

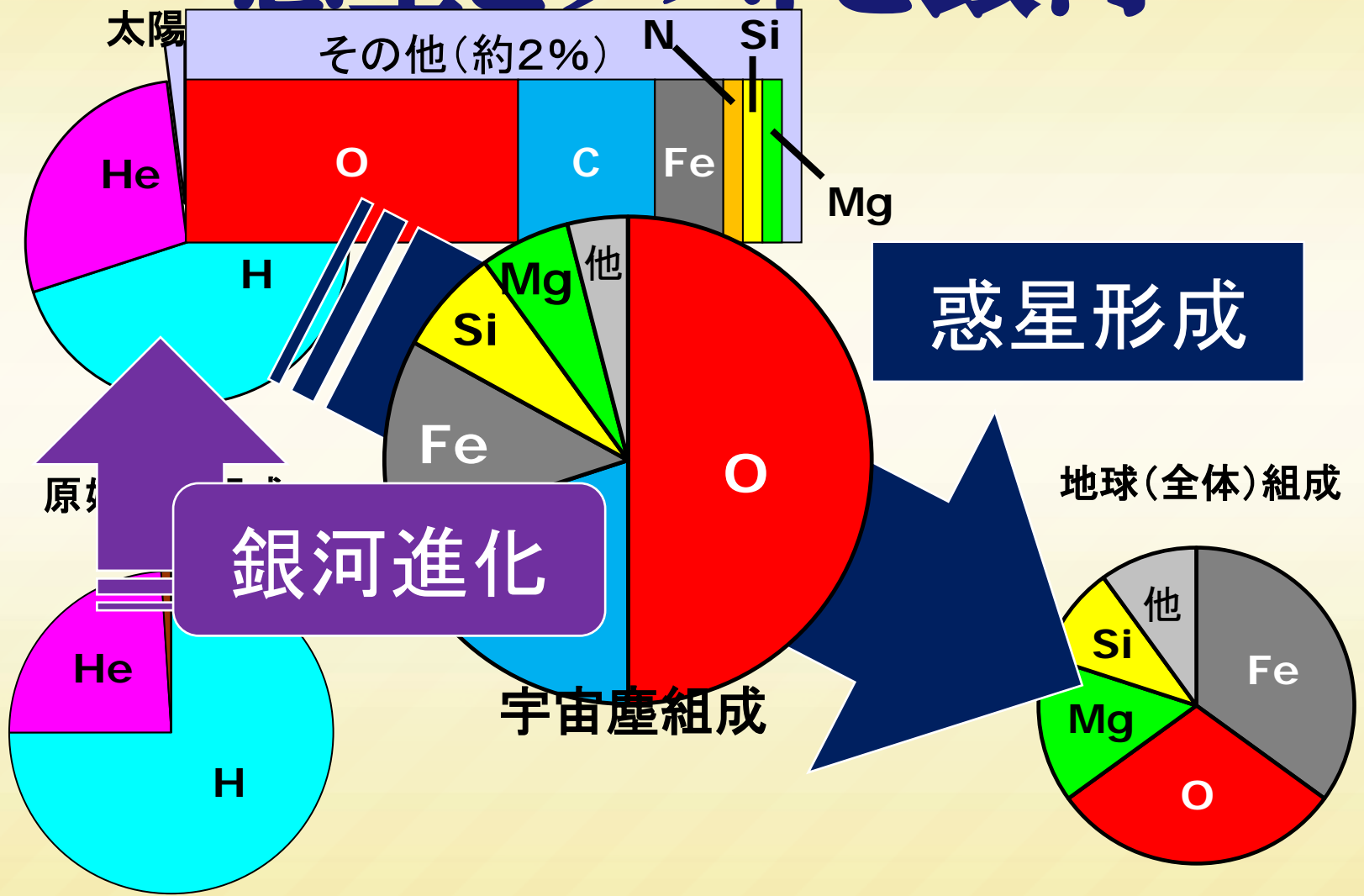
# 銀河のダスト輪廻転生

井上昭雄  
(大阪産業大学)

# もくじ

- 惑星とダストと銀河：イントロダクション
- 銀河系のダスト—その起源は？
  - ダストの一生概観
  - 銀河の化学進化モデル
    - 太陽近傍の化学進化モデル
  - 銀河のダスト量進化モデル
    - スターダスト供給 vs 超新星破壊 vs 星間成長
  - 銀河のダスト量決定機構
  - 原始太陽系星雲のダスト
- まとめ

