

# 星間ダストの起源と量

(On the origin and amount of interstellar dust)

野沢 貴也 (Takaya Nozawa)

(国立天文台 理論研究部)

## 共同研究者

田中 秀和、田中 今日子、大向 一行、仲内 大翼 (東北大)

浅野 良輔、竹内 努 (名古屋大)、平下 博之 (ASIAA)

# 1-1. 銀河系の星間ダストの性質

## ○ 銀河系の星間ダストモデル

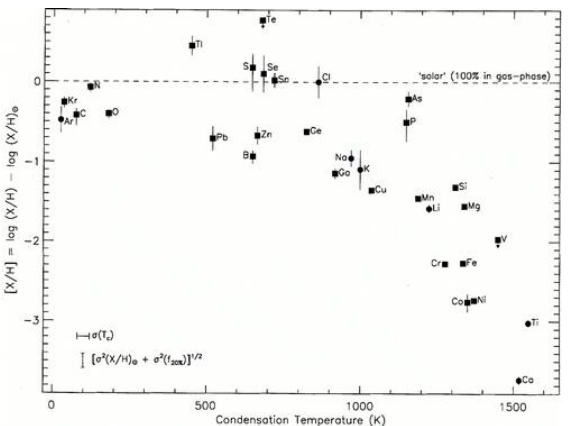
(Mathis, Rumpl, & Nordsieck 1977, Weingartner & Draine 2001, Zubko+2004, etc)

- 組成: 炭素質(グラファイトなど)とシリケート質
- サイズ分布: 冪分布(MRNモデル)  
 $n(a) \propto a^{-q}$  with  $q=3.5$ ,  $a = 0.005-0.25 \mu\text{m}$
- 存在量:  $M_{\text{dust}} / M_{\text{H}} = 1/120 \sim 0.01$

→ 重元素のおよそ半分(~40%)はダストとして存在

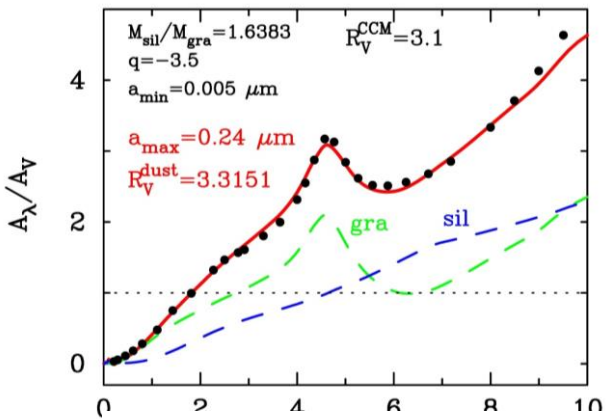


星間ガスのdepletion



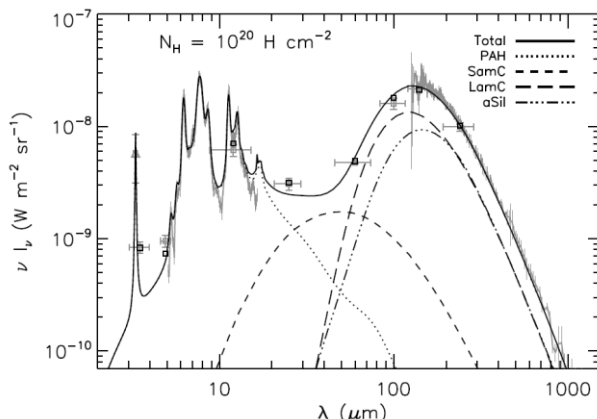
Savage & Sembach (1996)

星間減光



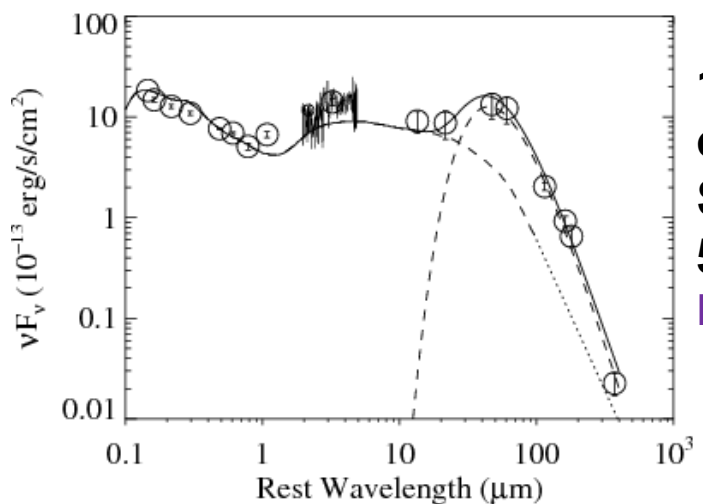
Nozawa & Fukugita (2013)

赤外線放射

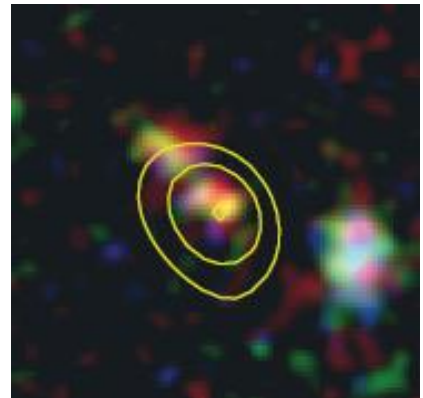


Compiegne et al. (2011)

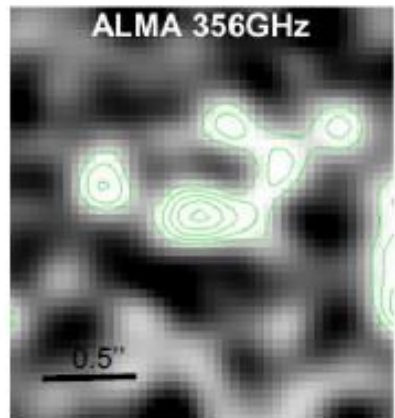
# 1-2. 高赤方偏移銀河のダストの観測



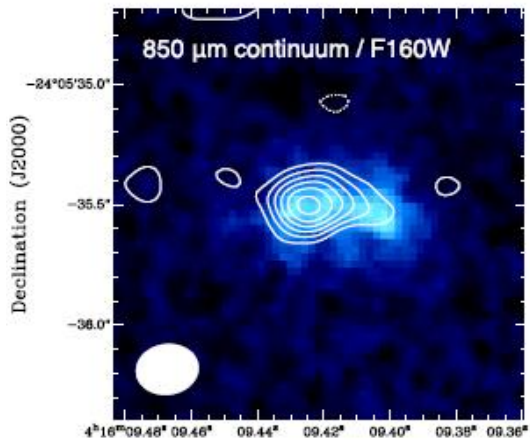
**$10^8$ - $10^9$  Msun  
of dust in  
SDSS J1148+  
5251 at  $z=6.4$   
Leipski+2010**



