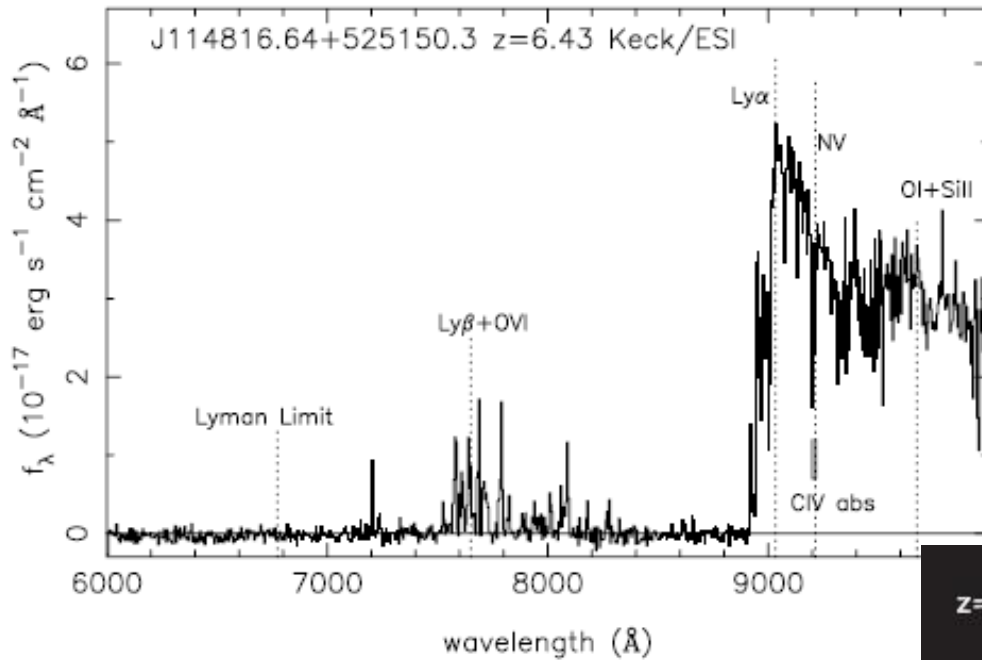


赤方偏移6クエーサーのダスト： ISMでのダスト成長の重要性

井上昭雄
(大阪産業大学)

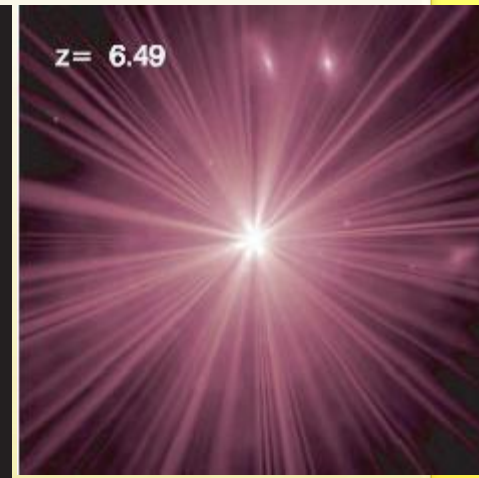
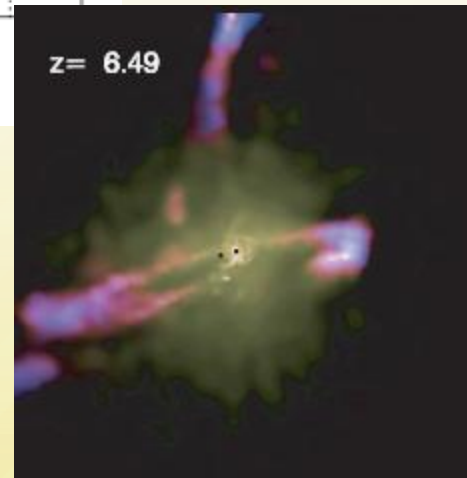
QSO at $z=6.42$

