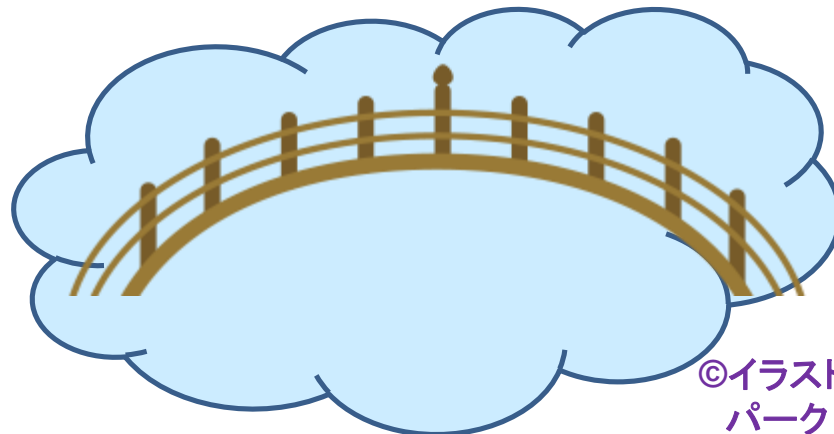


# 分子雲：星間ダスト進化と 惑星形成を架ける雲

(Molecular clouds: connecting between evolution  
of interstellar dust and formation of planets)

野沢 貴也 (国立天文台 理論研究部)

田中 秀和 (東北大学 天文学教室)



©JAXA

©イラスト  
パーク

## 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) プレソナー粒子の存在量

# 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

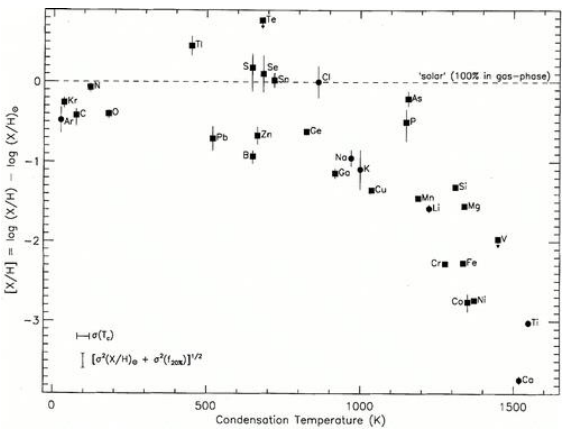
(Mathis, Rumpl, & Nordsieck 1977, Weingartner & Draine 2001, Zubko+2004, etc)

- 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:  $M_{\text{dust}} / M_{\text{H}} = 120$

→ 重元素のおよそ半分(~40%)はダストとして存在

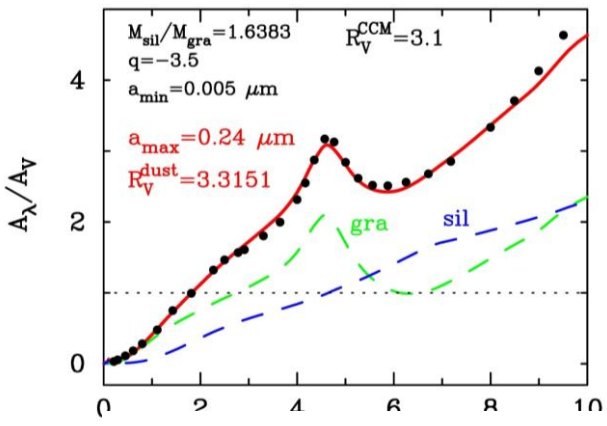


星間ガスのdepletion



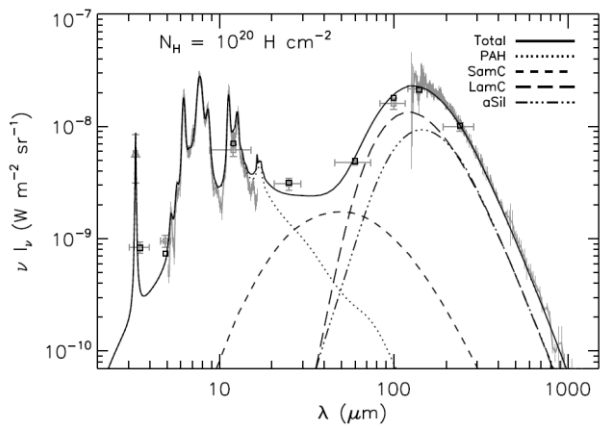
Savage & Sembach (1996)

星間減光



Nozawa & Fukugita (2013)

