

星間ダストは主にどこで 形成されるか？

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)

0. 本日の3つのトピックス

(1) 銀河系の星間ダストの起源

(2) 宇宙における鉄の行方

(3) プレソナー粒子の希少性

1-1. 銀河系の星間ダストの性質

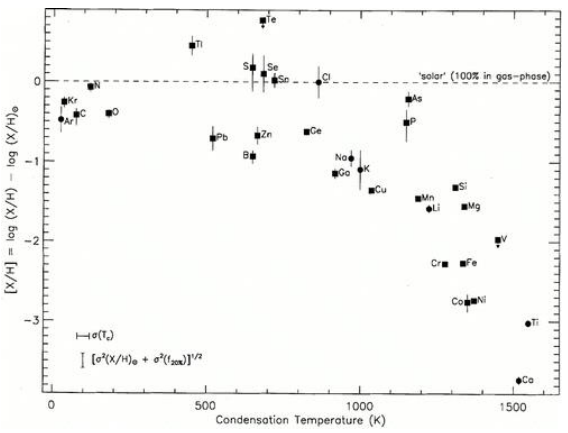
○ 銀河系の星間ダストモデル

(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: $M_{\text{dust}} / M_{\text{H}} = 1/120 \sim 0.01$ ($\sim 5 \times 10^7 M_{\text{sun}}$)
→ 重元素のおよそ半分(~40%)はダストとして存在

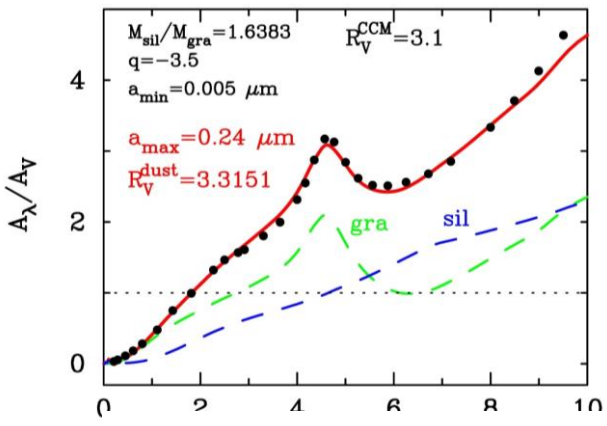


星間ガスのdepletion



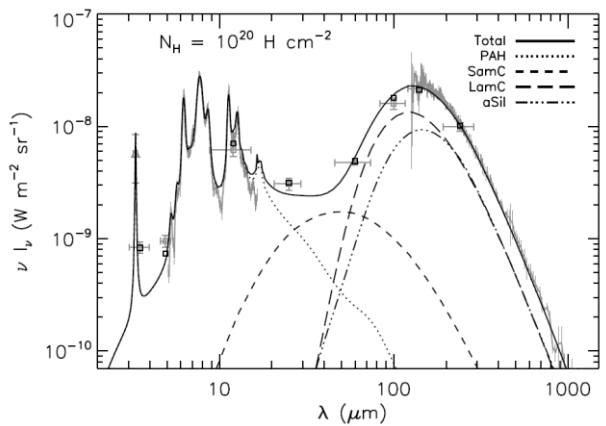
Savage & Sembach (1996)

星間減光



Nozawa & Fukugita (2013)

赤外線放射



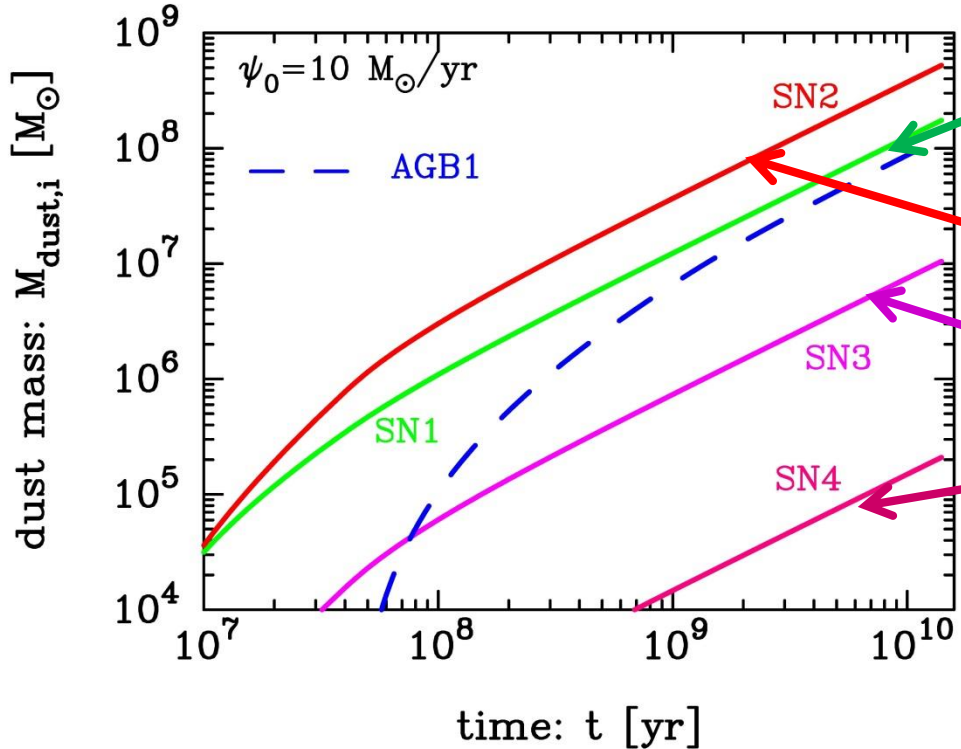
Compiegne et al. (2011)

1-2. 超新星/AGB星からの星間ダスト寄与

Nozawa (2017)

- 重力崩壊型超新星とAGB星でのダスト凝縮効率が同じであるならば、それらの星間ダスト供給への寄与はほとんど等しい
- 重力崩壊型超新星が0.5 Msun (0.01 Msun)のダストを供給する場合、AGB星の寄与よりも約5倍大きい(約10倍小さい)

Contributions of dust mass from SNe II/AGB



○ Dust yield per SNe II/AGB

$$m_{d,SN1} = f_{SN}(m - m_{NS}) M_{\odot}.$$

$f_{SN} = 0.01$ and $m_{NS} = 2.0 M_{sun}$

$$m_{d,SN2} = 0.5 M_{\odot}.$$

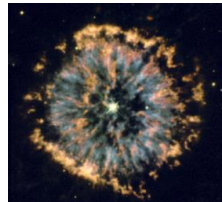
$$m_{d,SN3} = 0.01 M_{\odot}.$$

$$m_{d,SN4} = 2 \times 10^{-4} M_{\odot},$$

$$m_{d,AGB1} = f_{AGB}(m - m_{WD}) M_{\odot}.$$

$f_{AGB} = 0.01$ and $m_{WD} = 1.4 M_{sun}$

1-3. 星間ダストの供給と破壊



AGB星
0.004 Msun/yr

○ 星 (AGB星・超新星)からの星間ダストの供給率

$$\frac{dM_{\text{dust}}}{dt} \simeq 0.01 \left(\frac{\phi_{\text{sf}}}{4 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right) \left(\frac{f_{\text{AGB-SN}}}{0.3} \right) \left(\frac{f_{\text{gas,ejected}}}{0.75} \right) \left(\frac{f_{\text{dust,form}}}{0.01} \right) M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