# 惑星とダストと銀河

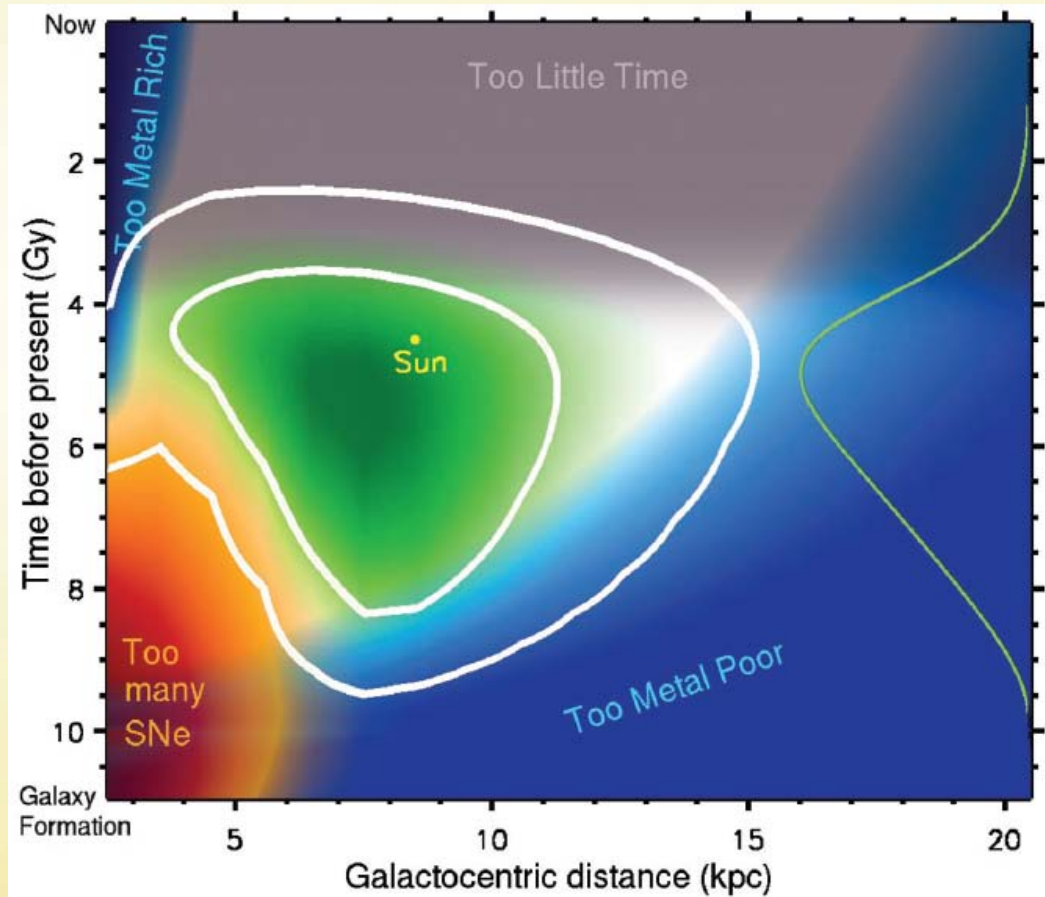


# 惑星とダストと銀河と、生命

## Galactic Habitable Zone

Lineweaver et al. (2004)

- 銀河系内で生命居住可能な場所
- 銀河の化学進化
  - 元素組成のみ考慮  
→ **ダストも考慮すべき**
- なぜ「天の川」？
  - 「天の海」を見る生物はいるのか？
- “The First Complex Life”はいつどこで？  
→ Habitable Zone “in Galaxies”



# ダストの一生概観

Yamamoto & Hasegawa (1977)

スターダスト生成

星間成長 Draine (1990)

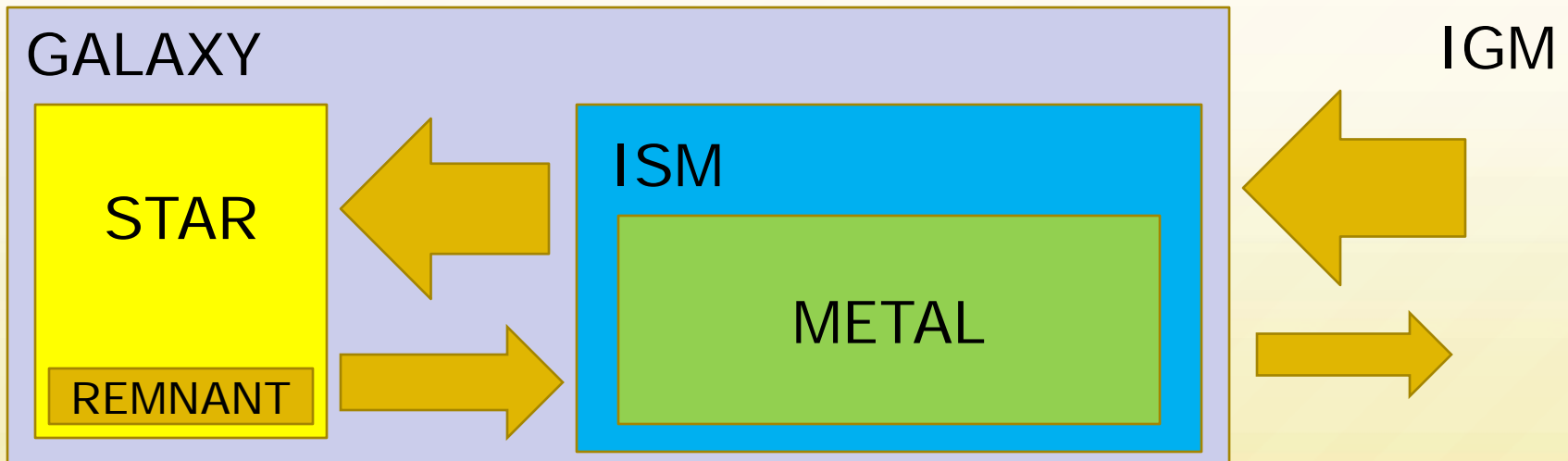


衝撃波破壊

Jones et al. (1994)

# 銀河の化学進化モデル

- 銀河の中の元素組成進化を記述するモデル
  - ヘリウムより重い元素をまとめて「金属(metal)」と呼ぶ慣習
  - 1960—70年代から発展
  - 非線形開放系の時間発展方程式



# 銀河の化学進化モデル

- 方程式系 (one-zone, single phase ISM)

STAR  $\frac{dM_*}{dt} = S - R$   
(stellar remnant含む)

ISM  $\frac{dM_{\text{ISM}}}{dt} = -S + R + I - O$

METAL  $\frac{dM_Z}{dt} = -ZS + Y_Z + I_Z - O_Z$

$$R(t) = \int_{m(t)}^{m_u} \{m - w(m, Z[t - \tau_{\text{lf}}(m)])\} \Phi(m) S(t - \tau_{\text{lf}}[m]) dm$$

$$Y_Z(t) = \int_{m(t)}^{m_u} m_Z(m, Z[t - \tau_{\text{lf}}(m)]) \Phi(m) S(t - \tau_{\text{lf}}[m]) dm$$