Fan et al.(2003)



Sloan Digital Sky Survey (SDSS)で見つかった最遠方QSO:
SDSS J1148+5251
 赤方偏移: $z=6.42$ (Bertoldi et al.2003; CO lines)
 Blackhole mass: $3 \times 10^9 M_{\text{sun}}$
 (Willott et al.2003; MgII2799)

宇宙年齢: 840 Myr at $z=6.42$
 Λ CDMシナリオにおける構造形成(銀河の形成と合体)により、 $z \sim 6$ で $10^9 M_{\text{sun}}$ のQSO/SMBHを作ることはできる
 (Li et al.2007)



大量のダスト！

SDSS J1148+5251 (z=6.42)

Blackhole mass: 3×10^9 Msun
(Willott et al.2003)

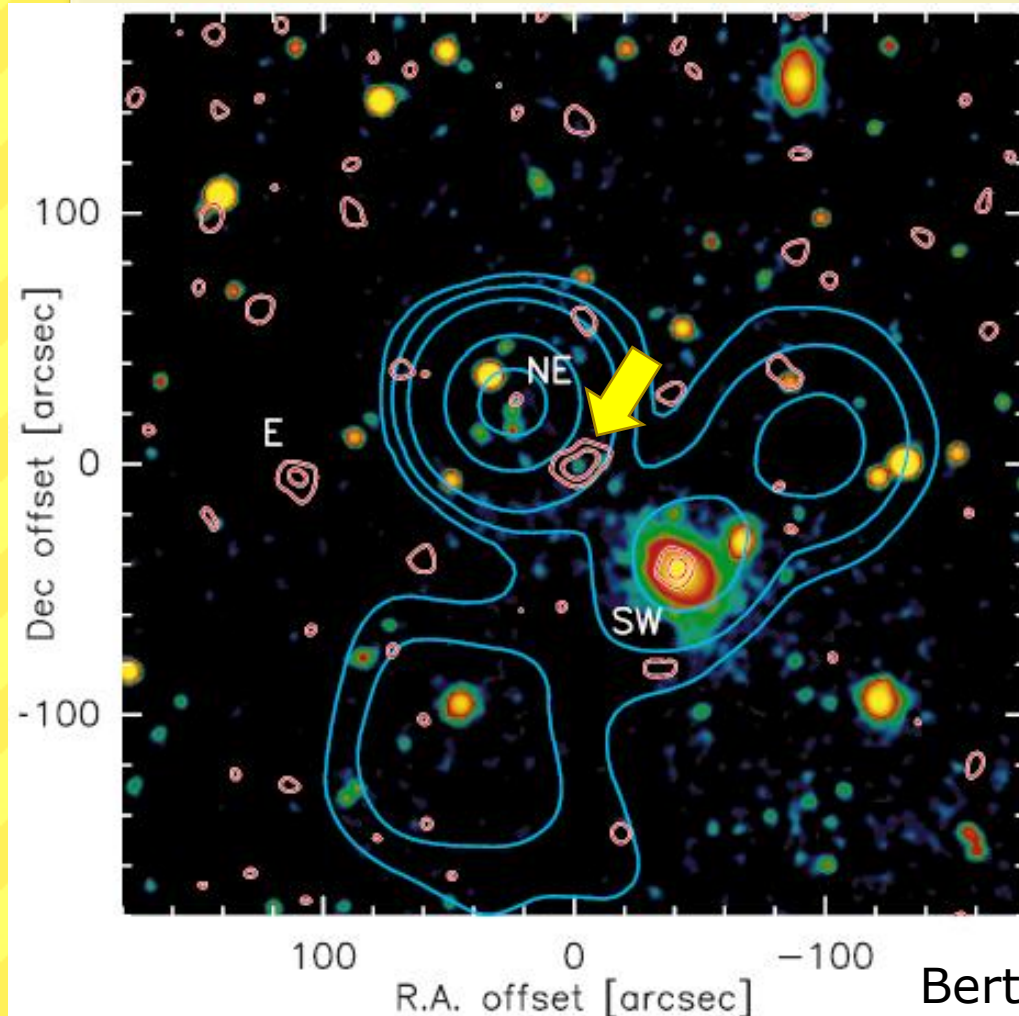
Dust mass: 2×10^8 Msun

Gas mass: 3×10^{10} Msun
(Dwek et al.2007)