**$\sim 2 \times 10^7$  Msun of  
dust in a normal  
star-forming  
galaxy A1689-  
zD1 at  $z=7.5$   
Watson+2015**



**$\sim 6 \times 10^6$  Msun of  
dust in a star-  
forming galaxy  
A2744-YD4 at  
 $z=8.38$   
Laporte+2017**

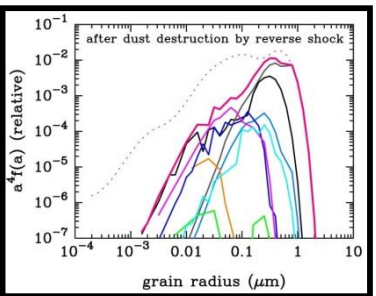


**$\sim 6 \times 10^6$  Msun of  
dust in a LBG  
MACS0416\_Y1  
at  $z=8.312$   
Tamura+2018**

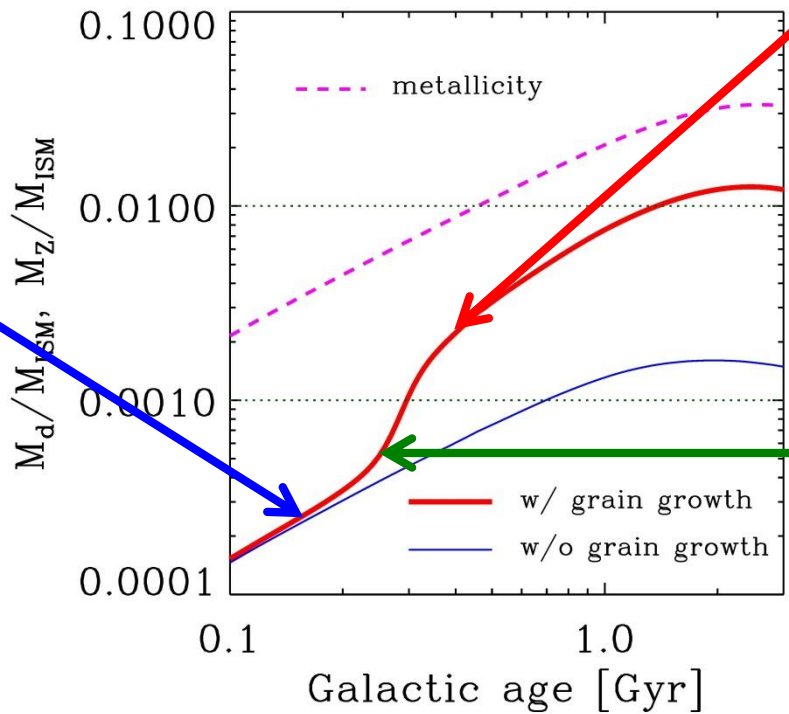
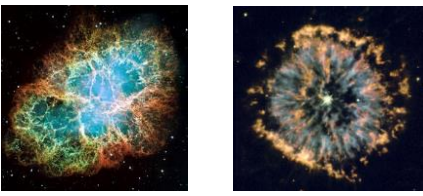
**高赤方偏移銀河のダスト供給源は超新星？ AGB星？**

# 2-1. 星間ダスト量の時間進化

① 超新星・AGB星からのダスト供給  
 -  $a \sim 0.1 \mu\text{m}$   
 -  $M_{\text{dust}}/M_{\text{metal}} \sim 0.2$

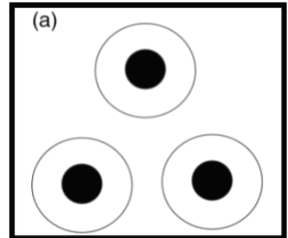


Nozawa et al. (2007)

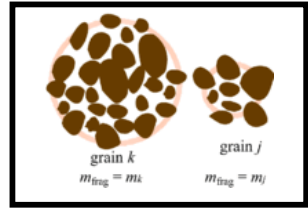


Nozawa, Asano Takeuchi, Hirashita (2015)

③ 分子雲での金属ガス降着によるダスト成長



② ダストガス比  $\sim 0.001$   
 星間乱流中の衝撃破砕による  $0.01 \mu\text{m}$  以下の小さいダストの生成



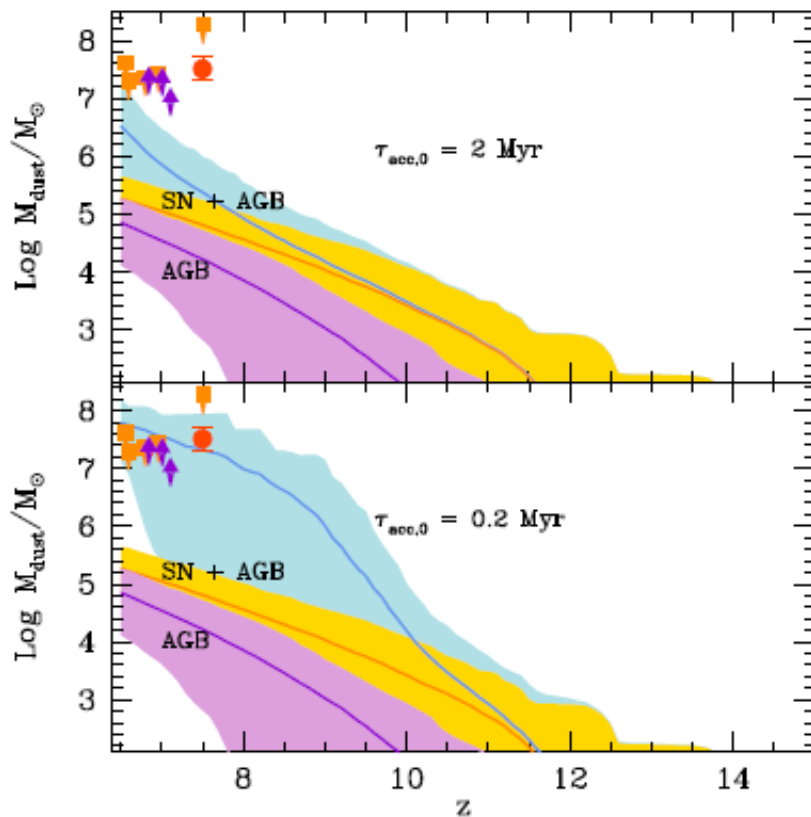
## ○ 分子雲でのダスト成長のタイムスケール

$$\tau_{\text{grow}} \simeq 2 \times 10^7 \left( \frac{p_s}{1.0} \right)^{-1} \left( \frac{n_{\text{gas}}}{100 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{50 \text{ K}} \right)^{-0.5} \left( \frac{Z}{0.02} \right)^{-1} \left( \frac{a}{0.1 \mu\text{m}} \right) \text{ yr}$$