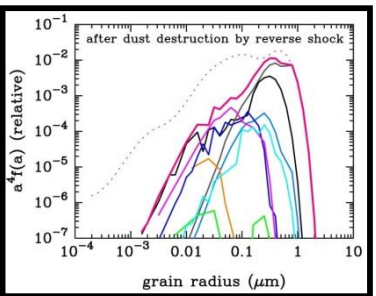
赤外線放射



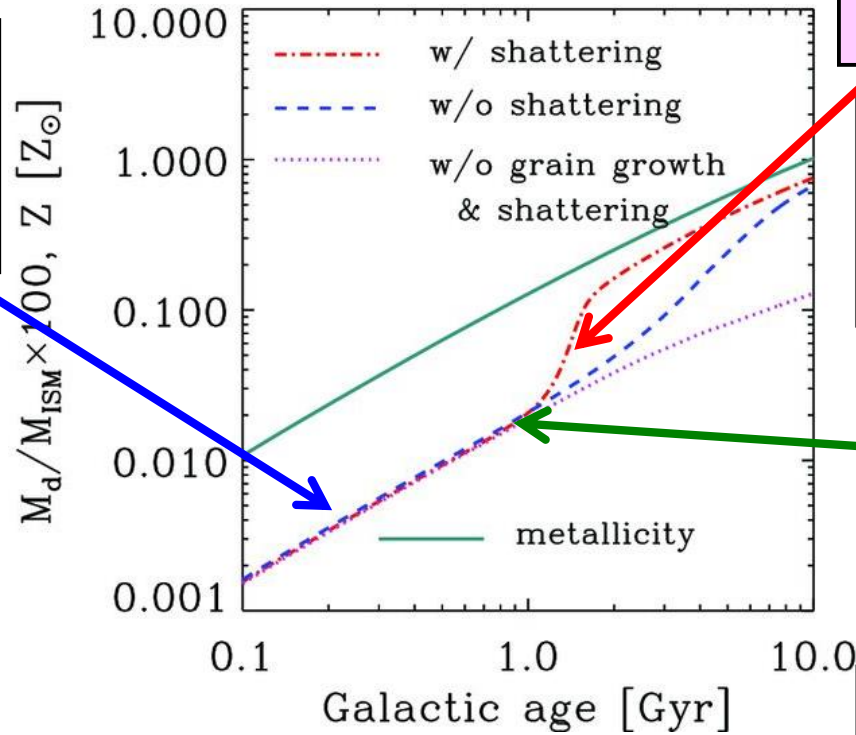
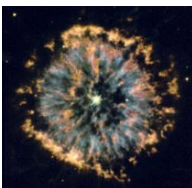
Compiegne et al. (2011)

# 1-2. 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  
 -  $a \sim 0.1 \mu\text{m}$   
 -  $M_{\text{dust}}/M_{\text{metal}} \sim 0.2$

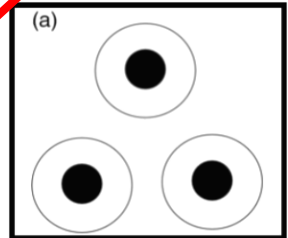


Nozawa et al. (2007)

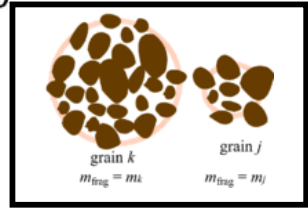


Asano, Takeuchi, Hirashita, TN (2013)