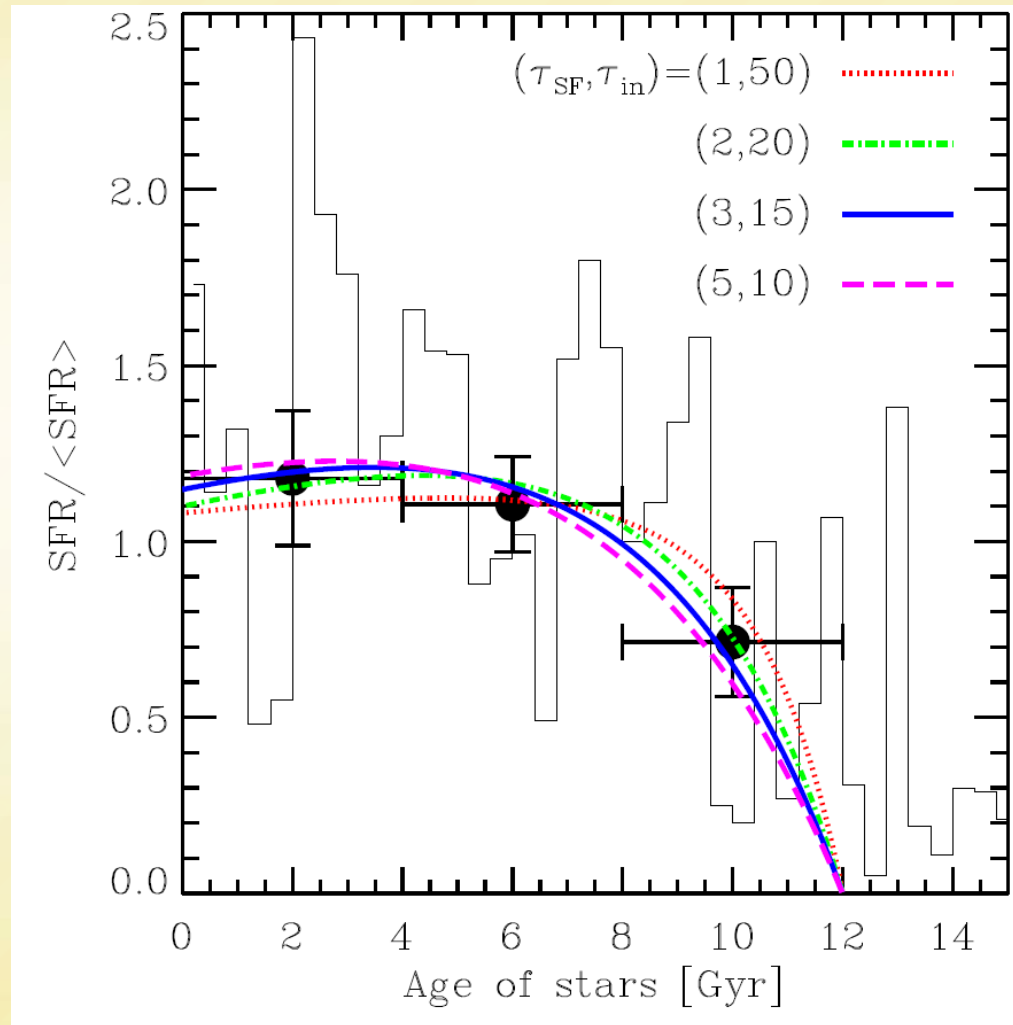
# 太陽近傍の化学進化モデル

- 仮定
  - IGM → ISM infallあり、outflowなし: infall time-scale
    - infallはゼロ金属
  - 星形成率はISM質量に比例する: SF time-scale
- 最新の恒星元素合成イールド
  - 超新星爆発: Nomoto et al.(2006)
  - AGB型星: Karakas (2010)
- 比較観測量
  - 星形成史
  - 恒星の年齢—金属量関係
  - 恒星—ISM質量比