## 2-2. ダスト成長のタイムスケール

### ○ 分子雲でのダスト成長のタイムスケール

$$\tau_{\text{grow}} \simeq 2 \times 10^7 \left( \frac{p_s}{1.0} \right)^{-1} \left( \frac{n_{\text{gas}}}{100 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{50 \text{ K}} \right)^{-0.5} \left( \frac{Z}{0.02} \right)^{-1} \left( \frac{a}{0.1 \mu\text{m}} \right) \text{ yr}$$



Mancini et al. (2015)

### ○ ダスト進化のコンセンサス

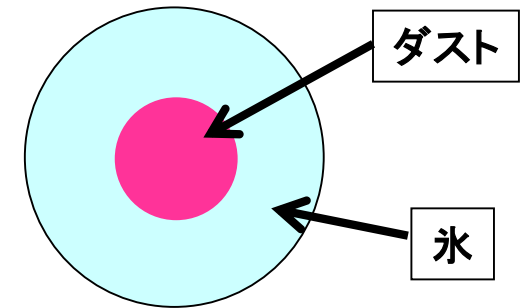
星間ダストの総量を説明するには  
分子雲中でのダスト成長が必要

(Dwek 1998; Inoue 2003, 2011;  
Zhukovska+2008, 2016; Draine 2009;  
Michalowski+2010, 2015;  
Gall+2011a, 2011b; Mattsson 2011;  
Pipino+2011; Kuo & Hirashita 2012;  
Valiante+2011, 2014; Mancini+2015;  
Asano+2013a, 2013b, 2014;  
Calura+2014; Nozawa+2015;  
Aoyama+2017; Hou+2017;  
Hirashita & Nozawa 2017)

## 2-3. 分子雲でのダスト成長は本当に起こるのか？

### ○ ダスト表面での氷マンテル形成？

- 高密度分子雲 ( $n > \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ) ではダスト表面に氷のマンテルが形成され、その結果ダストの成長は阻害される (Ferrara+2016)

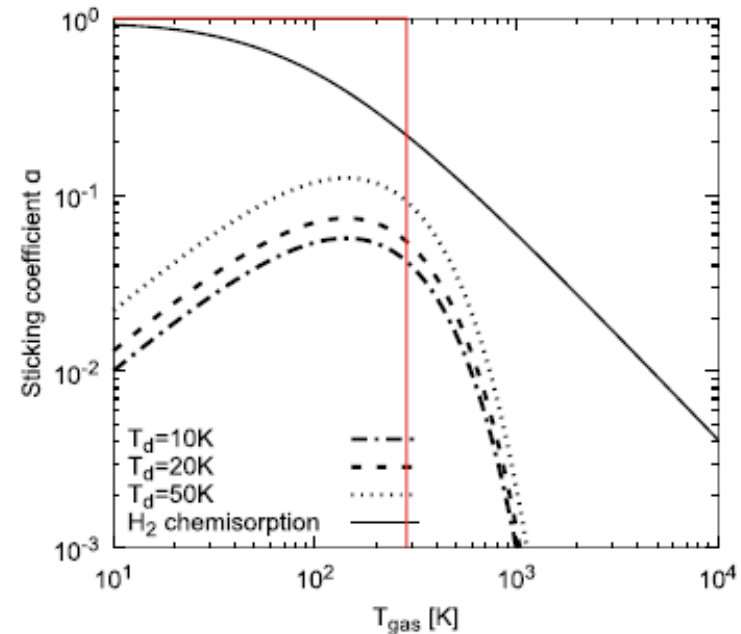


### ○ 宇宙初期ではダスト温度が高い？

- $T_{\text{dust}} \sim 20 \text{ K}$  ( $T_{\text{gas}} \sim T_{\text{CMB}} \sim 30\text{-}50 \text{ K}$ )  
→ ダスト表面からガスが脱着しやすい (Ferrara+2016)

### ○ 付着確率は1で良いのか？

- 0.01-0.1が妥当？  
→ ダスト成長のタイムスケールは長くなる



Zhukovska+2016

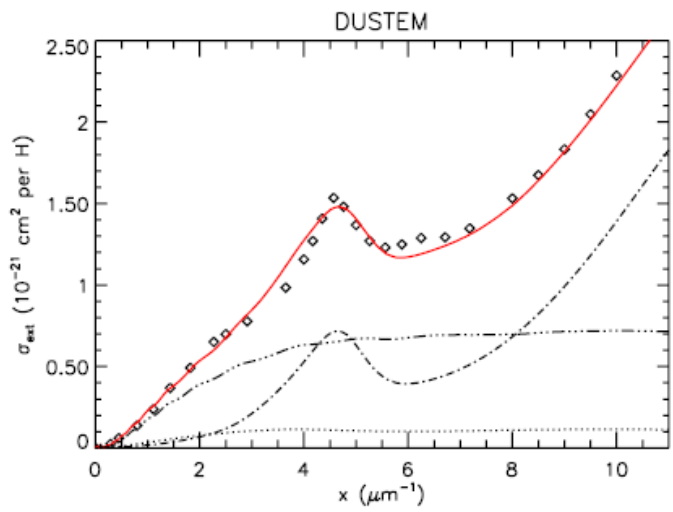
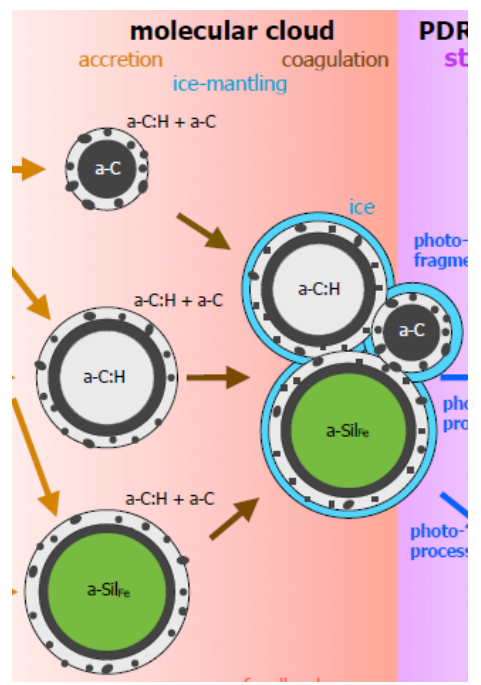
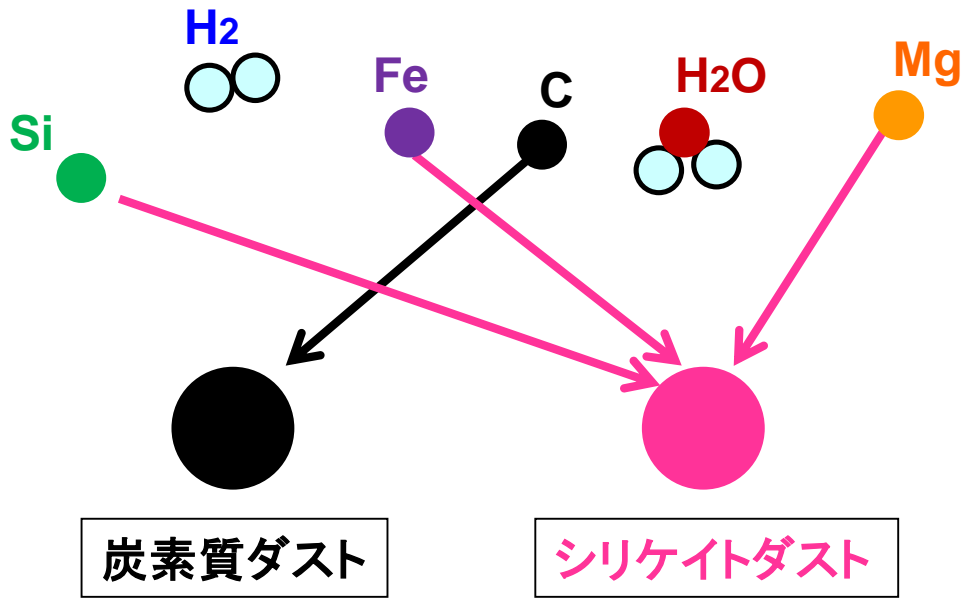
# 2-4. 分子雲でのダスト成長は本当に起こるのか？