星形成率=星の消失率
 星がAGB星・超新星となる割合
 AGB星・超新星から放出されるガスの割合
 ダストが凝縮する割合



超新星
0.006 Msun/yr

○ 超新星の衝撃波による星間ダストの破壊効率

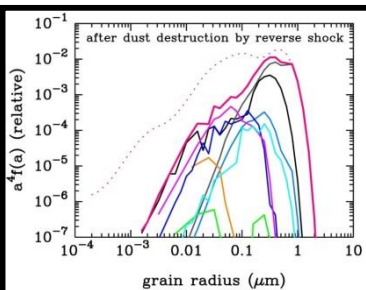
$$\frac{dM_{\text{dust}}}{dt} \simeq -0.06 \left(\frac{R_{\text{SN}}}{0.01 \text{ yr}^{-1}} \right) \left(\frac{M_{\text{gas,swept}}}{2000 M_{\odot}} \right) \left(\frac{D_{\text{ISM}}}{0.01} \right) \left(\frac{f_{\text{dust,dest}}}{0.3} \right) M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

超新星が起こる頻度
 衝撃波が掃くガスの質量
 星間空間でのダストとガスの質量比
 ダストが破壊される割合

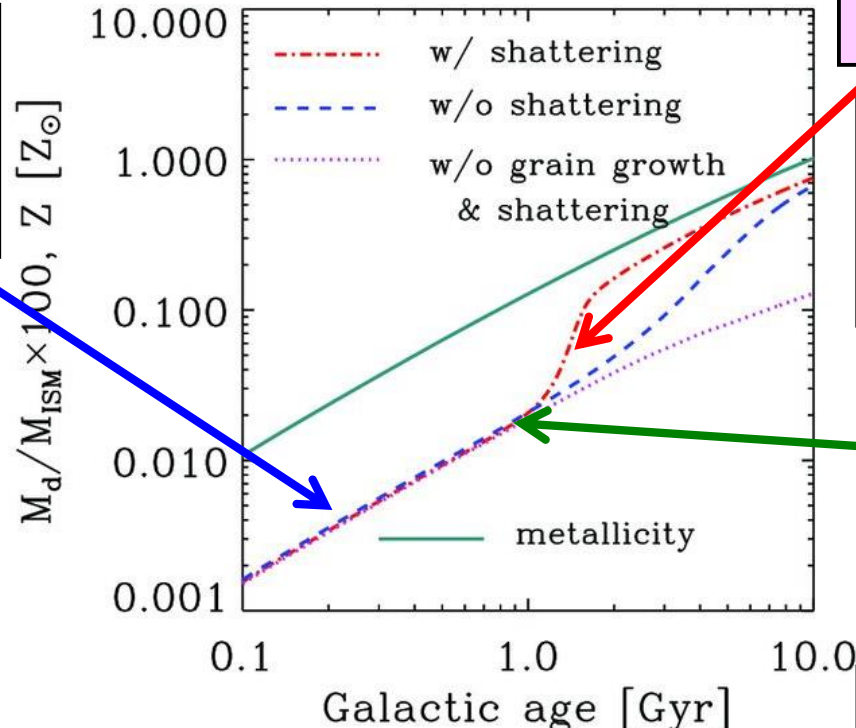
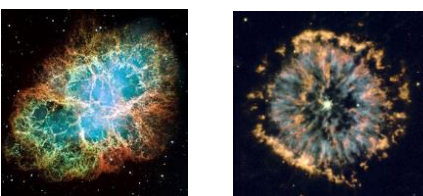
星間ダストの破壊効率は供給率を上回る
→ 星間ダストの量は時間とともに減少するはず

1-4. 星間ダスト量の進化

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

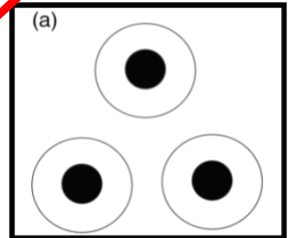


Nozawa et al. (2007)

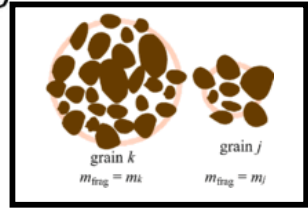


Asano, Takeuchi, Hirashita, TN (2013)

③ 分子雲での金属ガス降着によるダスト成長



② 金属量 $\sim 0.1 Z_{\text{sun}}$
 星間乱流中の衝突破砕による $0.01 \mu\text{m}$ 以下の小さいダストの生成

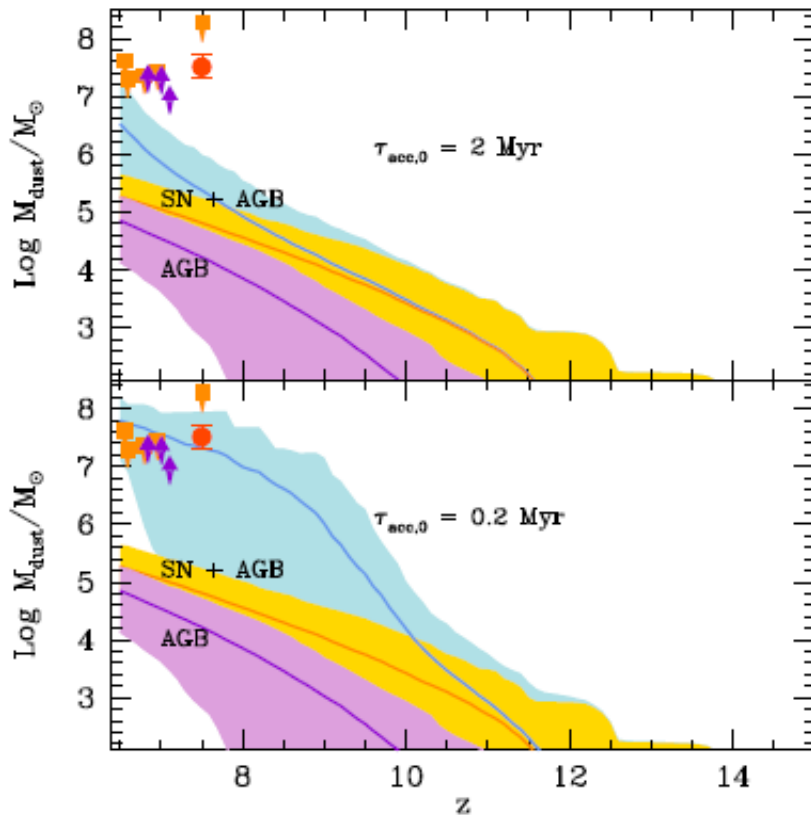


星間ダストの総量を説明するためには、分子雲でのダスト成長が必要
 → 超新星/AGB星のダストの寄与は $\sim 20\%$ 程度

1-5. 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

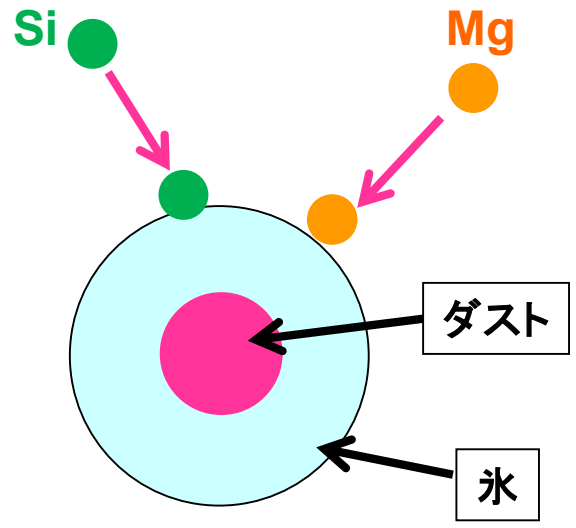
星間ダストの総量を説明するには
分子雲中でのダスト成長が必要

(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)