Color(green—red—yellow):
SDSS z-band (~ 9134 A)

Pink: IRAM/MAMBO-2
250 GHz (1.2mm)

Blue: VLA 1.4 GHz (21cm)



ダストの起源は？

- 宇宙年齢840Myr以内に $\sim 10^8$ Msunのダスト
 - QSOの年齢はもちろん < 840 Myr
- 現在の銀河系では、Asymptotic Giant Branch (AGB) starsからの寄与が大きい(e.g., Draine 2009)
 - AGB段階への進化にかかる時間： ~ 1 Gyr
- 寿命の短い(< 10 Myr)大質量星の超新星爆発によるダスト供給(Dwek et al.2007)
 - ただし、dust yield > 1 Msun per 1 SNが必要
 - 理論モデルでは $\sim 0.1-1$ Msun per 1 SN (Nozawa et al.2007)
 - 超新星残骸でのダストの観測では $< 0.01-0.1$ Msun per 1 SN
- ~ 5 Msunくらいの星は十分早くAGB段階に至る (Valiante et al.2009)
 - 超新星残骸によるダスト破壊は？
- 星間空間での成長が重要？(Draine 2009)

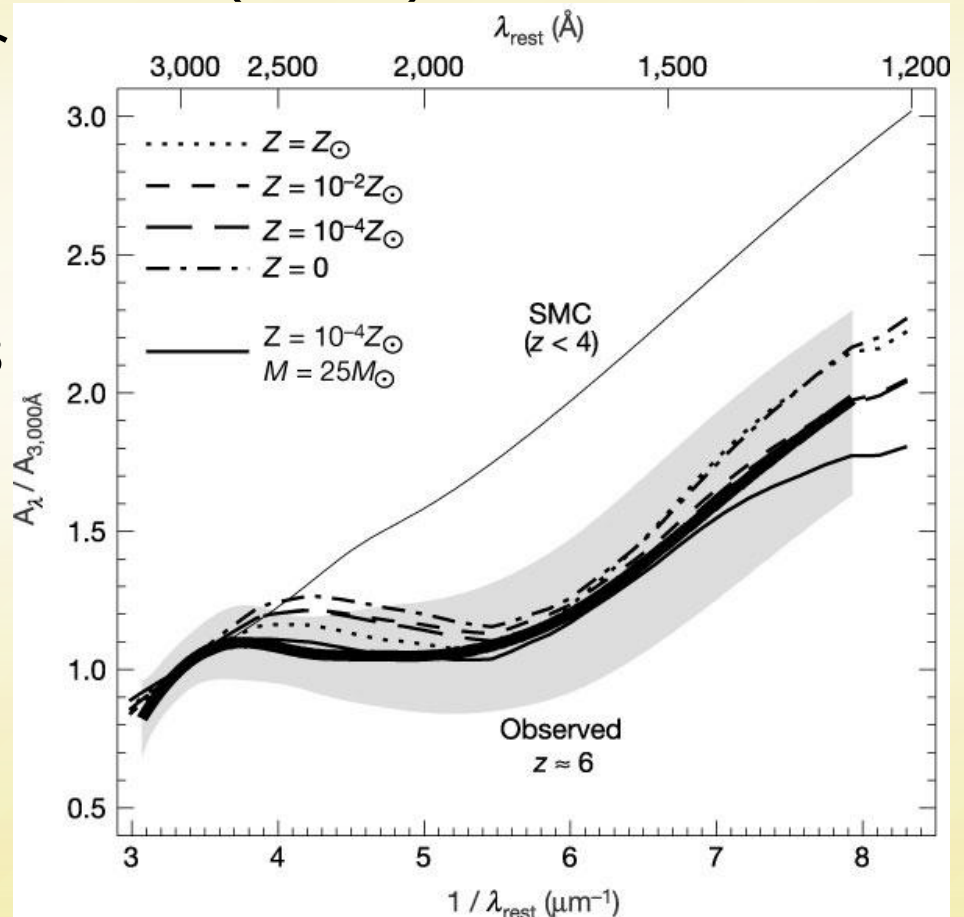
特異な減光曲線？

別の $z \sim 6$ QSO: SDSS J1048+4637 ($z=6.2$)