## ○ ふわふわのダストができてしまう？

- 結合が弱いと、付着した原子は脱着しやすい

## ○ ダストの選択的成長？ (Jones&Nuth2011)

- Si, Mg, Fe, O → シリケートダスト
- C → 炭素質ダスト



Jones+2013, 2016, 2017



# Q1. 分子雲中でのガス降着によるダスト成長は本当に起こるのか？

## ○ 星間ダスト総量 (dust-to-metal ratio)

超新星・AGB星からの供給だけでは足りない



別の星間ダストのソースが必要

→ 分子雲での重元素ガス降着によるダスト成長

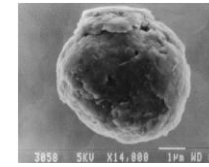


- 分子雲中でダストは効率的に成長することができるのか？
- ダスト成長は観測から導かれた星間ダストモデルと整合的か？

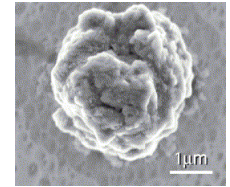


# 3-1. プレソーラー粒子

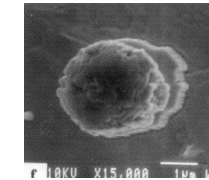
- 始原的隕石・惑星間塵 (IDPs) 中で発見される
- 同位体異常を示す
  - 太陽系物質とは全く異なる同位体組成
  - ## 太陽系物質の同位体組成は数%で均一
- 太陽系外で(太陽系形成以前に)、超新星や AGB 星で形成されたダストの生き残り
- 組成 : graphite, SiC, TiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, MgSiO<sub>3</sub> ...
- 存在量 (測定量 by 体積充填率)
  - ・ 始原的隕石中 : ~0.01 %
  - ・ 惑星間塵 (IDPs) 中 : ~0.05 %



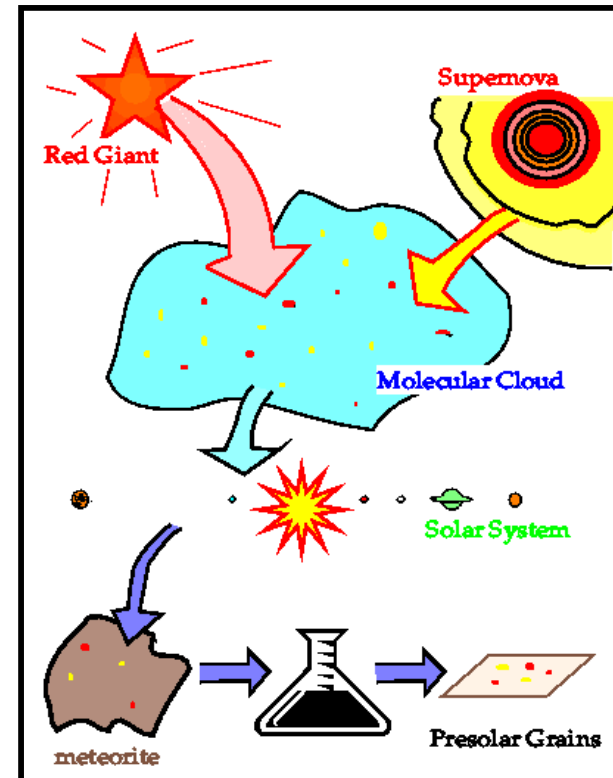
© Amari, S.



Nittler 2003



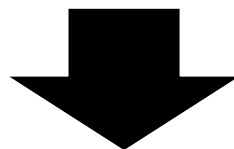
Nittler+1997



## Q2. なぜプレソーラー粒子の存在量は 0.01%程度と非常に小さいのか？

### ○ プレソーラー粒子

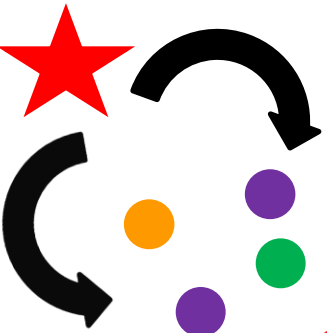
始原的隕石・惑星間塵で発見される星(超新星・AGB星)  
起源のダストの生き残り



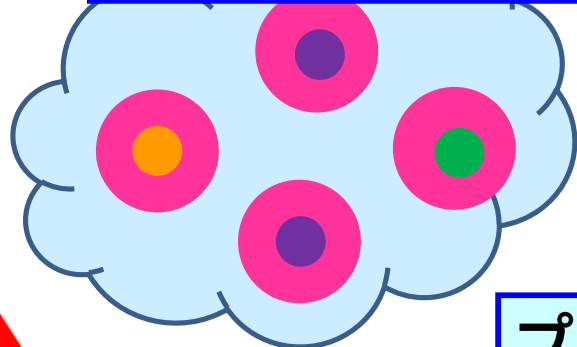
- 星間ダストが惑星の原材料であるならば、プレソーラー粒子の存在量はもっと高くて良いはず
- 太陽系物質の同位体組成はなぜ極めて均一であるのか？