1-6. 分子雲でのダスト成長は本当に可能か？

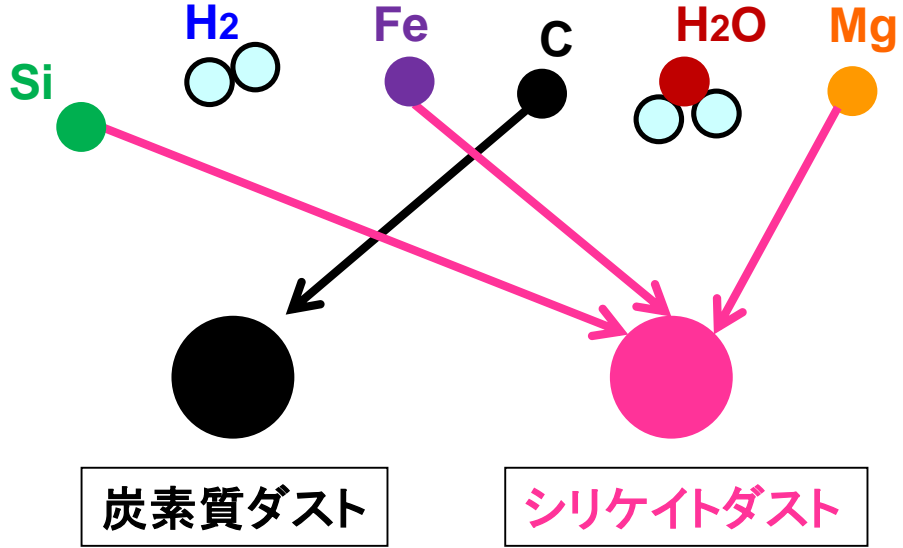
○ ダスト表面での氷マンテル形成？

- 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)



○ 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



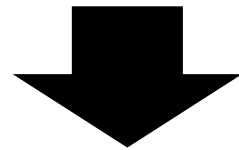
○ 付着確率は1で良いか？

- 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

(1) 銀河系の星間ダストの起源

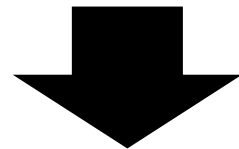
○ 星間ダスト総量 (dust-to-metal ratio)

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できるのか？
- 観測から導かれた星間ダストモデルと整合的か？

2-1. 鉄はどのダスト種に含まれているか？

Mon. Not. R. astr. Soc. (1990) **215**, 331–334

Iron or iron oxide grains in the interstellar medium?

A. P. Jones

Department of Physics, York University, 4700 Keele Street, North York, Ontario, Canada, M3J 1P3

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 499:267–272, 1998 May 20

© 1998. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

INTERSTELLAR DEPLETIONS AND THE LIFE CYCLE OF INTERSTELLAR DUST

A. G. G. M. TIELENS

NASA Ames Research Center, MS245-3, Moffett Field, CA 94035-1000

Received 1997 May 20; accepted 1997 December 16

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 825:136 (6pp), 2016 July 10

© 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/0004-637X/825/2/136



CrossMark

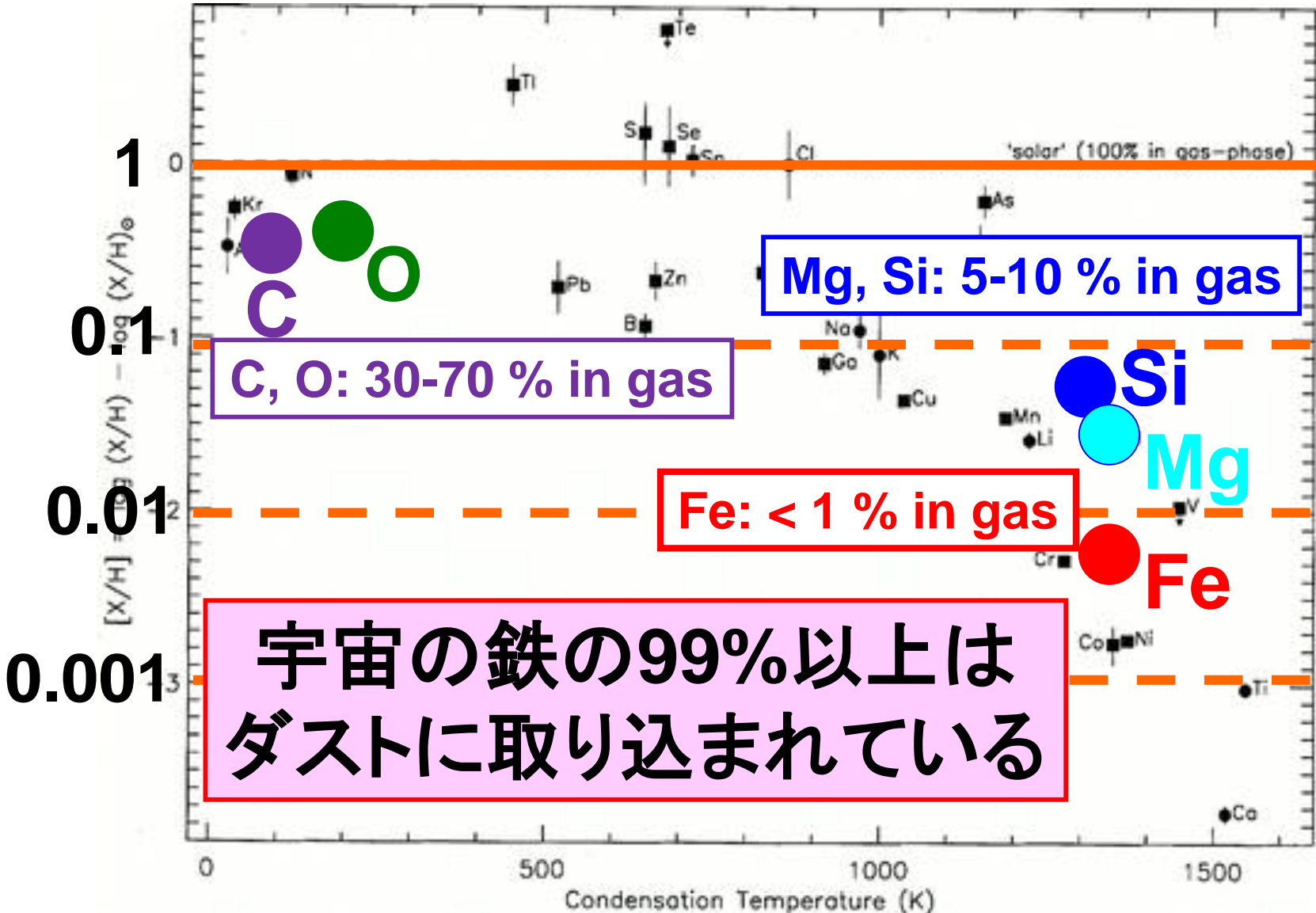
IRON: A KEY ELEMENT FOR UNDERSTANDING THE ORIGIN AND EVOLUTION OF INTERSTELLAR DUST

ELI DWEK

Observational Cosmology Lab., Code 665, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA; eli.dwek@nasa.gov

Received 2015 May 7; revised 2016 April 29; accepted 2016 May 5; published 2016 July 12