③ 分子雲での金属ガス降着によるダスト成長



② 金属量~0.1 Z\_sun  
 星間乱流中での衝突破砕による0.01 μm以下の小さいダストの生成



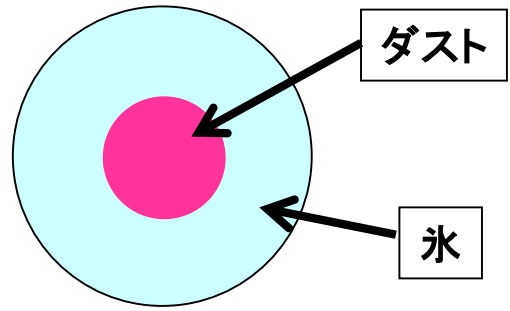
## ○ 分子雲でのダスト成長のタイムスケール

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

# 1-3. 分子雲でのダスト成長は本当に起こるのか？

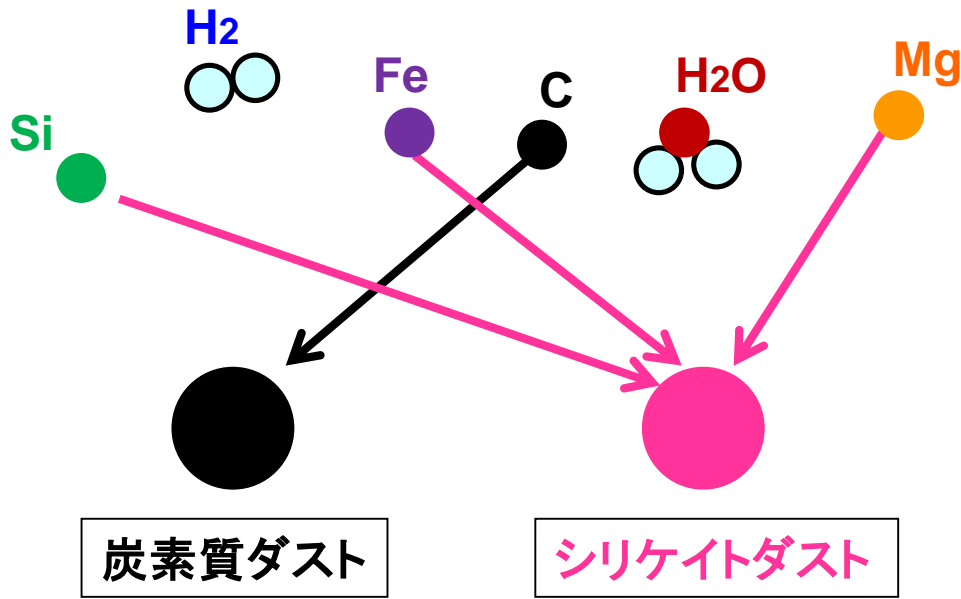
## ○ 高密度分子雲 ( $n > \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ )

- ダスト表面に氷のマントルが形成され、ダストの成長を阻害する (Ferrara+2016)

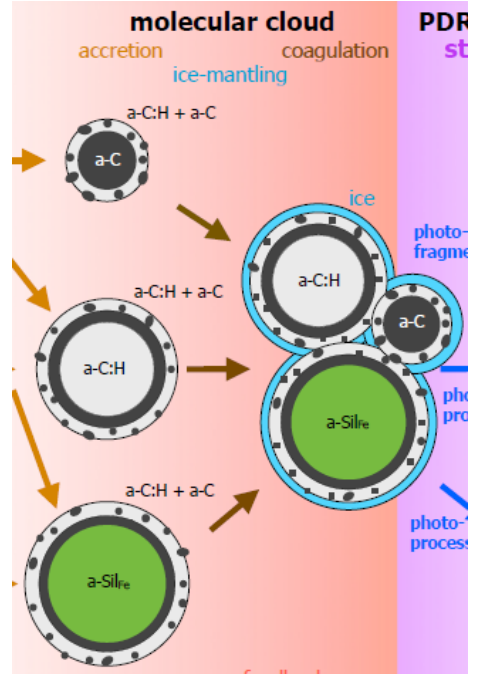


## ○ ダストの選択的成長？

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



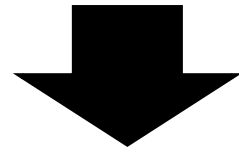
## heterogeneous dust model (Jones+2013, 2016, 2017)



# (1) 銀河系の星間ダストの起源

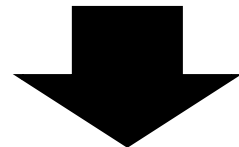
## ○ 星間ダスト総量 (dust-to-metal ratio)