→ 二つのtime-scaleを決定

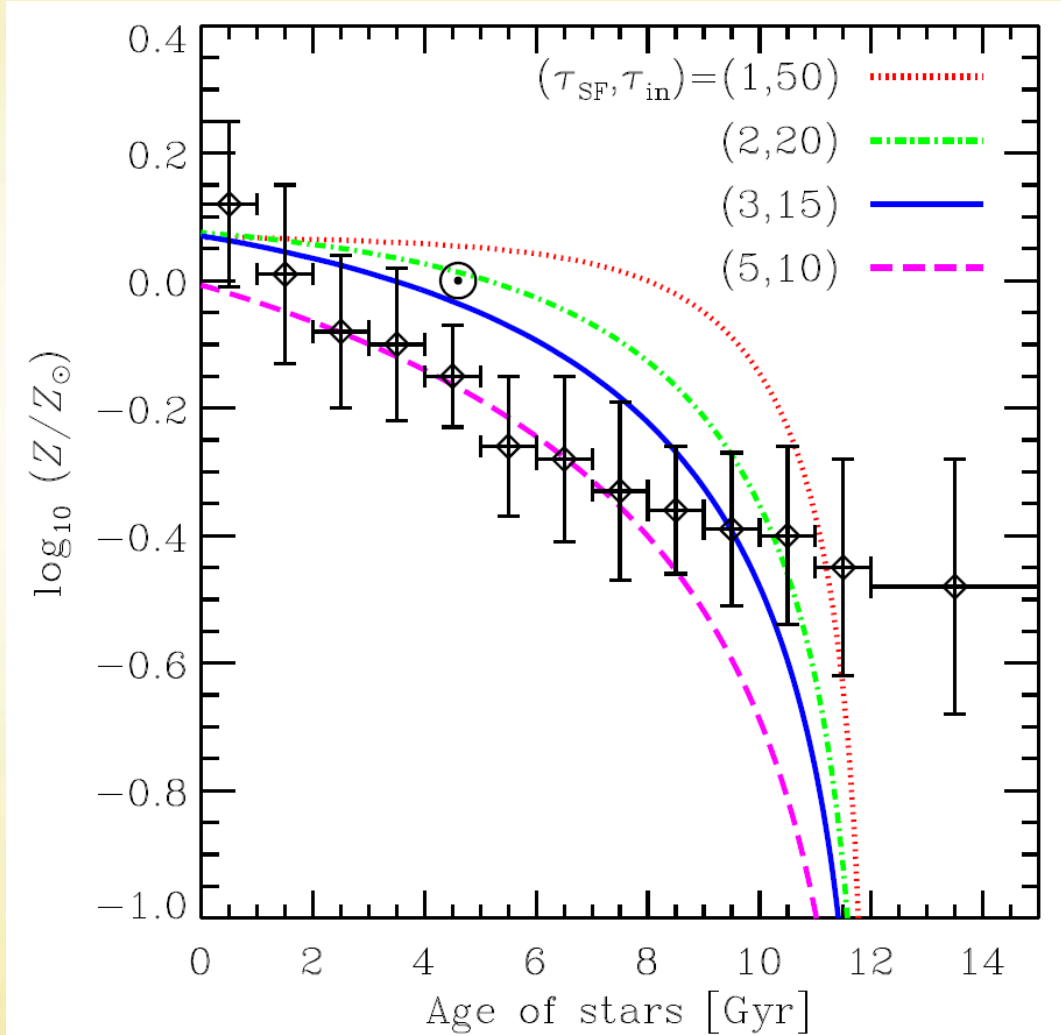


# 星形成史



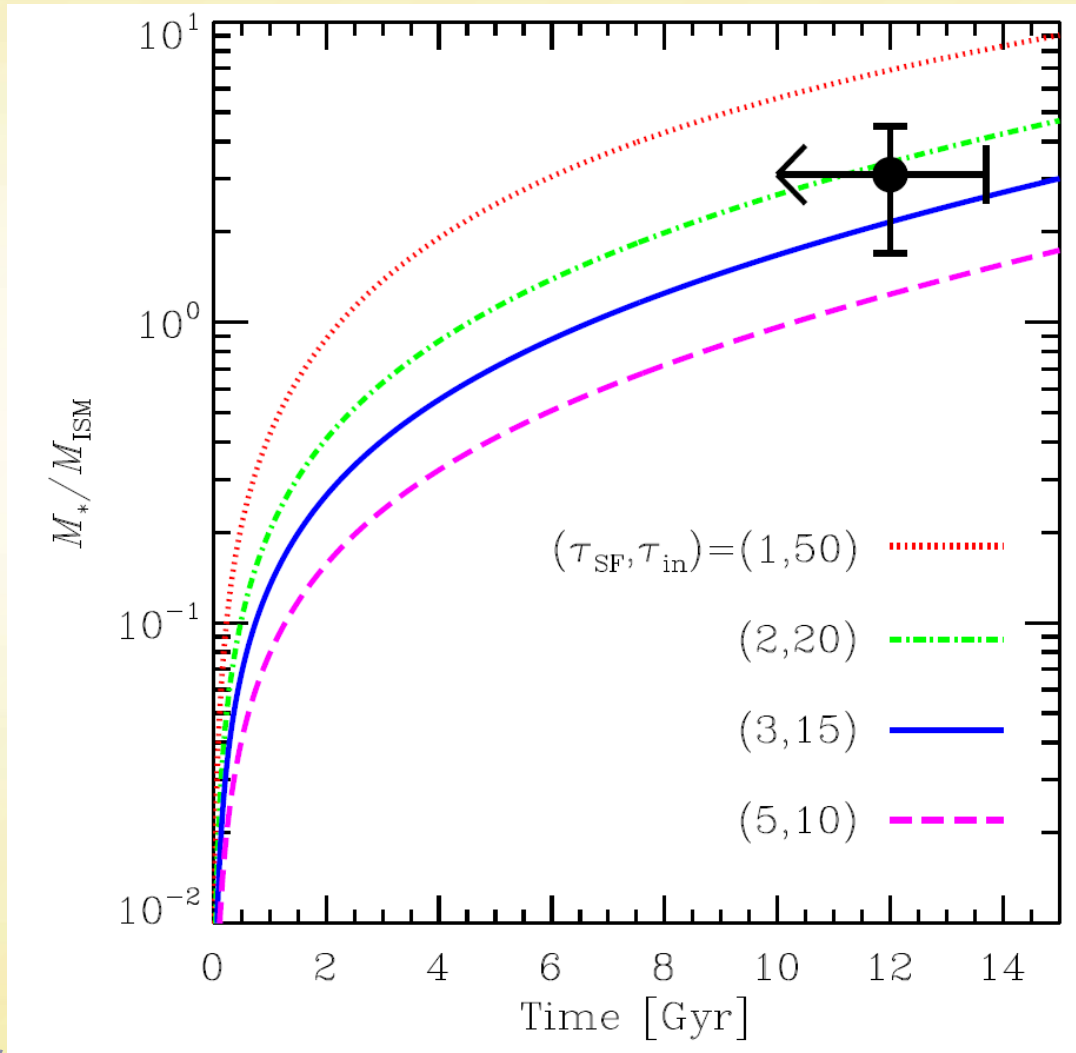
ヒストグラム:  
 Rocha-Pinto et al. 2000

# 恒星の年齢—金属量関係



データ:  
 Rocha-Pinto et al. 2000

# 恒星—星間媒質質量比



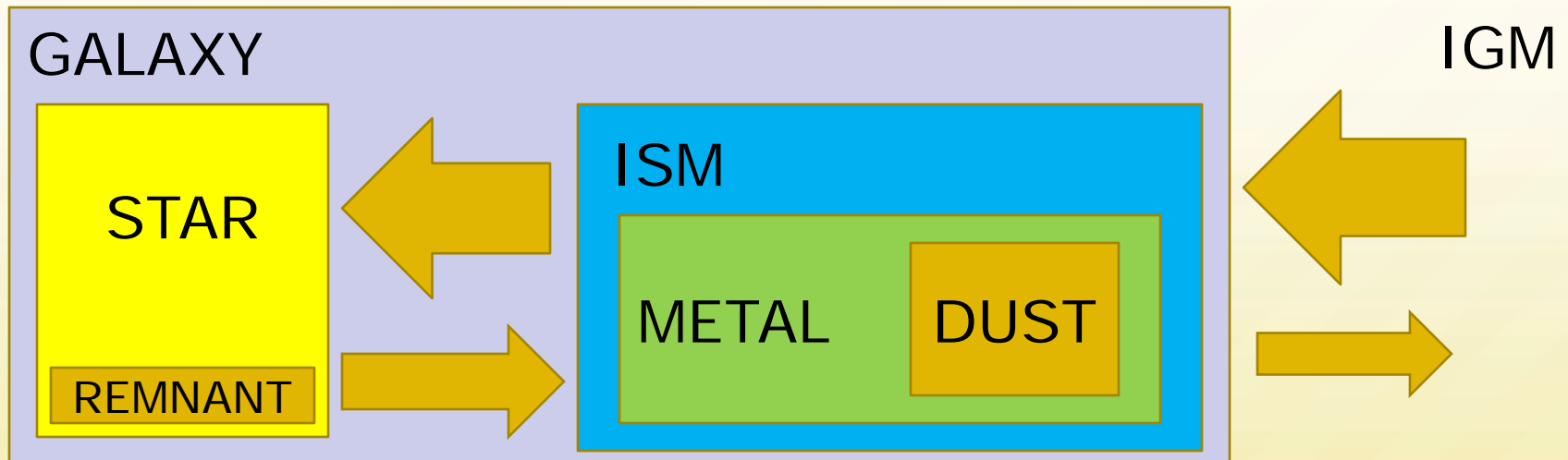
データ:  
 Naab & Ostriker 2006

# 太陽近傍の化学進化モデル

- 星形成タイムスケール: 3Gyr
- インフォールタイムスケール: 15Gyr

# 銀河のダスト量進化モデル

- 銀河の化学進化モデルの拡張
- Dwek & Scalo (1980)以来、数グループ
  - 日本では、Hirashita (1999a,b,c,2000), Inoue (2003)