2-2. 星間空間の重元素ガスの存在量



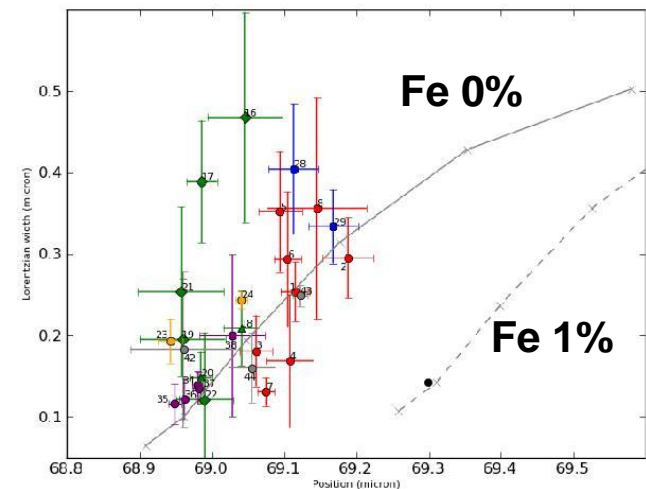
2-3. 星間空間での鉄の行方不明問題

○ 鉄を含むダスト種の候補

- ・ シリケート → $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$, $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$
 - astronomical silicate ($\text{Mg}_{1.1}\text{Fe}_{0.9}\text{SiO}_2$)
鉄を含むシリケートの存在は観測的に確かめられていない
→ シリケートのほとんどはFe-poorである
(e.g., Tielens+1998; Molster+2002)
- ・ 金属鉄(Fe) ? 硫化鉄(FeS) ? 酸化鉄(FeO) ?

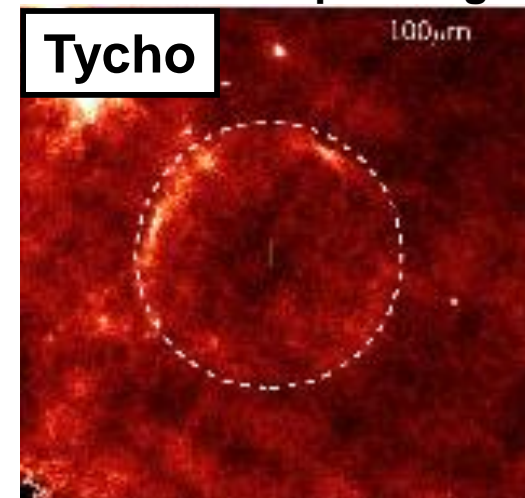
○ 鉄を含むダストの主要な形成場所

- ・ Ia型超新星: 大量の鉄 ($\sim 0.7 M_{\text{sun}}$)を放出
重力崩壊型の鉄質量 ($\sim 0.07 M_{\text{sun}}$)の十倍
- ・ これまでIa型超新星での大量のダスト形成の観測的証拠がない (e.g., Gomez+2012)



Brommaert et al. (2014)

Herschel 100 μm image

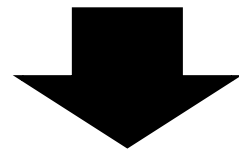


Gomez+2012

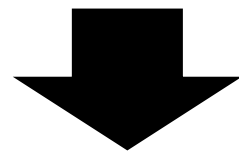
(2) 宇宙における鉄の行方

○ 鉄の行方不明問題 (Missing-Fe problem)

宇宙の鉄の99%は、ダストに取り込まれている



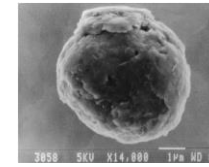
シリケートには鉄はほとんど含まれていなさそう
Ia型超新星で金属鉄ダストは形成されていない



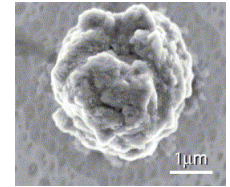
- 鉄はどのようにダストに取り込まれているのか？
- 金属鉄ダストの形成過程は？ (cf. Kimura+2017)

3-1. プレソーラー粒子

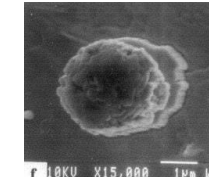
- 始原的隕石・惑星間塵 (IDPs) 中で発見される
- 同位体異常を示す
 - 太陽系物質とは全く異なる同位体組成
 - ## 太陽系物質の同位体組成は数%で均一
- 太陽系外で(太陽系形成以前に)、超新星や AGB 星で形成されたダストの生き残り
- 組成 : graphite, SiC, TiC, Si₃N₄, Al₂O₃, MgAl₂O₄, Mg₂SiO₄, MgSiO₃ ...
- 存在量 (測定量 by 体積充填率)
 - ・ 始原的隕石中 : ~0.01 %
 - ・ 惑星間塵 (IDPs) 中 : ~0.05 %



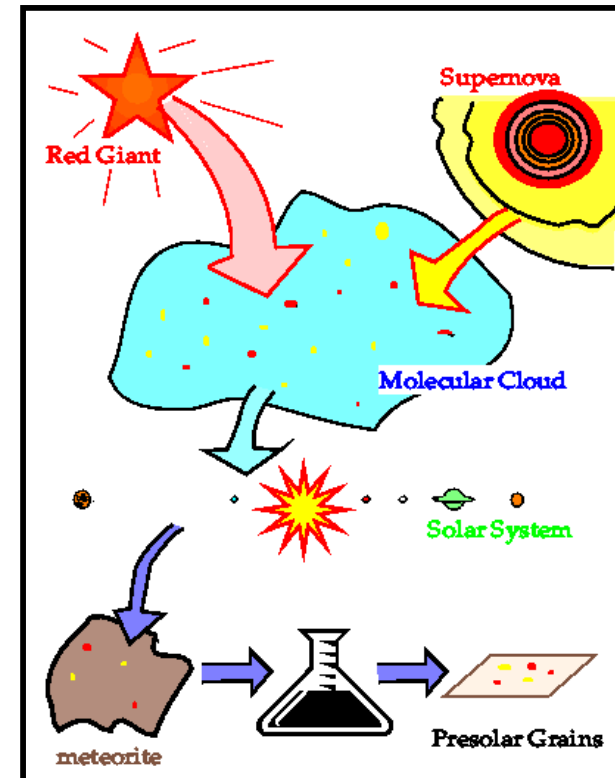
© Amari, S.