# 4-1. 星間ダストの進化とプレソーラー粒子

超新星・AGB星  
でのダスト形成

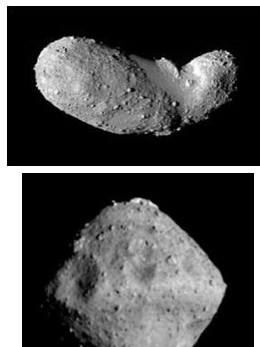


分子雲でのダスト  
成長は整合的か？



集積

微惑星・  
惑星形成



隕石

プレソーラー粒子  
存在量：~10%

プレソーラー粒子  
をコアとしたマント  
ル組成であるはず

プレソーラー粒子の  
平均同位体は太陽系  
組成と合わない

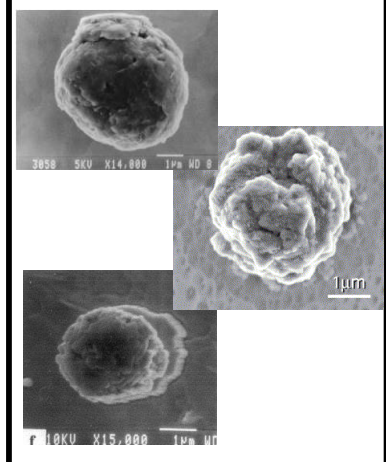
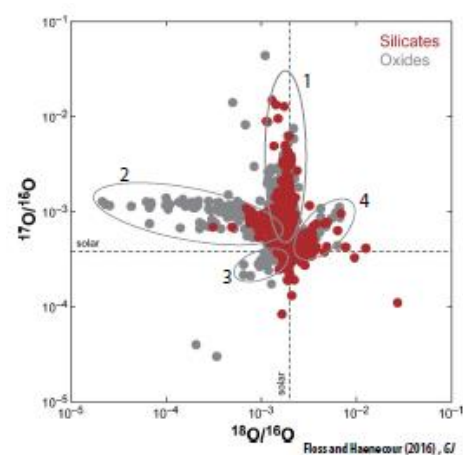
プレソーラー粒子  
存在量：~0.01%

プレソーラー粒子の  
ふりかけ説 by ゆり本さんなど

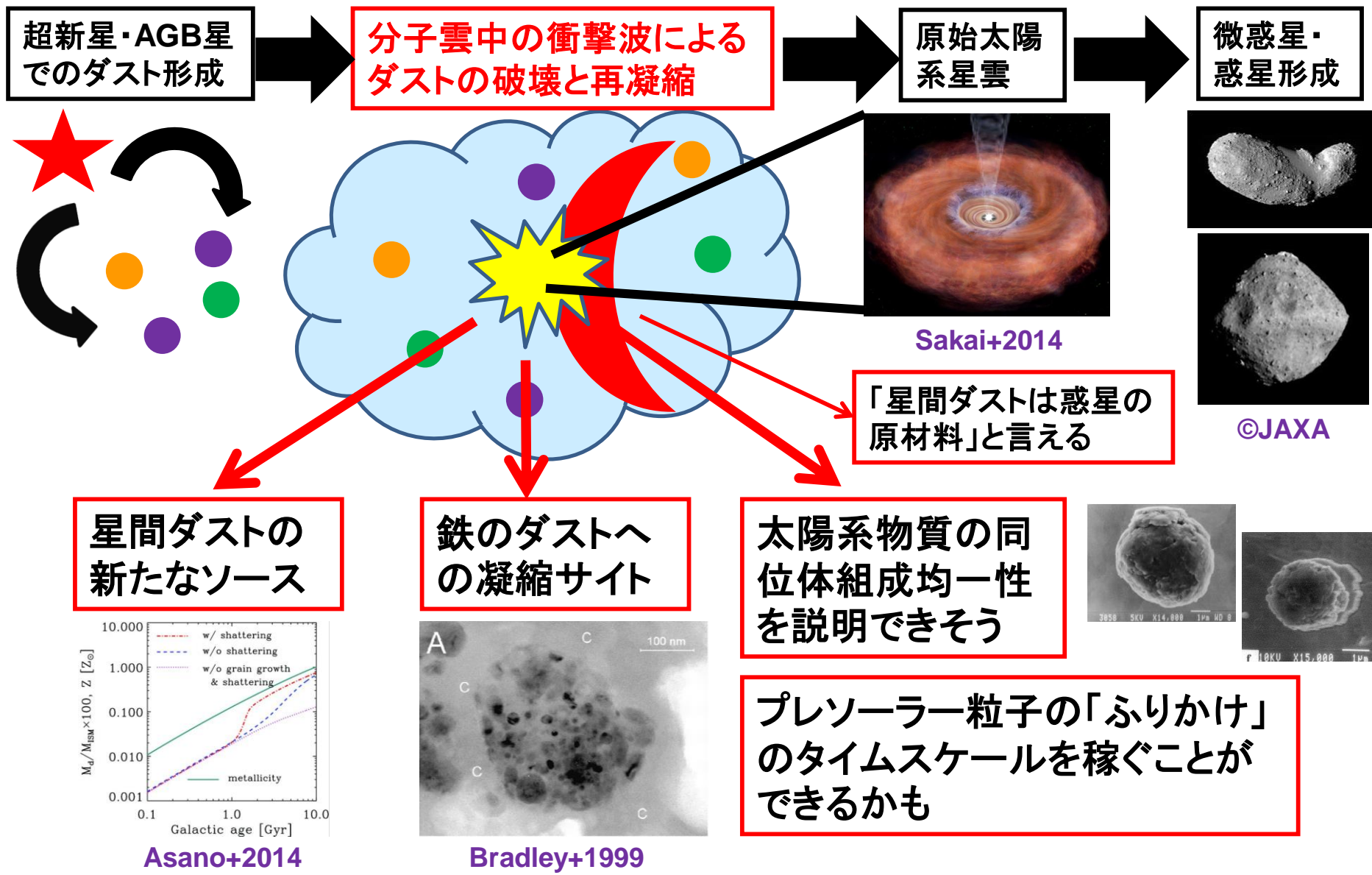
すべてのダストを蒸発  
させることは可能か？



Sakai+2014, Nakamoto et al.