ダスト減光曲線は、超新星ダストによる予想とおどろくほど合う (Maiolino et al. 2004)

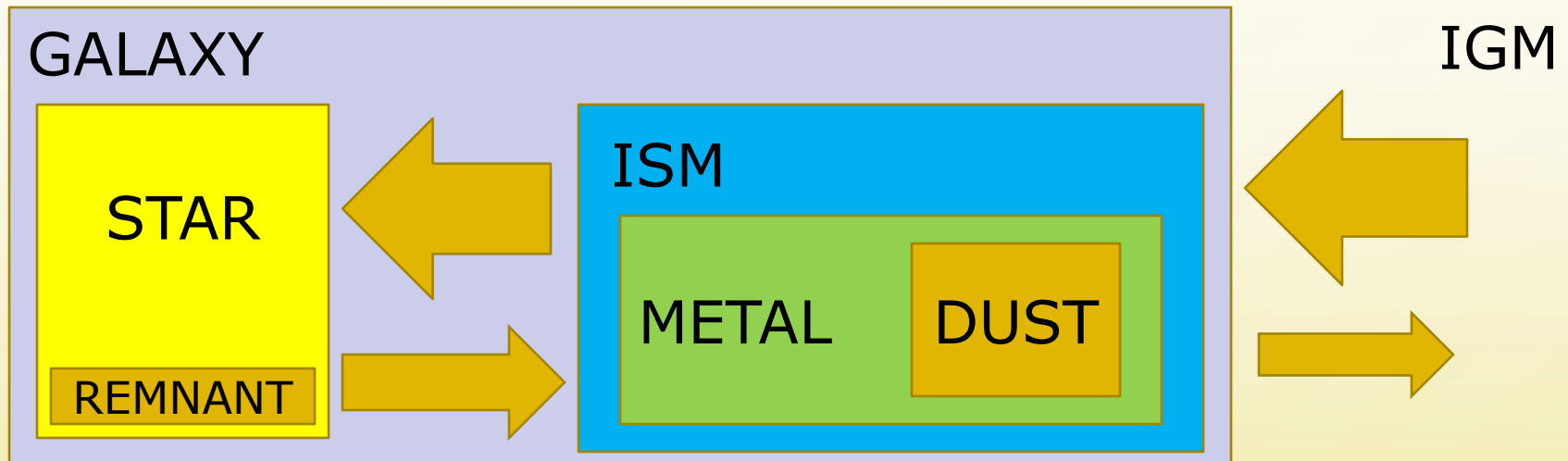
see also

Hirashita et al. 2005, 2008



銀河のダスト量進化モデル

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



銀河のダスト量進化モデル

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

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

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

$$\text{DUST} \quad \frac{dM_d}{dt} = -DS + Y_d - \frac{M_d}{\tau_{\text{SN}}} + \frac{M_d(1-\delta)}{\tau_{\text{ac}}} + I_d + O_d$$

銀河のダスト量進化モデル

$$\text{STAR} \quad \frac{dM_*}{dt} = \frac{M_{\text{ISM}}}{\tau_{\text{SF}}} - R \quad S = \frac{M_{\text{ISM}}}{\tau_{\text{SF}}}$$

