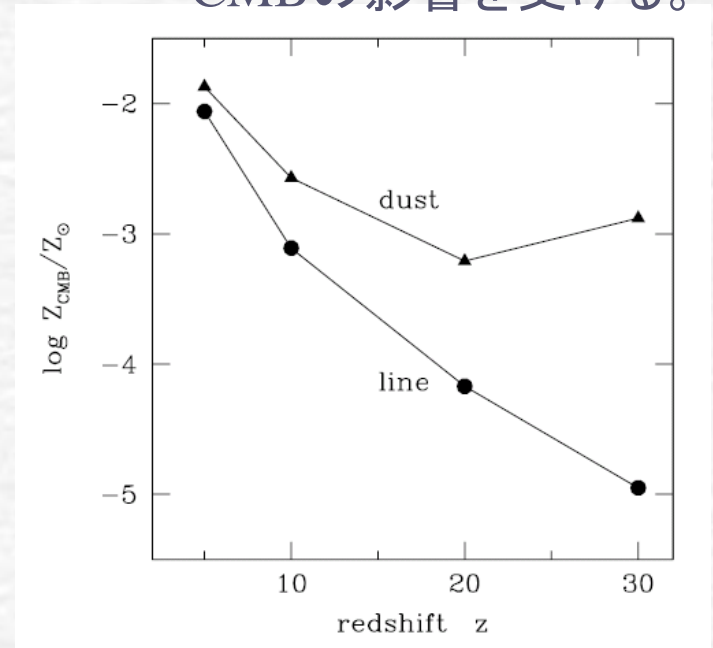


# CMBの影響： 分裂質量 & $Z_{\text{CMB}}$

典型的な分裂質量



$Z_{\text{CMB}}$ :  $Z$ がこれ以上だと  
CMBの影響を受ける。



- ✓  $z=20\sim30$ だと、 $[Z/H]\sim-4$ くらいでもCMBの影響を受ける。
- ✓ これはダスト上での $H_2$ 形成が阻害されることが原因

# SUMMARY

**We have studied thermal evolution of low-Z gas and discussed its fragmentation properties.**

- Line cooling and external radiation affects the thermal evolution only at low densities where the Jeans mass is still high ( $>10-100M_{\text{sun}}$ ).
- Dust grains causes a sudden temperature drop at high density where  $M_{\text{Jeans}} < \sim 1M_{\text{sun}}$ , which induces low-mass fragmentation.
- The critical metallicity for dust-induced fragmentation is  $[Z/H]_{\text{cr}} \sim -6..-5$
- However,  $\text{H}_2$ -formation heating prohibits low-mass fragmentation in  $[Z/H] \sim -5..-4$ .