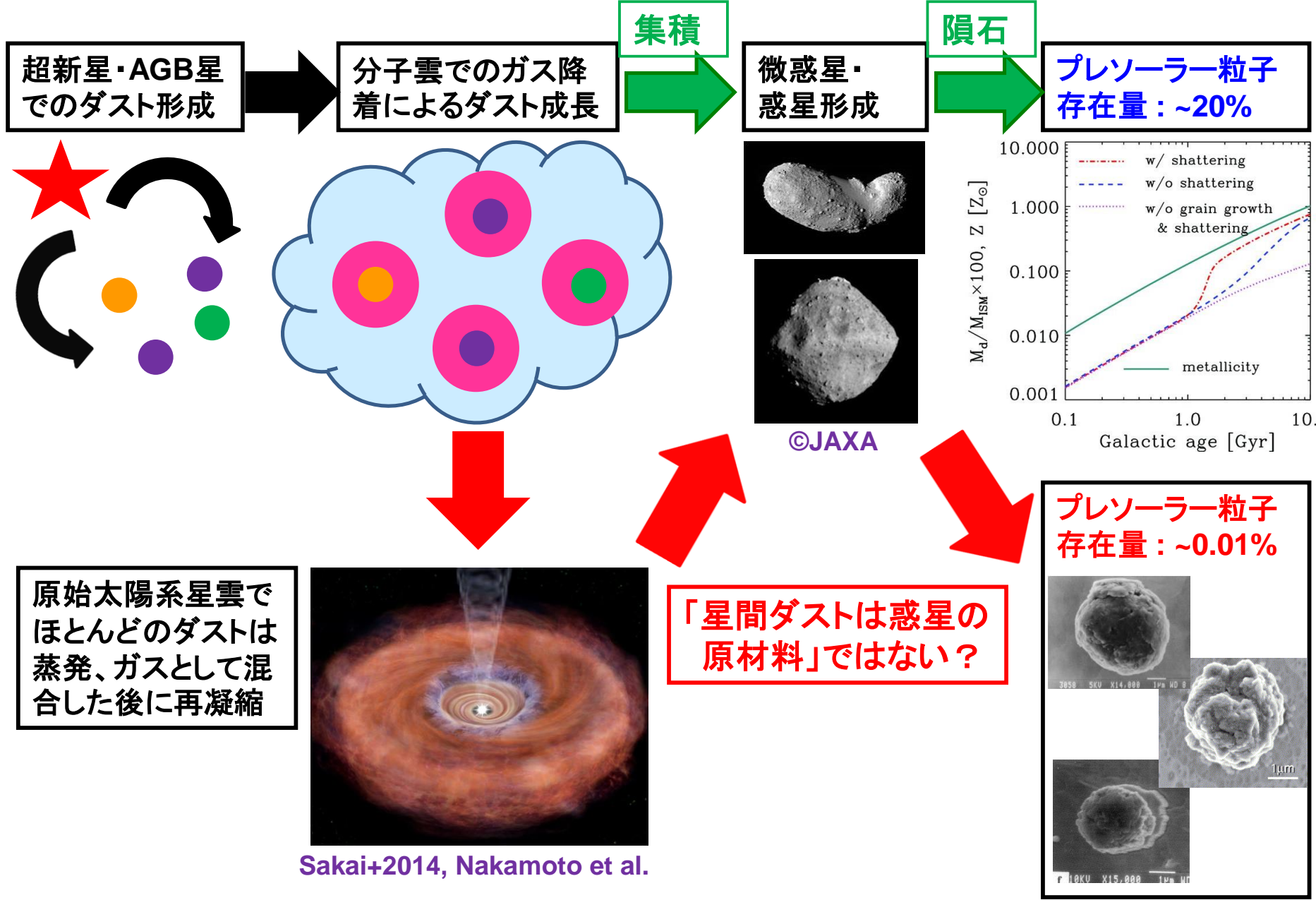
Nittler 2003



Nittler+1997



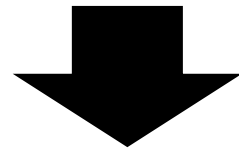
3-2. なぜプレソラー粒子の存在量は小さいのか？



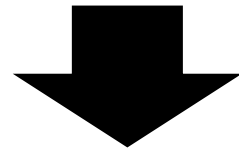
(3) プレスローラー粒子の希少性

○ プレスローラー粒子

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



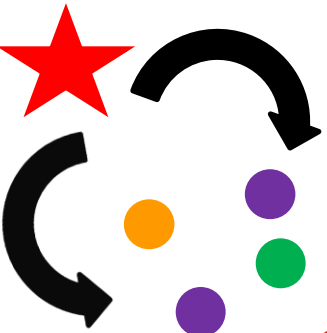
その存在量は0.01%程度と非常に小さい



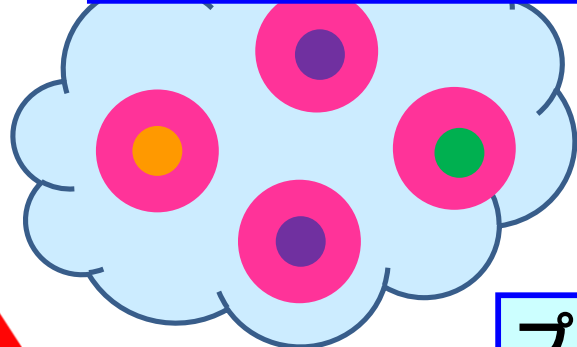
- 星間ダストは惑星の直接の原材料であるのか？
- なぜ太陽系物質の同位体組成は均一なのか？