# 銀河のダスト量進化モデル

- 方程式系 (one-zone, single phase ISM)

$$\text{STAR} \quad \frac{dM_*}{dt} = S - R$$

$$\text{ISM} \quad \frac{dM_{\text{ISM}}}{dt} = -S + R + I - O$$

$$\text{METAL} \quad \frac{dM_Z}{dt} = -ZS + Y_Z + I_Z - O_Z$$

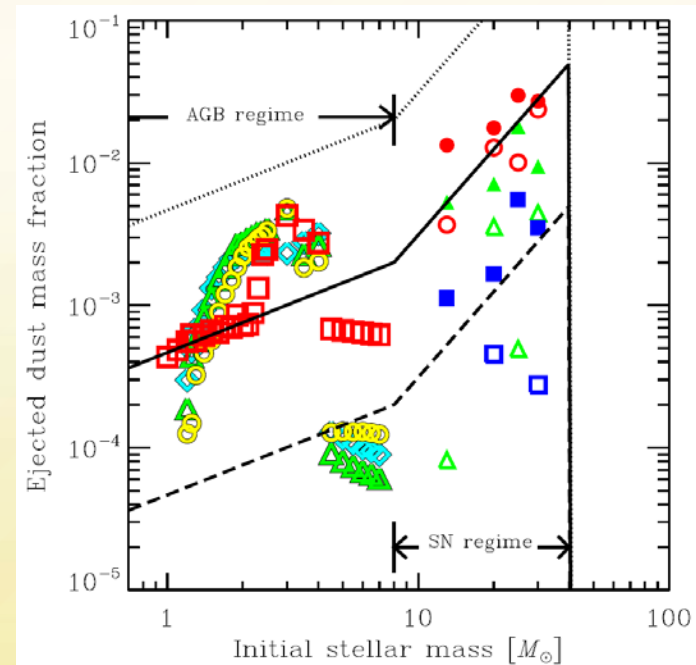
超新星爆発による破壊

星間雲内での成長

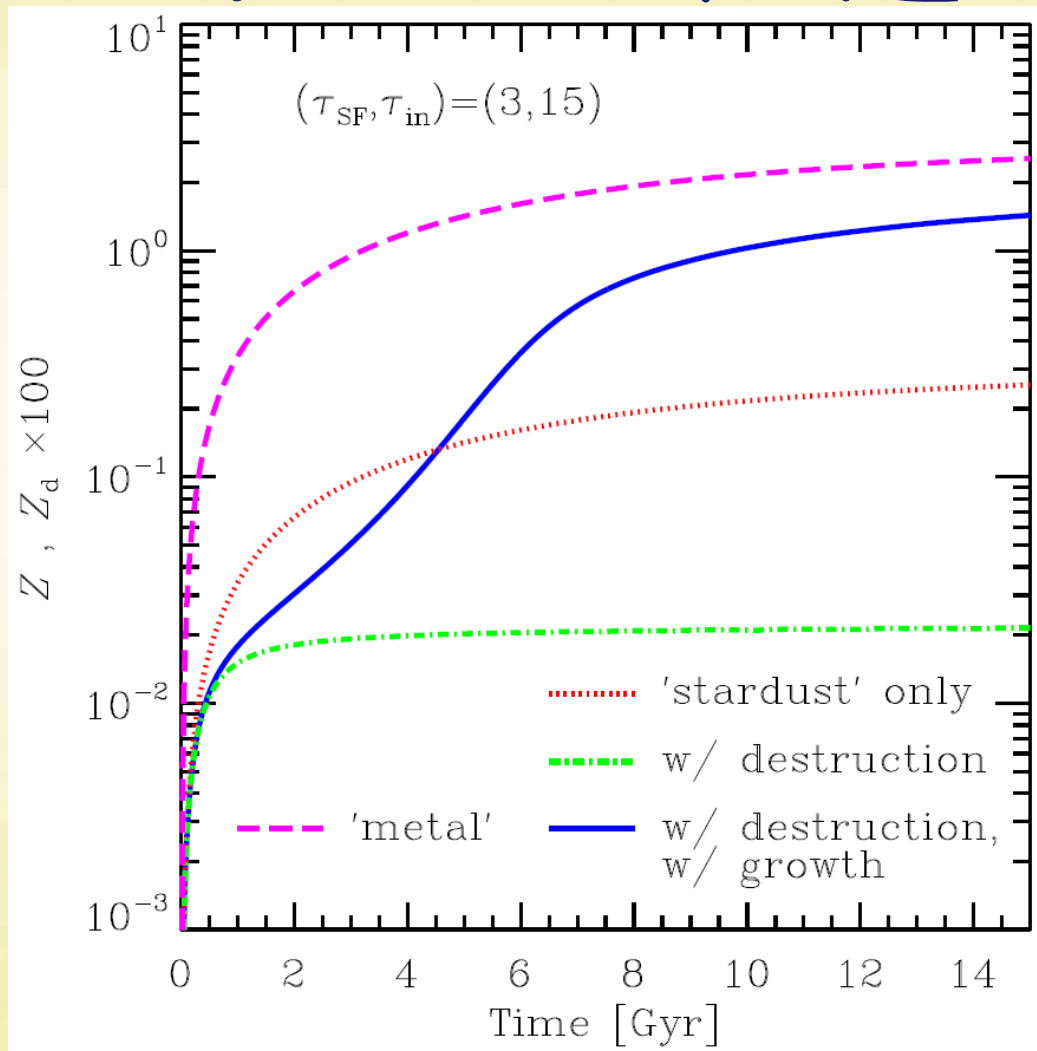
$$\text{DUST} \quad \frac{dM_d}{dt} = -Z_d S + Y_d \left[ -\frac{M_d}{\tau_{\text{SN}}} \right] + \left[ \frac{M_d}{\tau_{\text{ac}}} \right] + I_d + O_d$$