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



**Q1. 分子雲でのダスト成長は整合的か？**

# 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**

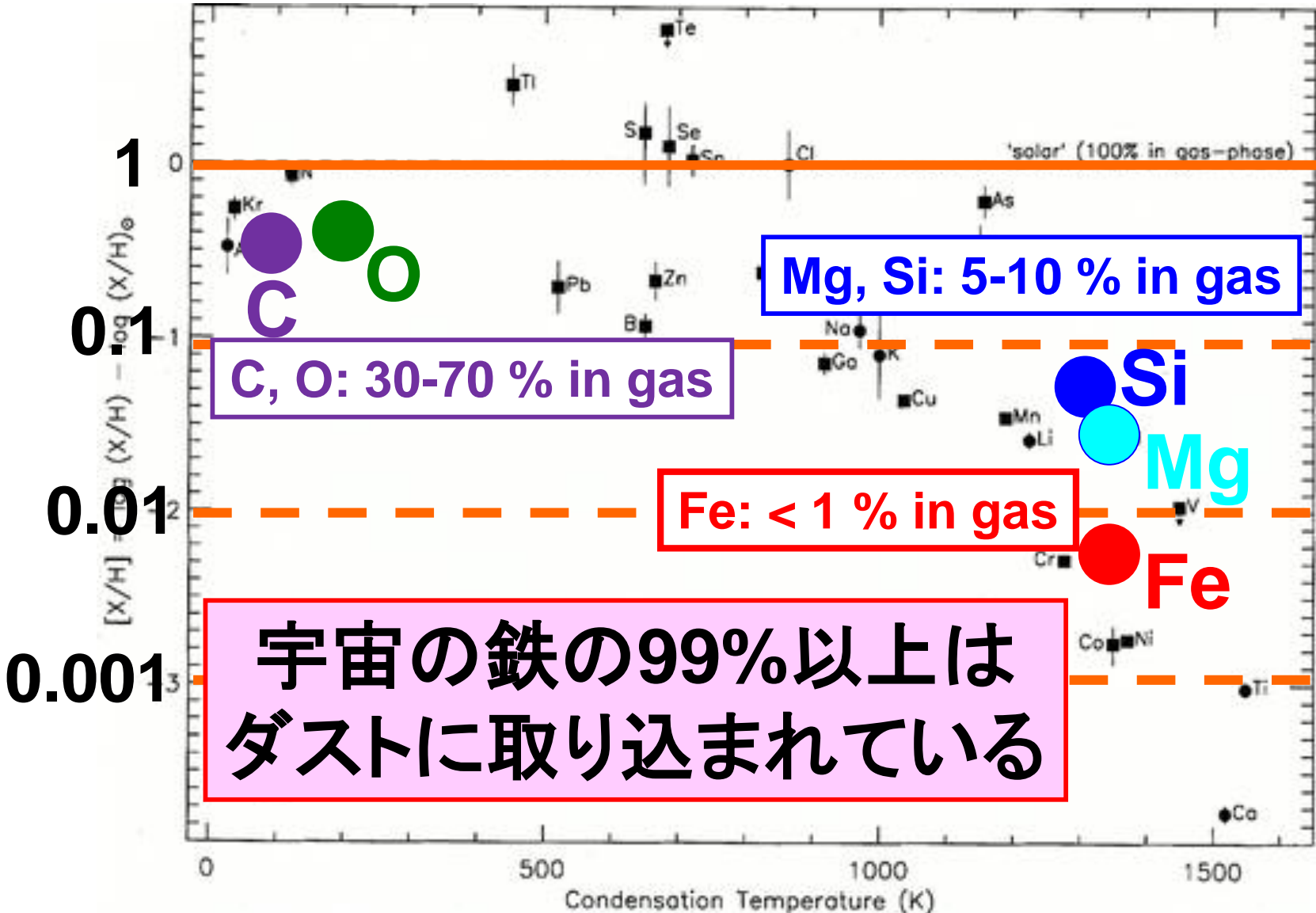
ELI DWEK

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



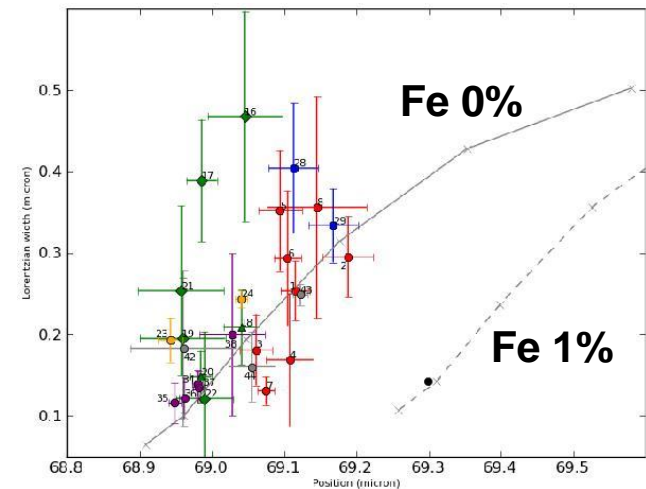
宇宙の鉄の99%以上はダストに取り込まれている



# 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) ?

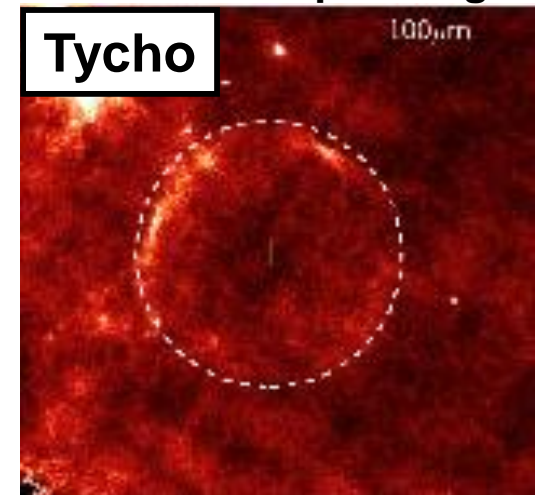


Brommaert et al. (2014)