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

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

$$\text{DUST} \quad \frac{dM_d}{dt} = -\frac{M_d}{\tau_{\text{SF}}} + Y_d - \frac{M_d}{\tau_{\text{SN}}} + \frac{M_d(1-\delta)}{\tau_{\text{ac}}} + I_d + O_d$$

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)

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

超新星残骸による破壊

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

(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:

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

星間空間での成長

$$\left[\frac{dM_d}{dt} \right]_{ac} = N_d \pi \langle a^2 \rangle s_Z \rho_Z^{\text{gas}} \langle v_Z \rangle = \frac{M_d (1 - \delta)}{\tau_{ac}}$$

Dust particle number:

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

Density of gas-phase metals:

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

δ : depletion factor
(mass fraction in solid state)

$$\tau_{ac} \equiv \frac{4 \langle a^3 \rangle \sigma}{3 \langle a^2 \rangle s_Z \rho_{\text{gas}} \langle v_Z \rangle Z}$$

($\sigma = 3 \text{ g/cm}^3$, $s_Z = 1$, ^{56}Fe の場合)

$$\approx \underline{3 \times 10^7 \text{ yr}} \left(\frac{a}{0.1 \mu\text{m}} \right) \left(\frac{n}{100 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{100 \text{ K}} \right)^{-1/2} \left(\frac{Z}{0.02} \right)^{-1}$$

タイムスケール比較1:銀河系

$$\frac{dM_d}{dt} = -\frac{M_d}{\tau_{SF}} + \frac{M_d}{\tau_*} - \frac{M_d}{\tau_{SN}} + \frac{M_d(1-\delta)}{\tau_{ac}}$$

$$\tau_{SF} \approx \tau_* \approx 10\tau_{SN} \approx 5 \times 10^9 \text{ yr}$$

$$\tau_{ac} \approx 3 \times 10^7 \text{ yr} \left(\frac{a}{0.1 \mu\text{m}} \right) \left(\frac{n}{100 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{100 \text{ K}} \right)^{-1/2} \left(\frac{Z}{0.02} \right)^{-1}$$

$$\tau_{SF} \approx \tau_* \gg \tau_{SN} \approx \tau_{ac} / (1-\delta) \quad \delta \approx 0.9$$

(in gas clouds)

ダスト量はSN破壊とISM成長のつりあい決まる

タイムスケール比較2: z=6 QSO

$$\frac{dM_d}{dt} = -\frac{M_d}{\tau_{SF}} + \frac{M_d}{\tau_*} - \frac{M_d}{\tau_{SN}} + \frac{M_d(1-\delta)}{\tau_{ac}}$$

$$\tau_{SF} \approx \tau_* \approx 10\tau_{SN} \approx \underline{1 \times 10^8 \text{ yr}}$$

$$\tau_{ac} \approx 3 \times 10^7 \text{ yr} \left(\frac{a}{0.1 \mu\text{m}} \right) \left(\frac{n}{100 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{100 \text{ K}} \right)^{-1/2} \left(\frac{Z}{0.02} \right)^{-1}$$