# 太陽近傍のダスト量進化

- 太陽近傍の化学進化モデル採用
- 最新のスターダスト形成モデル
  - 超新星爆発: Nozawa et al. (2007)
  - AGB型星: Ferrarotti & Gail (2006), Zhukovska et al. (2008)
- 一桁程度の不定性あり



# ダストーガス比進化





# 星からの供給

$$Y_d(t) = \int_{m(t)}^{m_u} m_d(m, Z[t - \tau_{lf}(m)]) \Phi(m) S(t - \tau_{lf}[m]) dm$$

Stellar dust yield (SNe and AGBs)  $\langle m_d \rangle \approx 10^{-2} M_{\text{sun}}$   
(Nozawa et al.2007, Zhukovska et al.2008)

Instantaneous recycling approximation (or a constant SFR):

$$Y_d(t) \approx S(t) \langle m_d \rangle \int_{m_t}^{m_u} \Phi(m) dm$$

$$\approx 10^{-3} S(t) = \frac{M_{\text{ISM}}}{\tau_{\text{SF}} 10^3} = \frac{M_d}{\tau_*}$$

(Salpeter IMFのとき)

$$\tau_* \equiv \tau_{\text{SF}} \left( \frac{Z_d}{10^{-3}} \right)$$

# 超新星残骸による破壊

$$\left[ \frac{dM_d}{dt} \right]_{\text{SN}} = \varepsilon D m_{\text{SN}} R_{\text{SN}} = \frac{M_d}{\tau_{\text{SN}}} \quad \tau_{\text{SN}} \equiv \frac{M_{\text{ISM}}}{\varepsilon m_{\text{SN}} R_{\text{SN}}}$$

(e.g., McKee 1989)

SN occurrence rate:

$$R_{\text{SN}}(t) = \int_{8M}^{40M} \Phi(m) S(t - \tau_{\text{lf}}[m]) dm$$

$$\approx 10^{-2} S(t) = 10^{-2} \frac{M_{\text{ISM}}}{\tau_{\text{SF}}}$$

$$\tau_{\text{SN}} \approx \frac{\tau_{\text{SF}}}{10}$$

Effective shocked mass:

$$\varepsilon m_{\text{SN}} \approx 10^3 M_{\text{sun}} \quad (\text{e.g., McKee 1989})$$

# 星間空間での成長

$$\left[ \frac{dM_d}{dt} \right]_{ac} = X_{\text{cold}} N_d \pi \langle a^2 \rangle s_Z \rho_Z^{\text{gas}} \langle v_Z \rangle = \frac{M_d}{\tau_{ac}}$$

Dust particle number:

$$N_d = \frac{3M_d}{4\pi \langle a^3 \rangle \sigma}$$

Density of gas-phase metals:

$$\rho_Z^{\text{gas}} = \rho_Z - \rho_d = Z\rho_{\text{gas}} (1 - \delta)$$

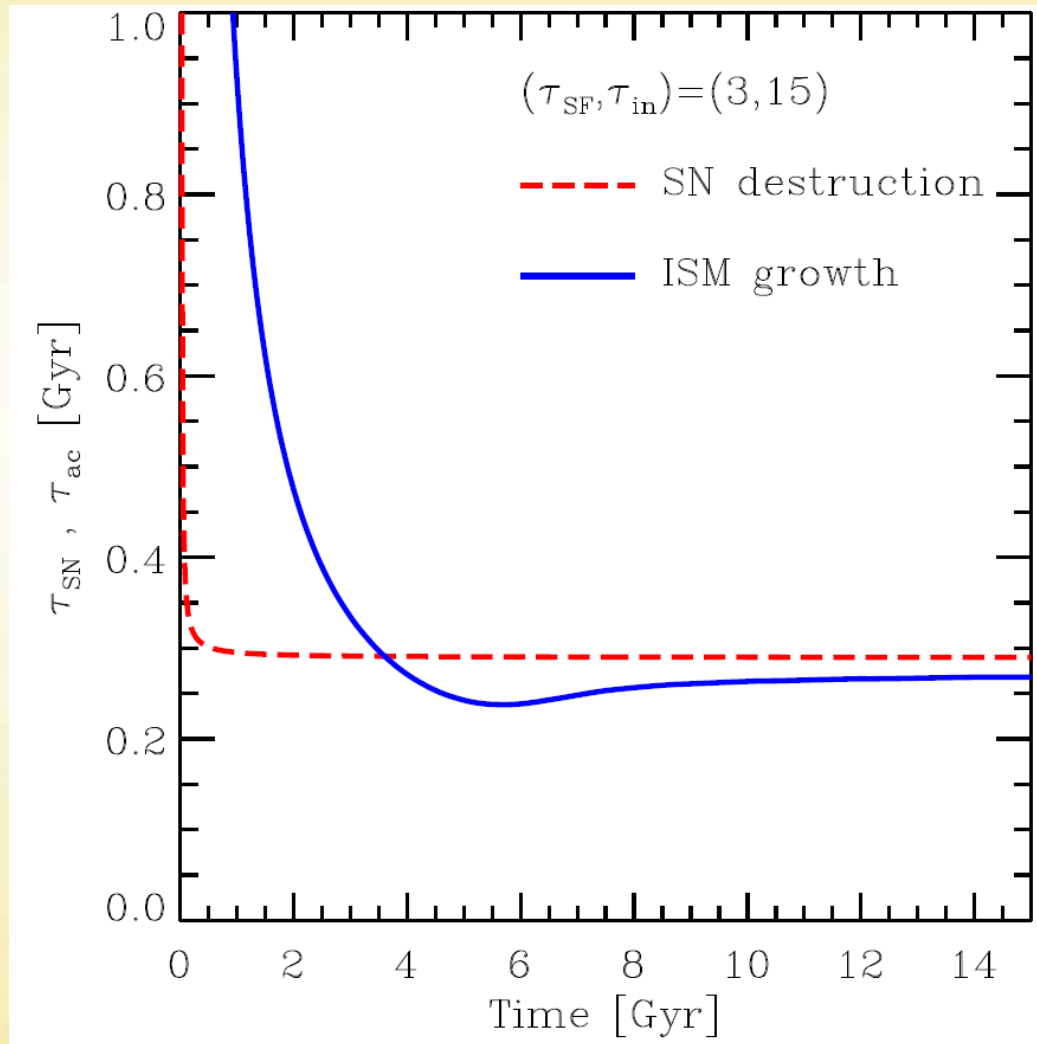
$\delta$ : depletion factor  
(mass fraction in solid state)