## ○ 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)

Herschel 100  $\mu\text{m}$  image

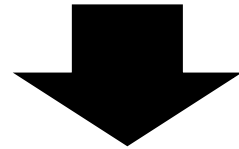


Gomez+2012

## (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

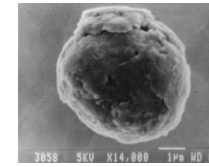


**Q2. 鉄はどのようにダストに含まれるのか？**

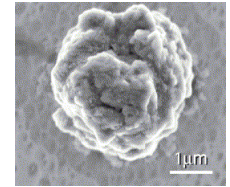
# 3-1. プレソーラー粒子

- 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

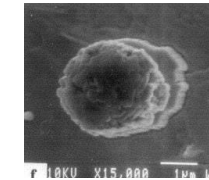
graphite, **SiC**, TiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, MgSiO<sub>3</sub> ...
- 存在量 (測定量 by 体積充填率)
  - 始原的隕石中: ~0.01 %
  - 惑星間塵 (IDPs) 中: ~0.05 %



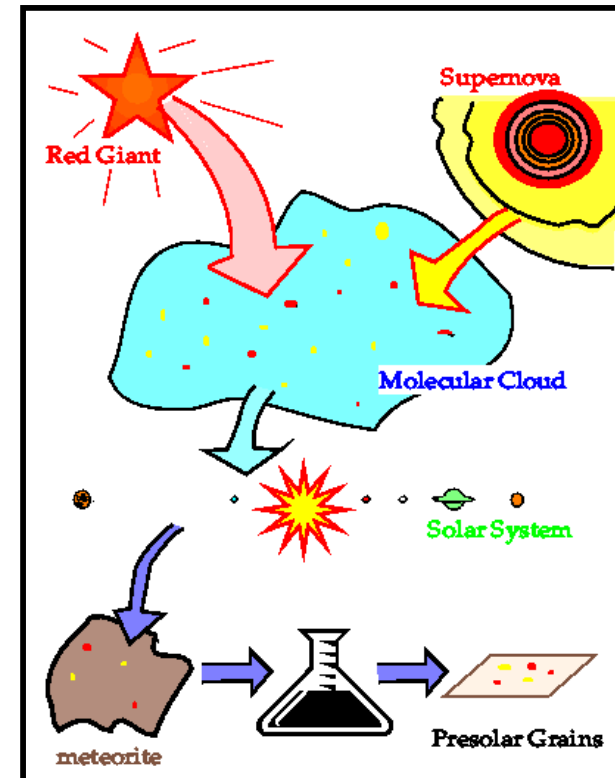
© Amari, S.



Nittler 2003



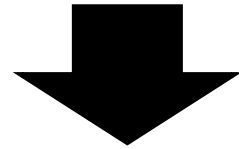
Nittler+1997



## (3) プレスローラー粒子の存在量

### ○ 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



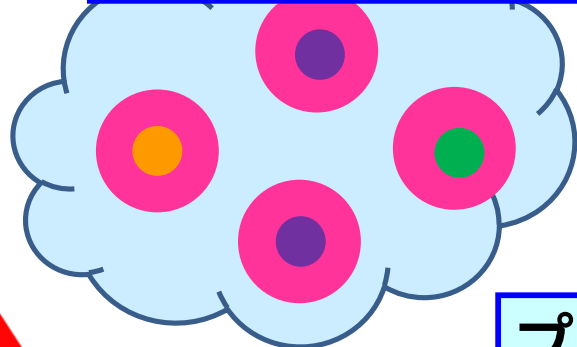
**Q3. なぜプレスローラー粒子の存在量は  
0.01%程度と非常に小さいのか？**