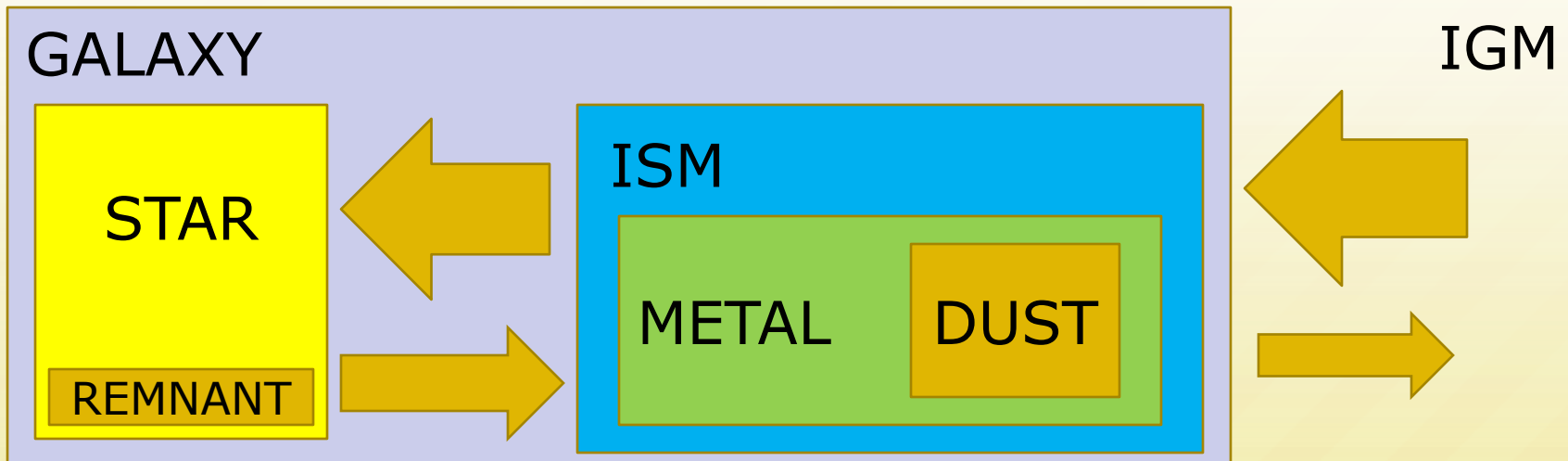
$$\tau_{SF} \approx \tau_* \gg \tau_{SN} \approx \tau_{ac} / (1-\delta) \quad \delta \approx 0$$

(in gas clouds)