$$\tau_{ac} \equiv \frac{4 \langle a^3 \rangle \sigma}{3 X_{\text{cold}} \langle a^2 \rangle s_Z \rho_{\text{gas}} \langle v_Z \rangle Z (1 - \delta)}$$

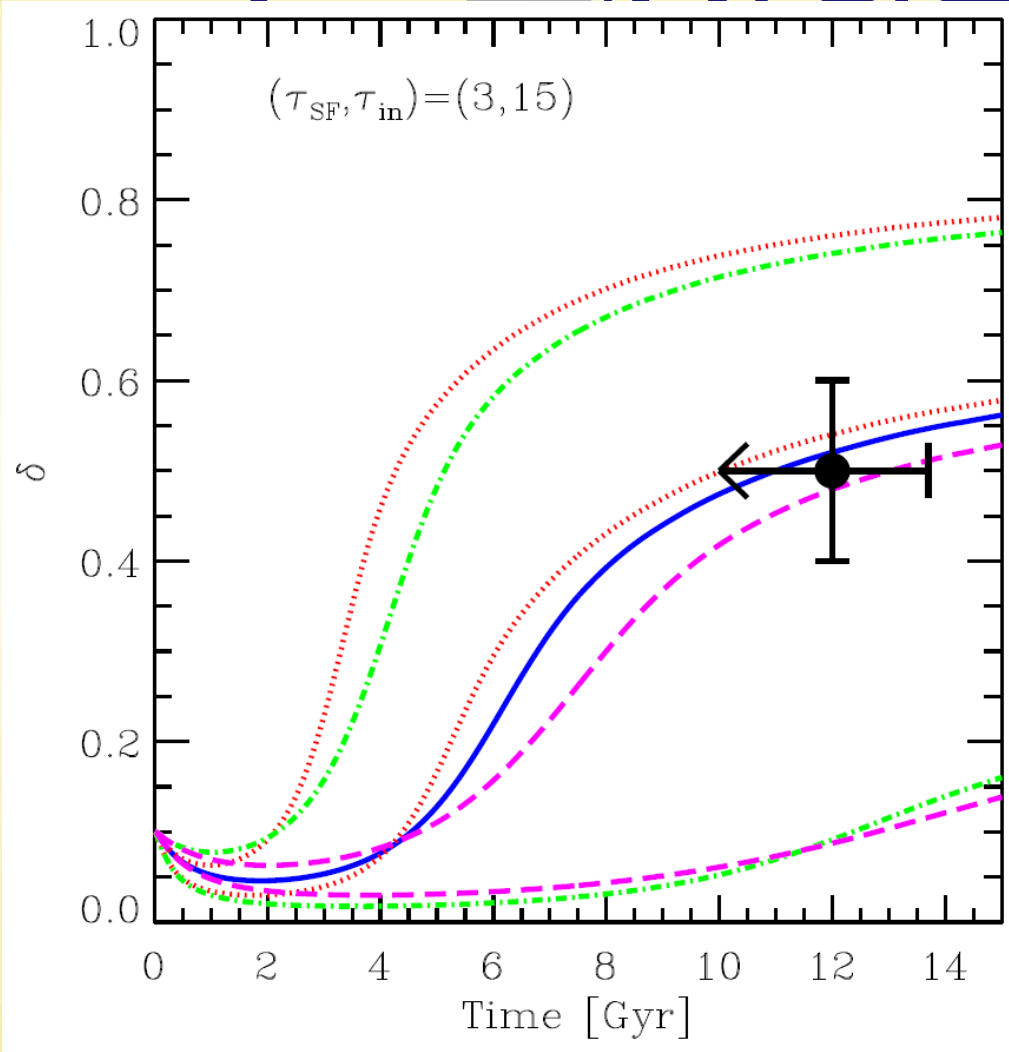
$$\approx \frac{3 \text{ Myr}}{Z(1 - \delta)}$$

$$(\sigma = 3 \text{ g/cm}^3, s_Z = 1, v_Z = 0.2 \text{ km/s}, \rho_{\text{gas}} = 1 \text{e-}22 \text{ g/cm}^3, X_{\text{cold}} = 0.2)$$

# 破壊 vs 成長



# ダスト—金属比進化



成長破壊パラメータ

$\tau_{ac,0} \epsilon m_{SN}$

1.5e3 Myr Msun

3e3 Myr Msun

6e3 Myr Msun

データ: LIC by Kimura et al.(2003)

# 銀河のダスト量決定機構

ダストー金属比の  
時間進化：  
瞬間リサイクル近似  
(IRA)のとき

$$\frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dt} \approx -\frac{\alpha + \epsilon m_{\text{SN}} n_{\text{SN}}}{\tau_{\text{SF}}} + \frac{Z(1 - \delta)}{\tau_{\text{ac},0}}$$