# 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

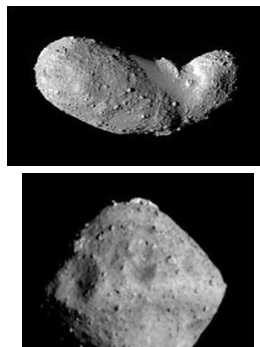


分子雲でのダスト  
成長は整合的か？



集積

微惑星・  
惑星形成



隕石

プレソーラー粒子  
存在量：~30%

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

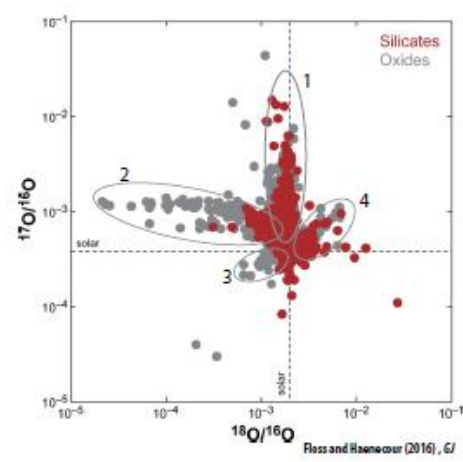
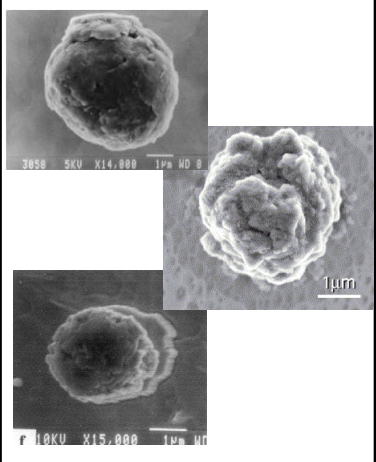
混合後に再凝縮

すべてのダストを蒸発  
させることは可能か？

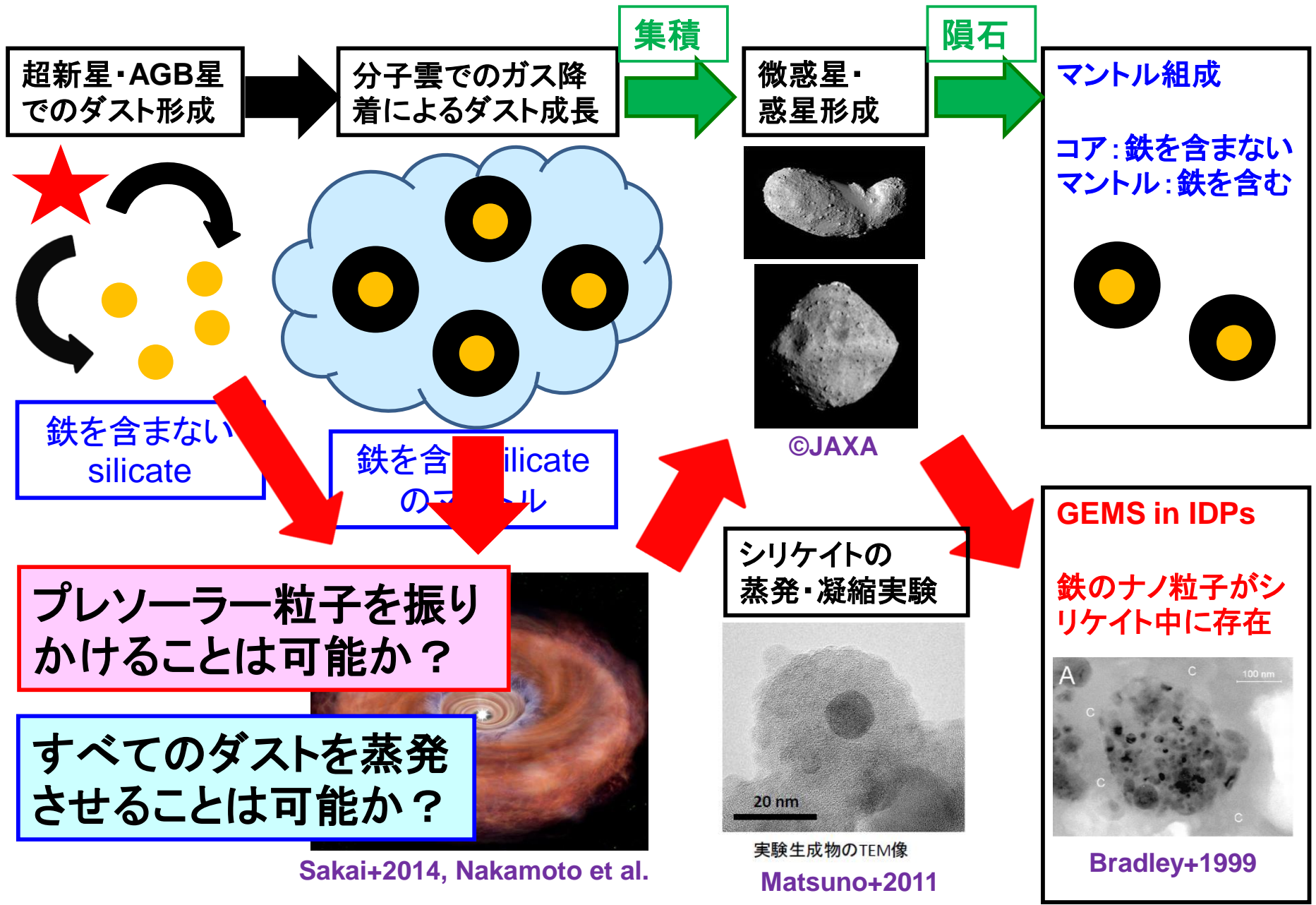


Sakai+2014, Nakamoto et al.