# 4-2. 分子雲中でのガス相からのダストの凝縮

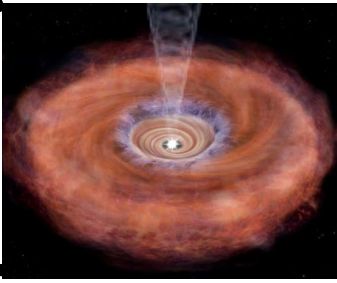


超新星・AGB星  
でのダスト形成

分子雲中の衝撃波による  
ダストの破壊と再凝縮

原始太陽  
系星雲

微惑星・  
惑星形成



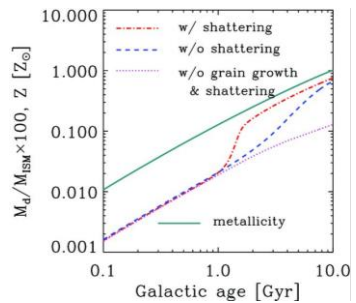
Sakai+2014



©JAXA

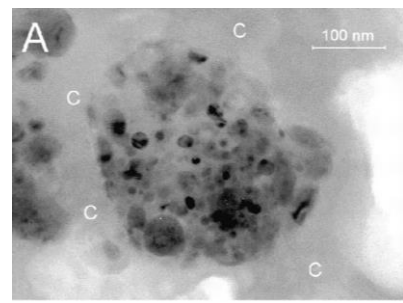
「星間ダストは惑星の  
原材料」と言える

星間ダストの  
新たなソース



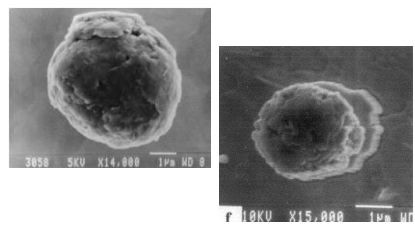
Asano+2014

鉄のダストへ  
の凝縮サイト



Bradley+1999

太陽系物質の同  
位体組成均一性  
を説明できそう



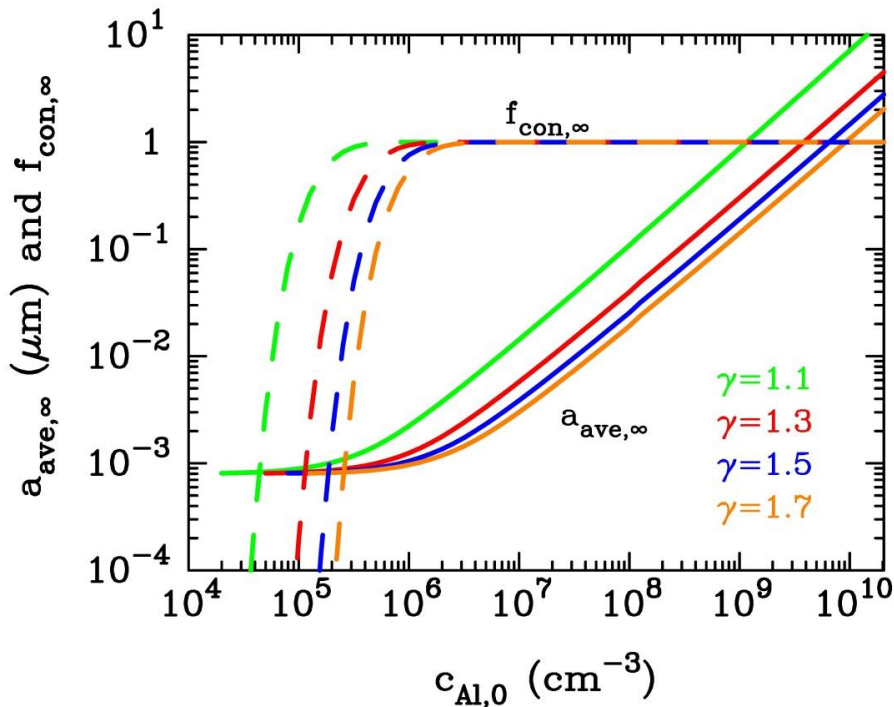
プレソーラー粒子の「ふりかけ」  
のタイムスケールを稼ぐことが  
できるかも

# 5-1. ダストの凝縮条件

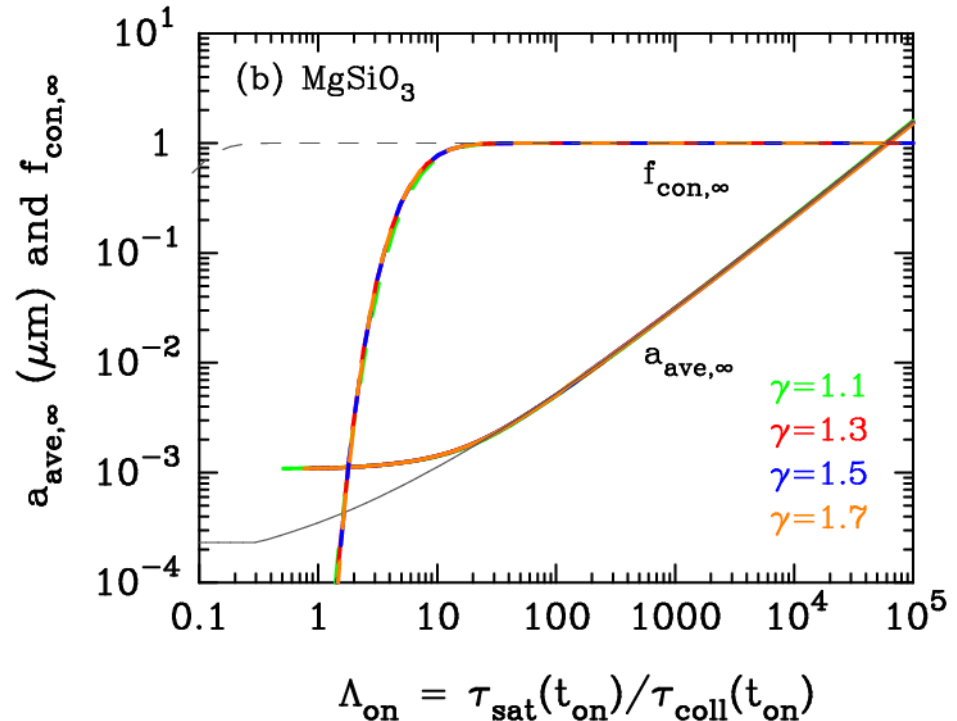
○  $\Lambda_{\text{on}} = T_{\text{sat}}/T_{\text{coll}} \propto T_{\text{cool}} n_{\text{gas}}$