解析解は

$$\delta \approx \frac{\delta_{\infty} \delta_0 \exp(b - a)t}{(\delta_{\infty} - \delta_0) + \delta_0 \exp(b - a)t}$$

$\alpha$  (スターダストの項)は小さい(1のオーダー)ので無視できて、  
 $b > a$ のとき、十分時間が経過後の**漸近値は平衡値**と一致しており

$$1 - \delta_{\infty} = 0.5 \left( \frac{\tau_{\text{ac},0}}{3 \text{ Myr}} \right) \left( \frac{\epsilon m_{\text{SN}}}{10^3 M_{\odot}} \right) \left( \frac{n_{\text{SN}}}{10^{-2} M_{\odot}} \right) \\ \times \left( \frac{3 \text{ Gyr}}{\tau_{\text{SF}}} \right) \left( \frac{0.02}{Z} \right)$$

# 銀河のダスト量決定機構

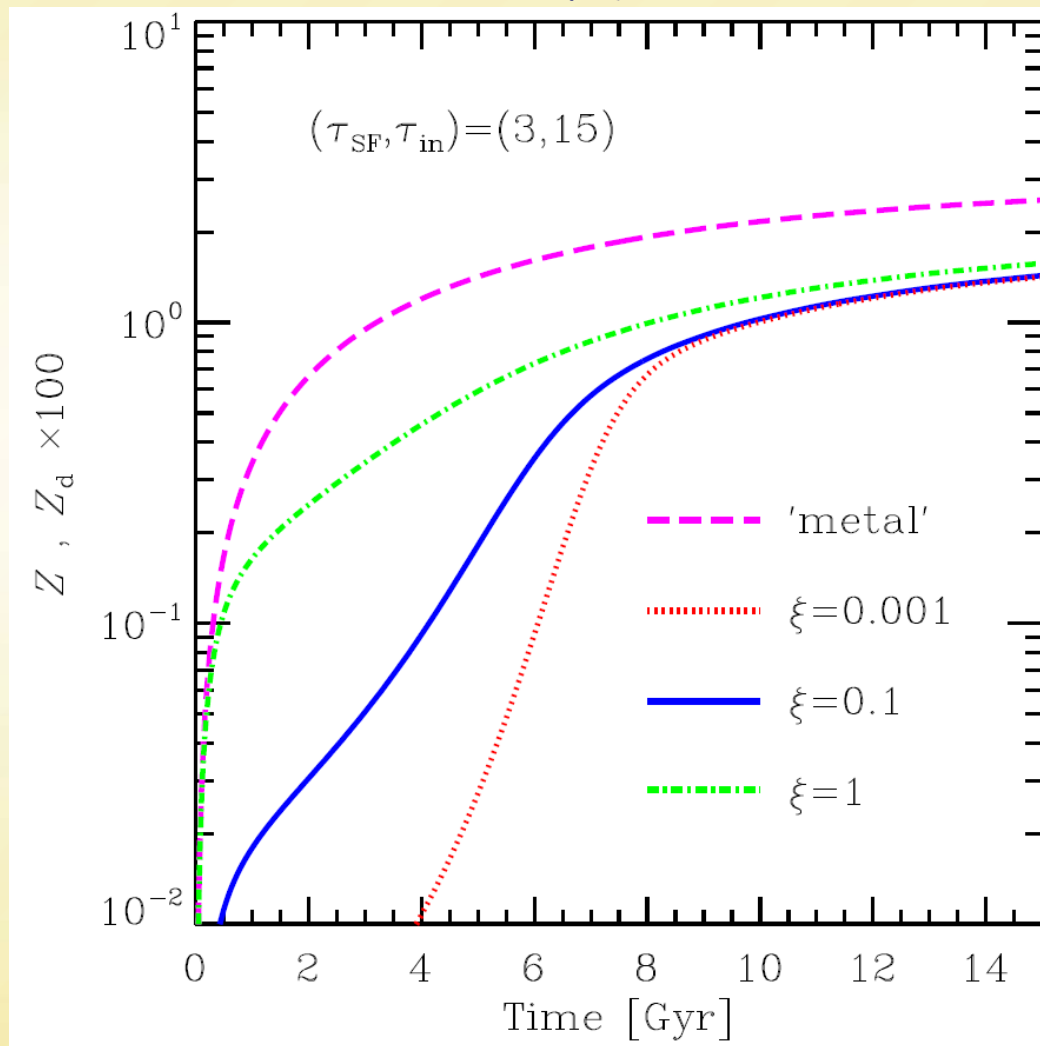
- 銀河のダスト量は、星間成長が効き始めた後は、**超新星破壊と星間成長のつりあい**で決まる
- 星間成長が効き始めるタイミング( $a=b$ のとき)は金属量が、次の閾値を超えたとき

$$Z_c = \frac{\tau_{ac,0} \epsilon m_{SN} n_{SN}}{\tau_{SF}} = 0.01$$

$$\times \left( \frac{\tau_{ac,0}}{3 \text{ Myr}} \right) \left( \frac{\epsilon m_{SN}}{10^3 M_{\odot}} \right) \left( \frac{n_{SN}}{10^{-2} M_{\odot}} \right) \left( \frac{3 \text{ Gyr}}{\tau_{SF}} \right)$$

- 銀河のダスト量は、スターダスト生成率に依らない

# スターダスト生成効率の影響







# まとめ

- 銀河のダスト量進化は、惑星系形成の基礎を与える重要性がある。
  - 引いてはアストロバイオロジーにとっても重要。
- 銀河の化学進化モデルにダストの形成、成長、破壊過程を組み込んで、銀河のダスト量進化を記述できる。
- 超新星爆発衝撃波による破壊率はスターダスト供給率より一桁程度大きい。
  - 星間雲内でのダスト成長が必要。
- 銀河のダスト量は超新星破壊と星間成長がつりあって決まる。
  - 金属量が閾値を超えると星間成長が効き始める。
- 太陽系形成は星間成長が効き始めた後であり、原始惑星系星雲には十分なダスト量があったと考えられる。