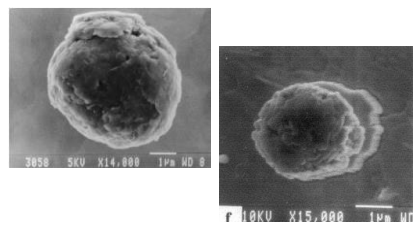
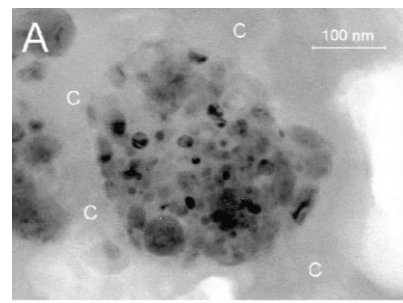
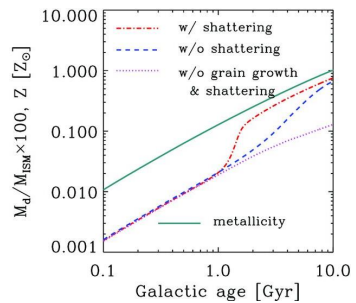
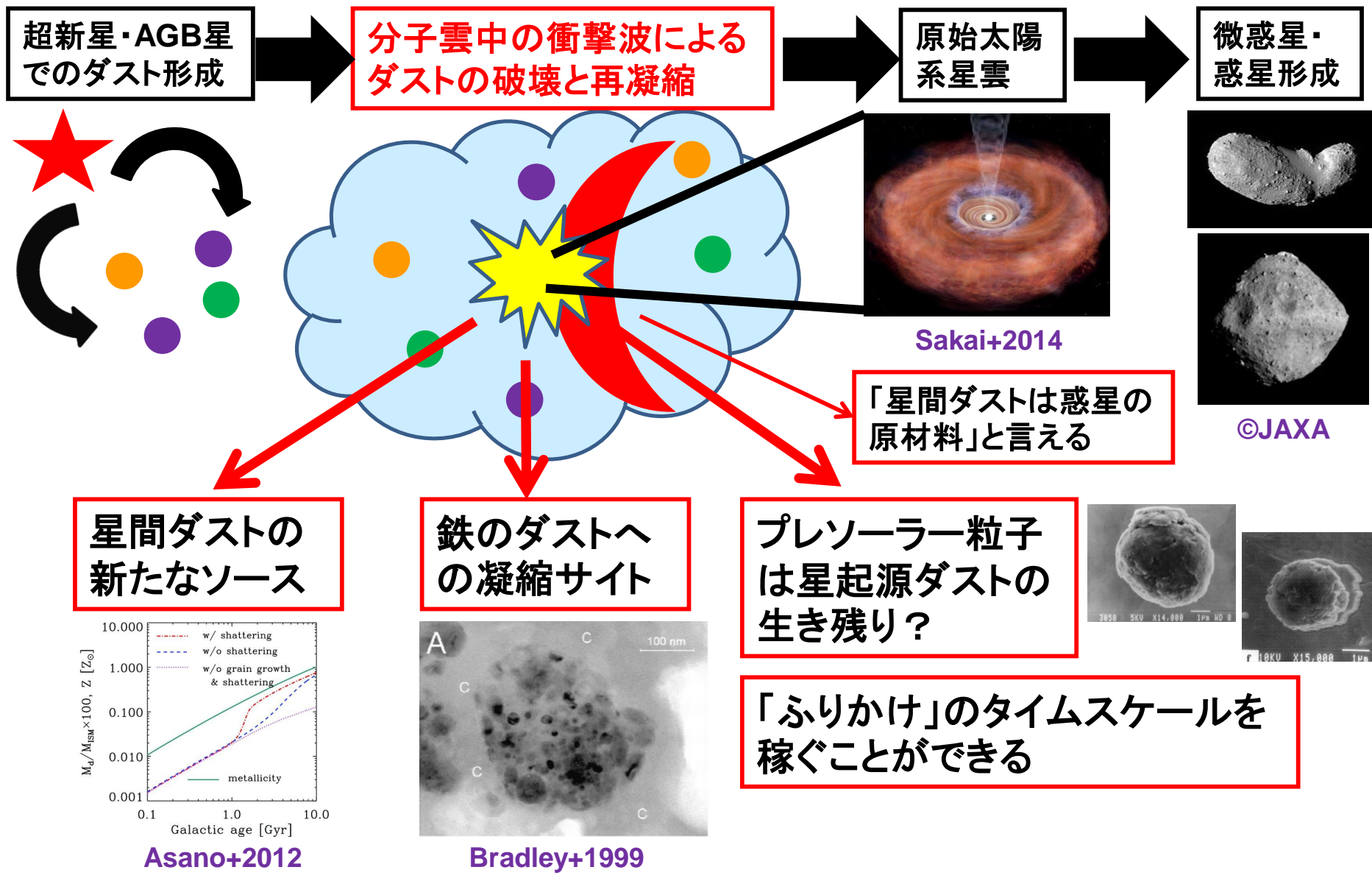
プレソーラー粒子  
存在量：~0.01%