- $T_{\text{sat}}$  : 過飽和比が増加するタイムスケール
- $T_{\text{coll}}$  : ガスの衝突のタイムスケール

○ ダストが凝縮する条件 :  $\Lambda_{\text{on}} > \sim 1$

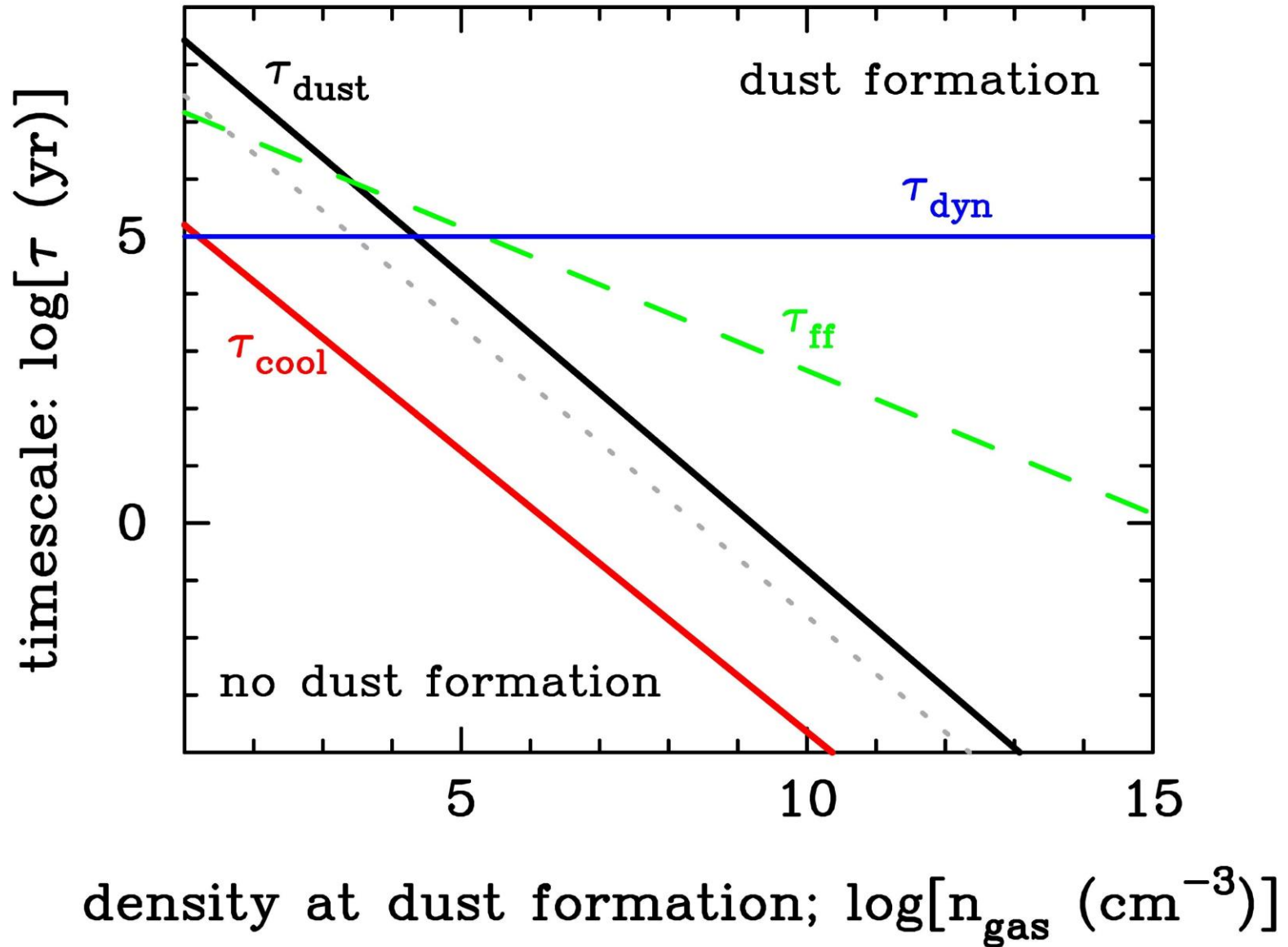


Nozawa+2015



Nozawa & Kozasa 2013

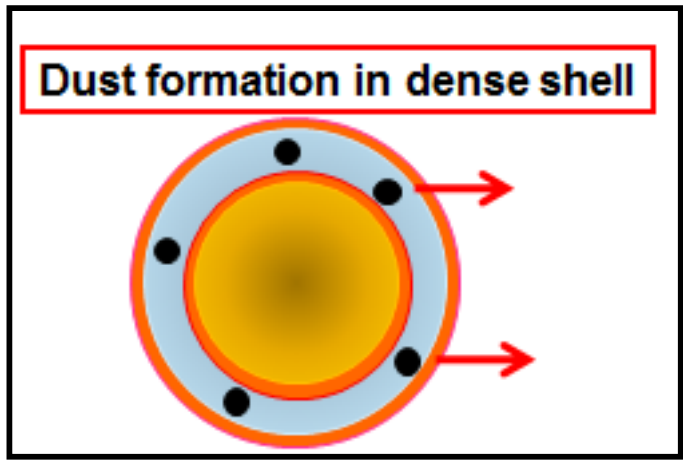
## 5-2. 衝撃波後方ガスでダストは凝縮できるか？



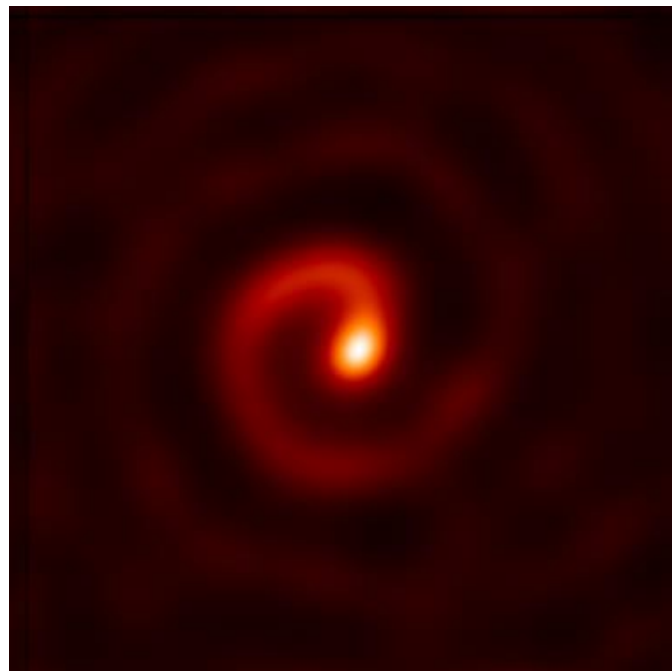
# 5-3. 衝撃波後方ガスでダストは形成されている

## ○ In型超新星のcool dense shell

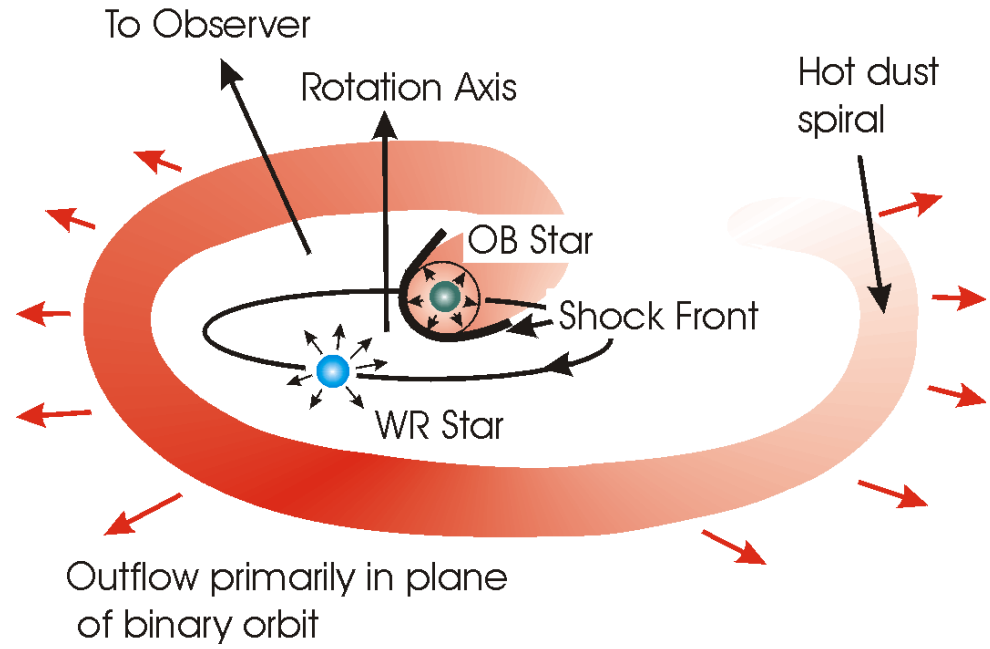
- ダスト凝縮時刻: 50-200 days
- 間接的証拠が多数



## ○ WC-OB star連星系



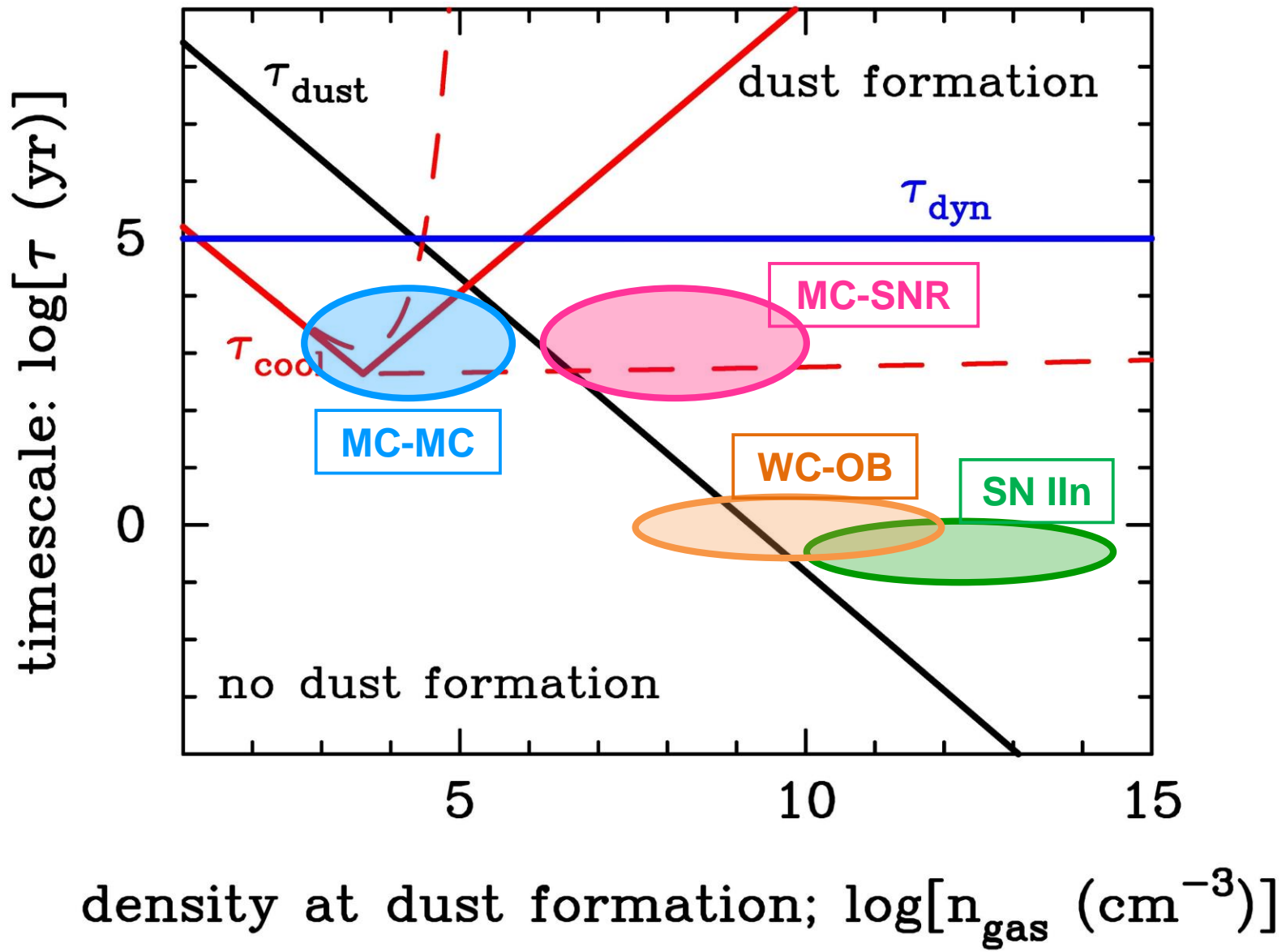
Tuthill+2008



Tuthill+1999