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

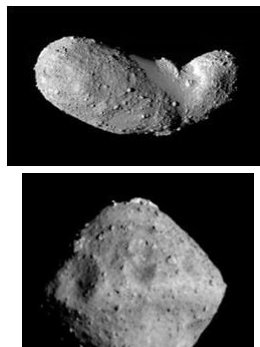


分子雲でのダスト
成長は整合的か？



集積

微惑星・
惑星形成



隕石

プレソーラー粒子
存在量：~20%

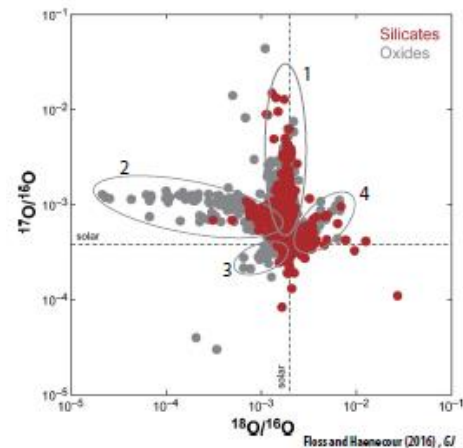
プレソーラー粒子
をコアとしたマント
ル組成であるはず

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

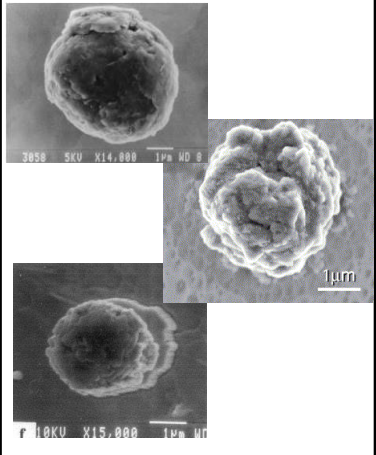
プレソーラー粒子の
ふりかけ説 by ゆり本さんなど

合した後に再凝縮

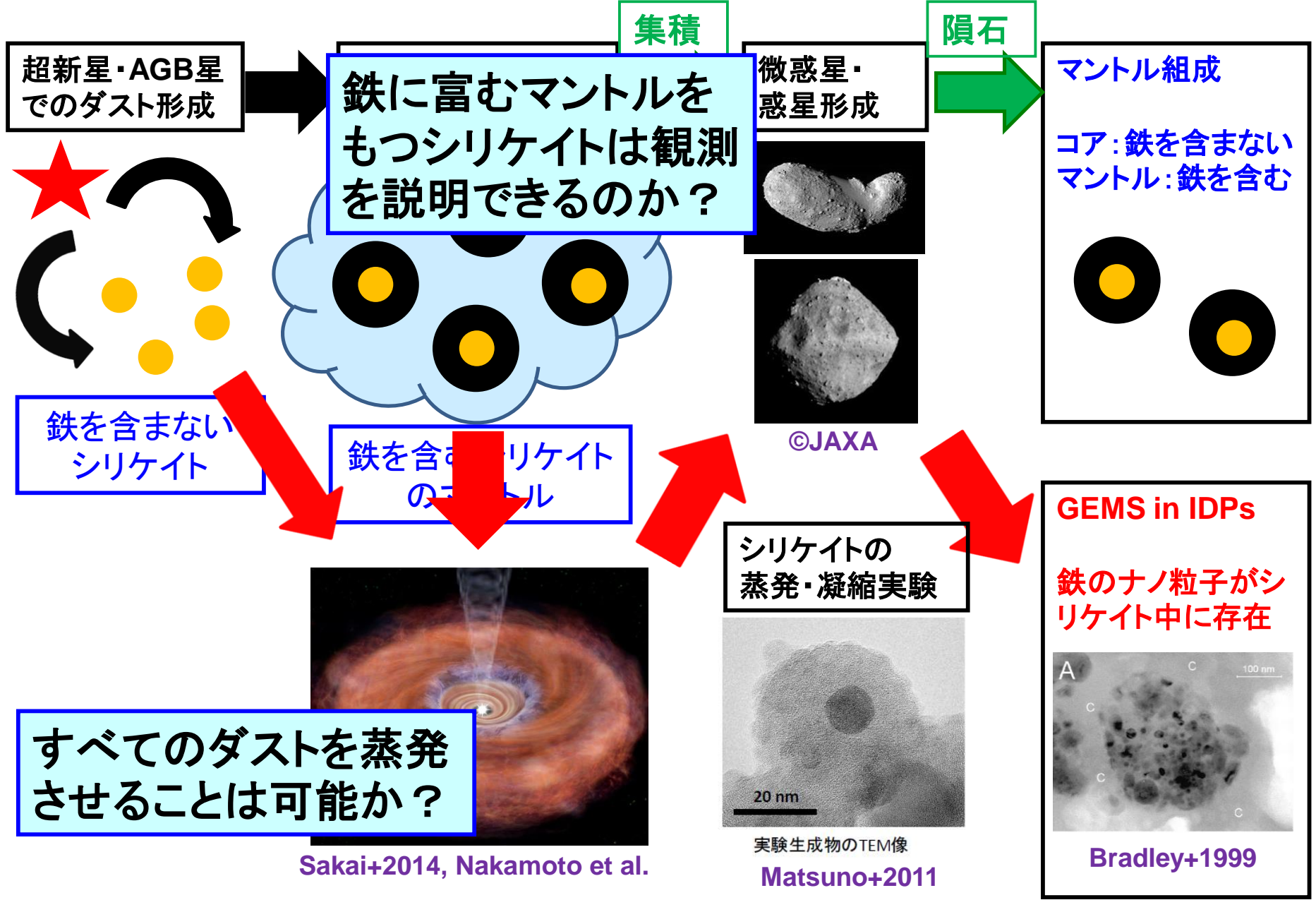
すべてのダストを蒸発
させることは可能か？



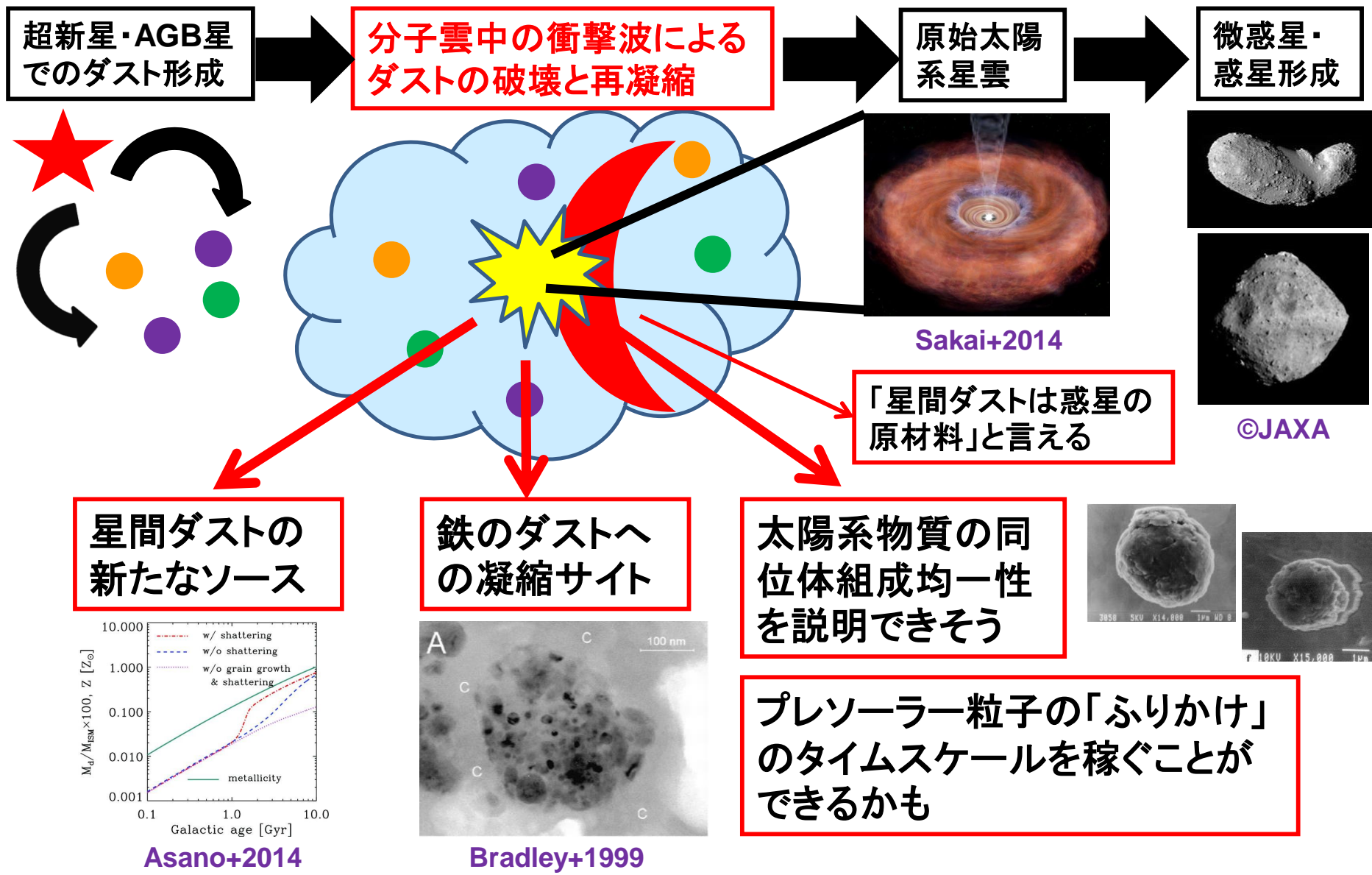
プレソーラー粒子
存在量：~0.01%



4-2. 鉄の観点から見た星間ダストから惑星形成



4-3. 分子雲中でのガス相からのダストの凝縮

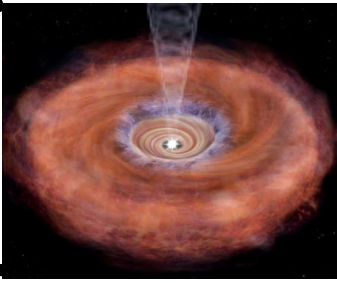


超新星・AGB星
でのダスト形成