# 4-2. 鉄の観点から見た星間ダストから惑星形成

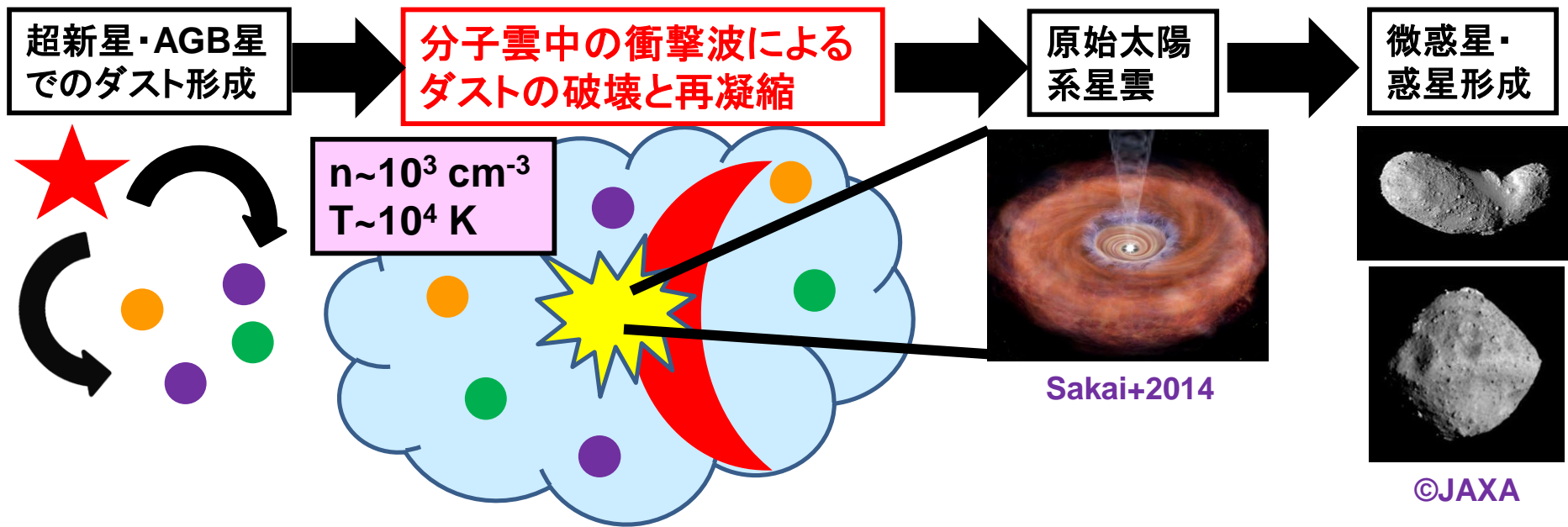


# 4-3. 分子雲中でのガス相からのダストの凝縮





# 4-3. 分子雲中でのガス相からのダストの凝縮



## ○ ダスト成長のタイムスケール

$$\tau_{\text{acc}} \simeq 5 \times 10^5 \left(\frac{p_s}{1.0}\right)^{-1} \left(\frac{A_i}{10^{-5}}\right)^{-1} \left(\frac{n_{\text{gas}}}{10^3 \text{ cm}^{-3}}\right)^{-1} \left(\frac{T}{10^3 \text{ K}}\right)^{-0.5} \left(\frac{a}{0.001 \mu\text{m}}\right) \text{ yr}$$

## ○ 自由落下のタイムスケール

$$\tau_{\text{ff}} \simeq 1.5 \times 10^6 \left(\frac{n_{\text{gas}}}{10^3 \text{ cm}^{-3}}\right)^{-0.5} \text{ yr}$$

## 5. 本発表のまとめ

### (1) 銀河系の星間ダストの起源

Q1. 分子雲でのダスト成長は整合的か？

### (2) 宇宙における鉄の行方

Q2. 鉄はどのようにダストに含まれるのか？

### (3) プレソラー粒子の存在量

Q3. なぜその存在量は~0.01%程度と小さいのか？

分子雲でのダストの蒸発・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