# 5-4. 衝撃波後方ガスでダストは凝縮できるか？



# 5-5. もし衝撃波後方でダストが凝縮できると。。。

## (1) 星間ダストの新たなソース

- 超新星1つで最大 $20M_{\text{sun}}$ のダストを形成
- 短いダスト形成のタイムスケール(宇宙初期でも可能)
- 星形成活動が活発なほどダストを形成する

## (2) 太陽系物質の同位体均一性を説明

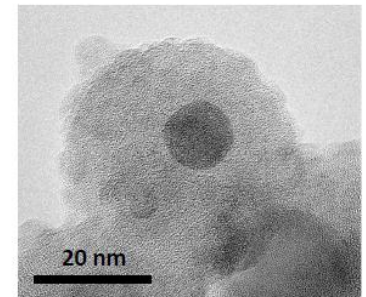
- プレソーラー粒子の希少性

## (3) ダスト成長に伴う困難性は緩和

- 氷マントル・ふわふわダストは形成しない
- 選択的成長も改善される

→ 温度による凝縮物のソーティング

シリケートの  
蒸発・凝縮実験



実験生成物のTEM像

Matsuno+2011

# まとめ

- (1) 宇宙初期でも現在でも、超新星とAGB星からのダスト供給だけでは観測された星間ダスト総量を説明できない
- (2) 星間ダスト量の主要なソースとして分子雲中でのダスト成長が考えられているが、その実効性は自明ではない
- (3) 太陽系の同位体組成は極めて均一である  
(プレソーラー粒子の存在量は0.01%程度と小さい)
- (4) WC-OB星型連星系やII型超新星など、衝撃波後方でダストが形成されている例がある

分子雲中で起こる衝撃波後方でのダスト凝縮を考えることによつて、これらの問題を統一的に理解できる！

・・・かもしれない