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



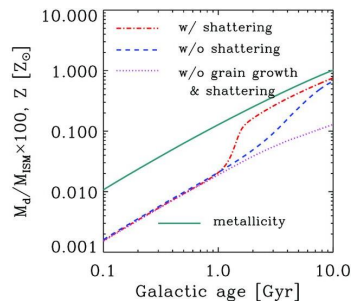
Sakai+2014



©JAXA

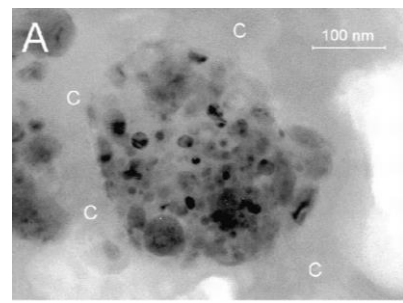
「星間ダストは惑星の
原材料」と言える

星間ダストの
新たなソース



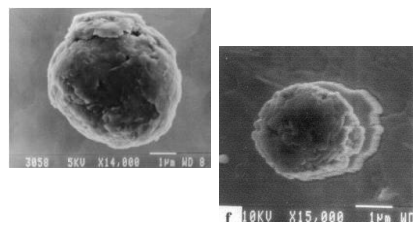
Asano+2014

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

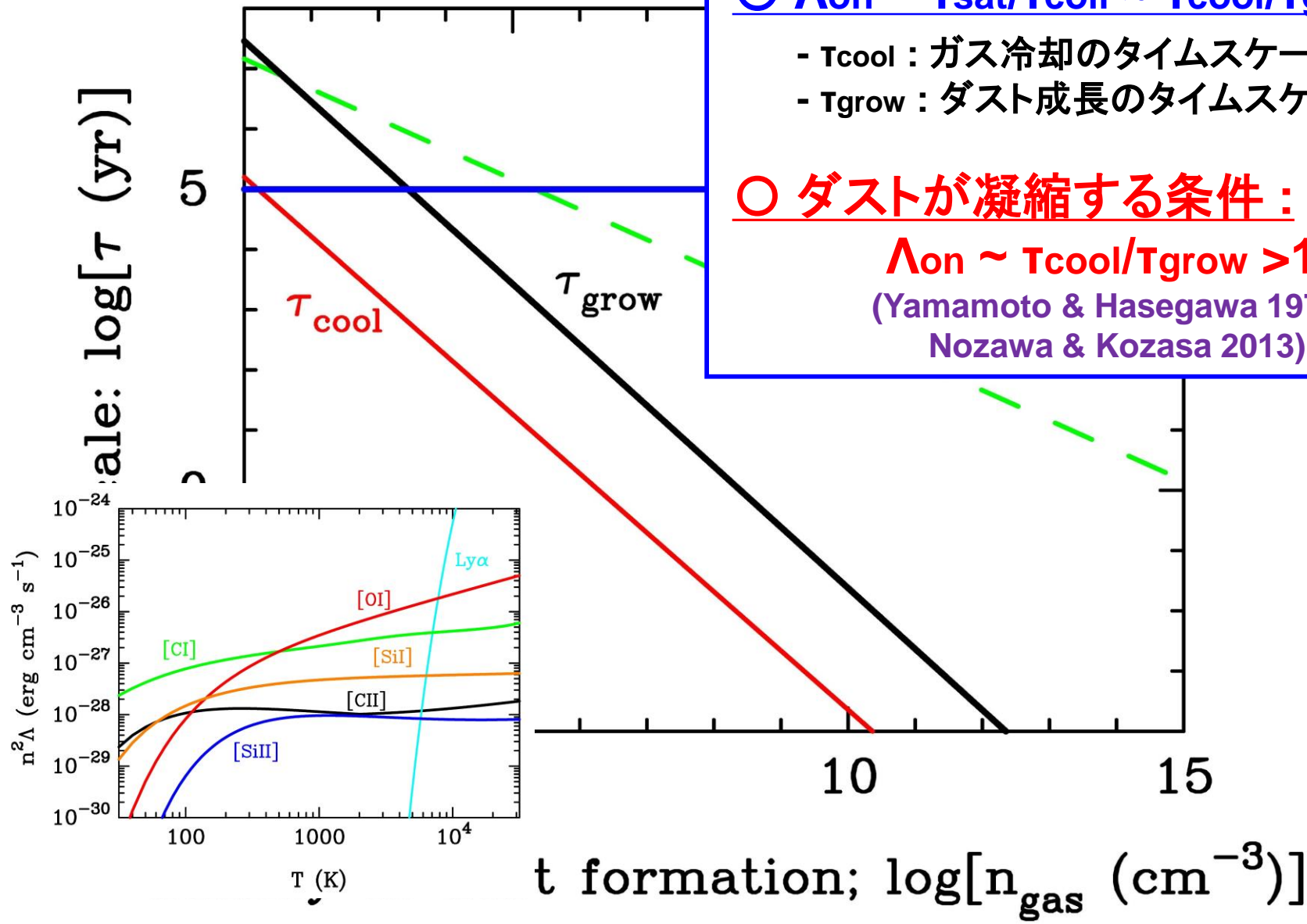
5-1. 衝撃波後方ガスでダストは凝縮できるか？

○ $\Lambda_{on} = T_{sat}/T_{coll} \sim T_{cool}/T_{grow}$

- T_{cool} : ガス冷却のタイムスケール
- T_{grow} : ダスト成長のタイムスケール

○ ダストが凝縮する条件:

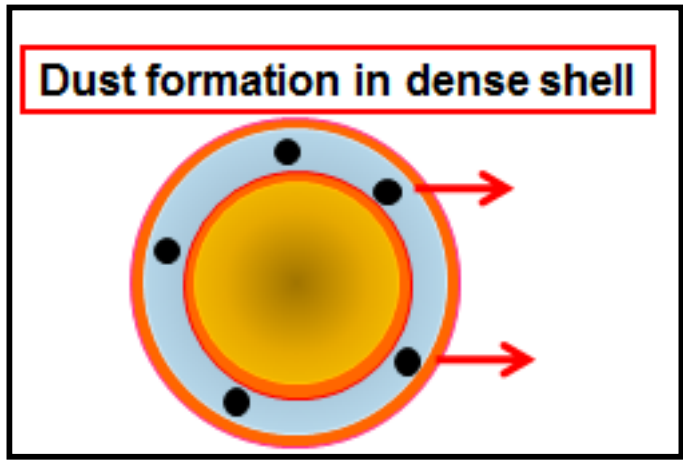
$\Lambda_{on} \sim T_{cool}/T_{grow} > 1$
 (Yamamoto & Hasegawa 1977;
 Nozawa & Kozasa 2013)