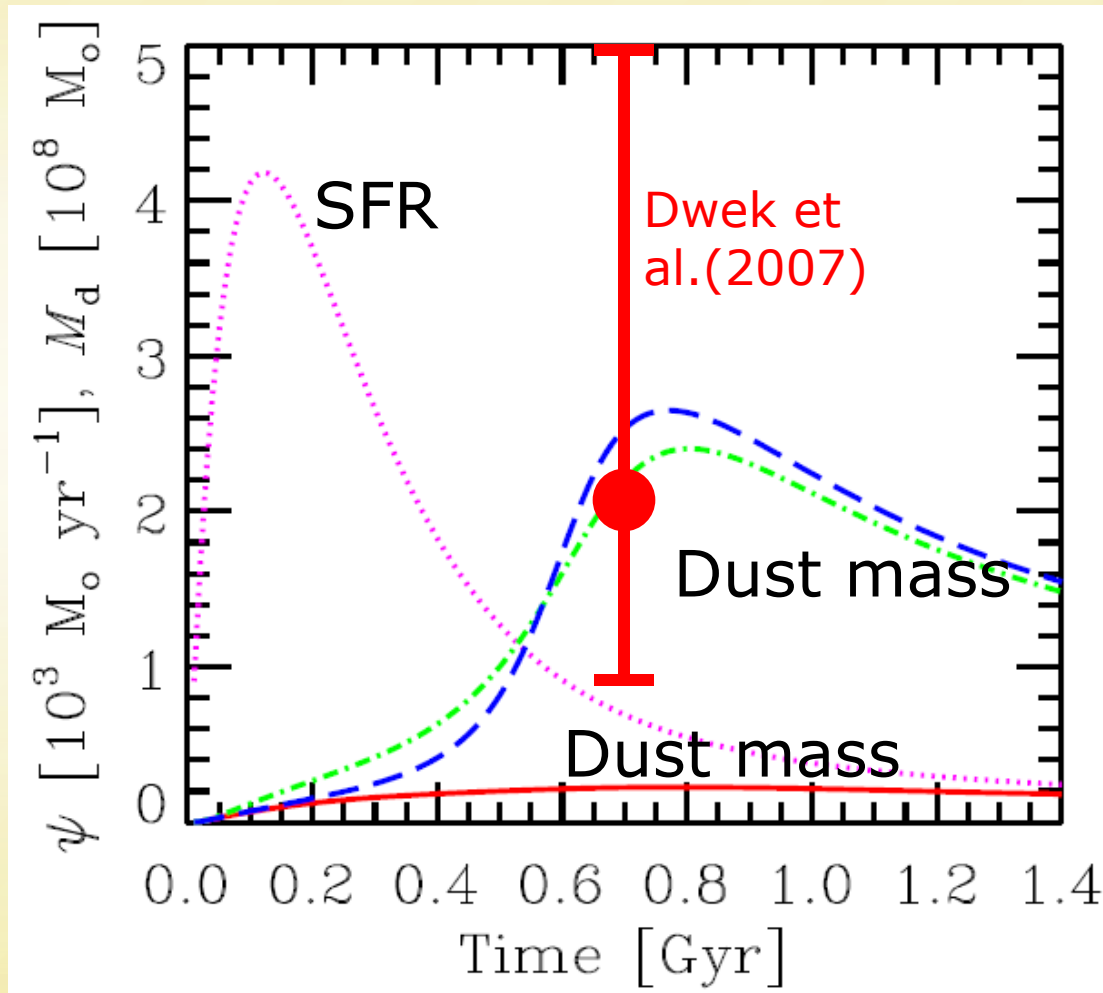
ダスト量はSN破壊とISM成長のつりあいで決まる

z=6 QSOの詳しい計算：設定

- One-zone, one-phase ISM
- Primordial gas infall有り、outflow無し
- SF timescale = Infall timescale = 1×10^8 yr
- Total gas reservoir = $1 \times 10^{12} M_{\text{sun}}$
- SNe, AGB starsによるダスト形成 ($m_d = 1 \times 10^{-2} M_{\text{sun}}$)
- Finite stellar life-time考慮



z=6 QSOの詳しい計算：結果1



SFR: dotted line

Dust mass

solid line:

$$\epsilon m_{\text{SN}} = 1 \times 10^3 M_{\text{sun}}$$

$$\tau_{\text{ac},0} = 1 \times 10^7 \text{ yr}$$

dashed line:

$$\epsilon m_{\text{SN}} = 1 \times 10^3 M_{\text{sun}}$$

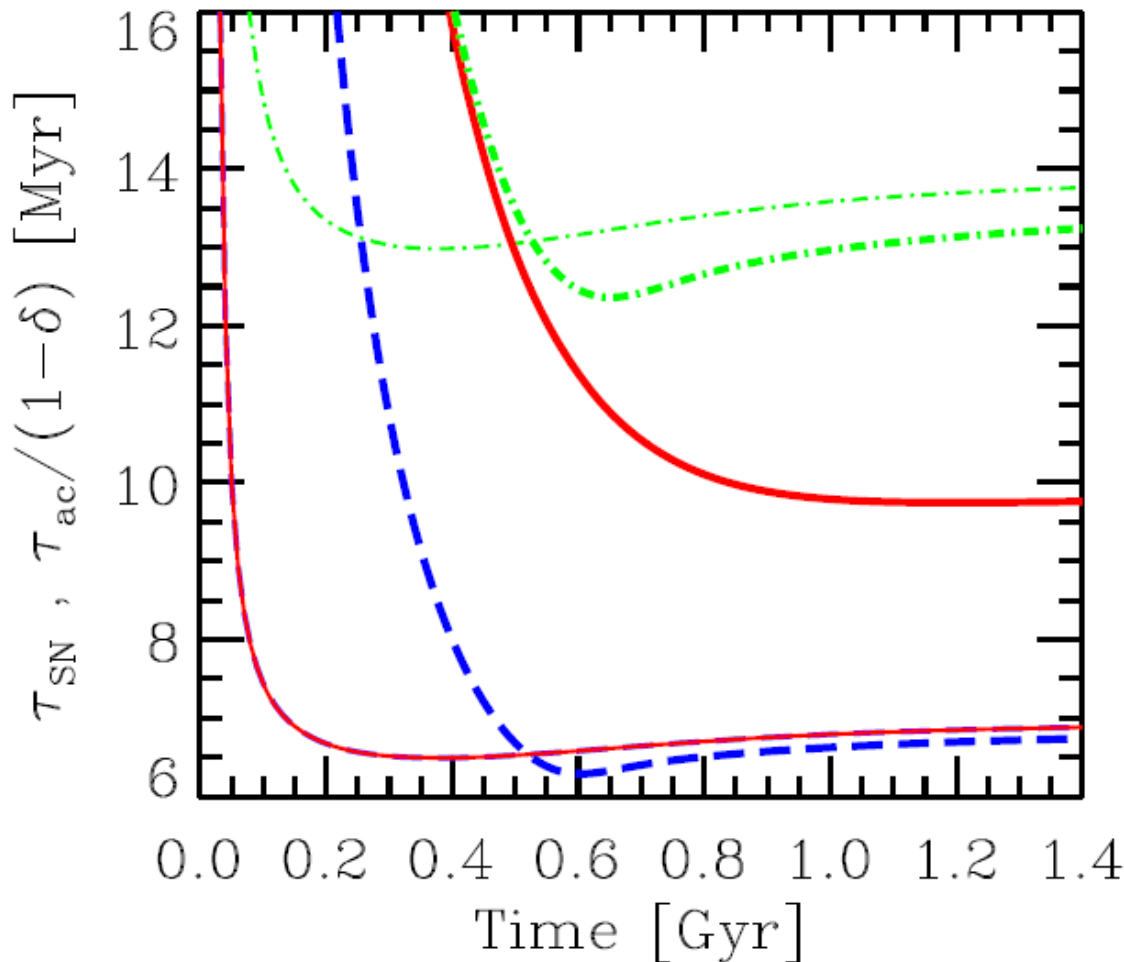
$$\tau_{\text{ac},0} = 5 \times 10^6 \text{ yr}$$

dot-dashed line:

$$\epsilon m_{\text{SN}} = 5 \times 10^2 M_{\text{sun}}$$

$$\tau_{\text{ac},0} = 1 \times 10^7 \text{ yr}$$

z=6 QSOの詳しい計算：結果2



thick: ISM growth
 thin: SN destruction

solid line:

$$\epsilon m_{SN} = 1 \times 10^3 M_{\text{sun}}$$

$$\tau_{ac,0} = 1 \times 10^7 \text{ yr}$$

dashed line:

$$\epsilon m_{SN} = 1 \times 10^3 M_{\text{sun}}$$

$$\tau_{ac,0} = 5 \times 10^6 \text{ yr}$$

dot-dashed line:

$$\epsilon m_{SN} = 5 \times 10^2 M_{\text{sun}}$$

$$\tau_{ac,0} = 1 \times 10^7 \text{ yr}$$

ダスト量決定機構は普遍的？

- 現在の銀河系でも、 $z=6$ QSOでも、**超新星残骸による破壊と星間空間での成長**がつりあって、ダスト量は決まっている ⇒ **普遍的な機構**
- 組成やサイズ分布も普遍的になるか？
 - “seed”の種類によって成長するダスト種が異なる？
- **そもそも、星間空間での降着でどんなダストができるのか？ ⇒ 要実験！**
- その他：成長率の見積もりについて (Draine 2009)
 - 帯電の影響は？
 - PAHは負に帯電し、金属イオンを捕獲しやすい(Weingartner & Draine 1999)
 - 星間乱流によりダスト粒子とガスの相対速度が熱速度以上に大きくなりうる(Yan et al. 2004)