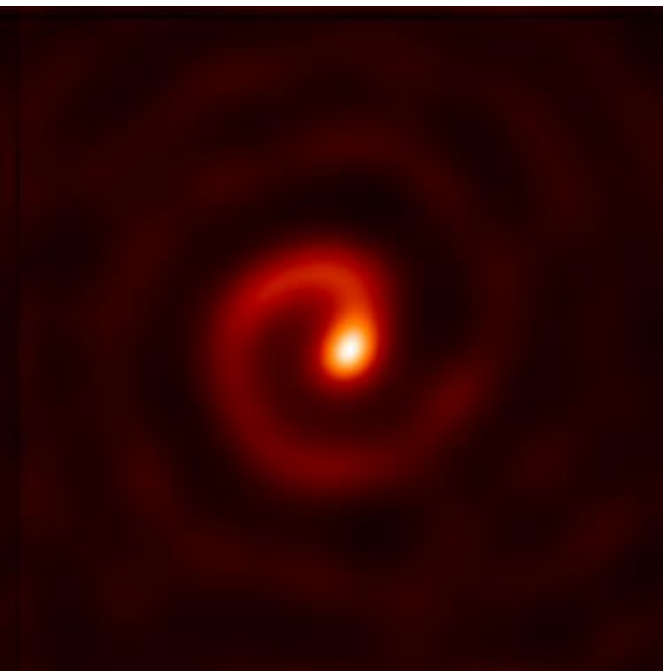
5-2. 衝撃波後方ガスでダストは形成されている

○ II型超新星のcool dense shell

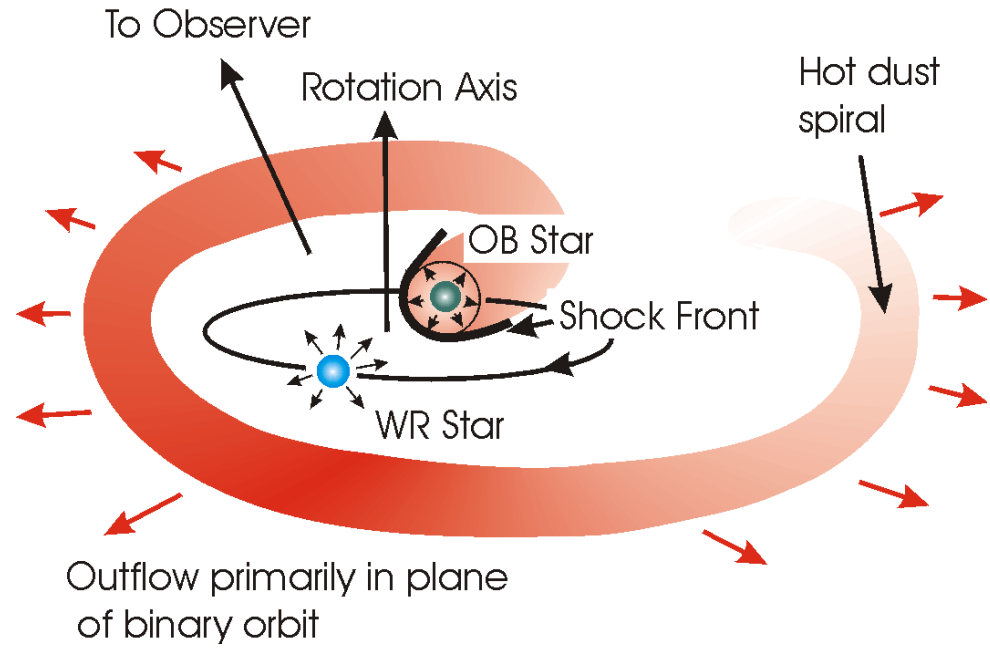
- ダスト凝縮時刻: 50-200 days
- 間接的証拠が多数



○ WC-OB star連星系

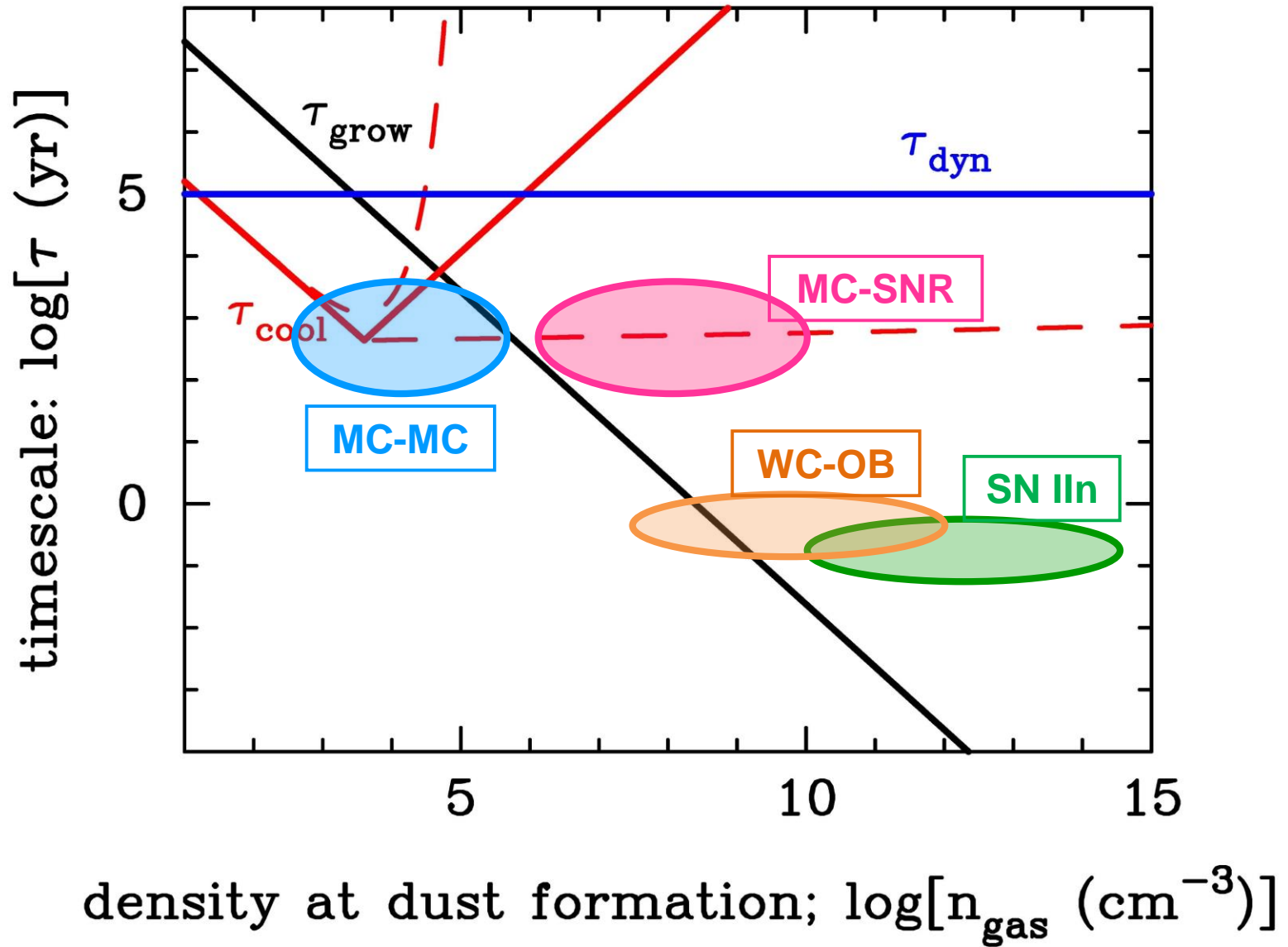


Tuthill+2008



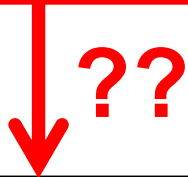
Tuthill+1999

5-3. 衝撃波後方ガスでダストは凝縮できるか？



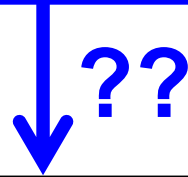
本発表のまとめ

銀河系の星間
ダストの起源



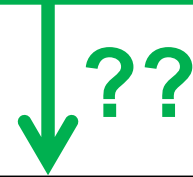
分子雲でのダスト
成長が星間ダスト
の主なソース

宇宙におけ
る鉄の行方



金属鉄ダスト
して存在

プレソーラー
粒子の希少性



原始太陽系星雲
でのダストの蒸発、
ガス混合、再凝縮

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

..かもしれない