

# 高温プラズマ中でのスパッタリングによる宇宙固体微粒子の破壊

野沢 貴也

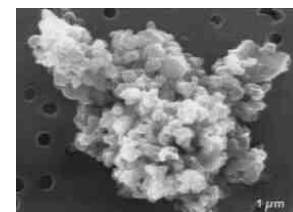
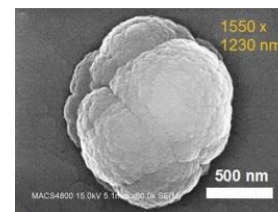
(国立天文台 理論研究部)

## ○ 宇宙固体微粒子(ダスト、宇宙塵)

- 大きさ $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$
- 宇宙の至るところに存在

星間ダスト: 星間空間に存在するダスト

→ 大きさ:  $0.001 \sim 1 \mu\text{m}$



# 0-0. 自己紹介

## ○ 野沢 貴也(のざわ たかや)

- ・ 2006年 北海道大学 大学院理学院 地球惑星科学専攻 博士後期課程修了  
学位(理学、北海道大学)、指導教官:小笹 隆司教授
- ・ 2006-2008年 北海道大学 大学院理学院 学術研究員
- ・ 2008-2014年 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構 特任研究員  
(Kavli IPMU, Institute of the Physics and Mathematics for the Universe)
- ・ 2014年-現在 国立天文台 理論研究部 特任助教(国立天文台フェロー)

### **私の研究対象**

- ・ 宇宙ダストの起源と進化、ダストの物理素過程
- ・ ダストが天体形成および天文観測に与える影響

# 0-1. はじめに

**ビッグバン(137億年前)**

水素・ヘリウム(と微量の軽元素)  
ガス(気体)からなる



**地球(現在)**

様々な元素(酸素・窒素・鉄など)  
気体・液体・固体物質からなる



- ・ 太陽系の諸天体を構成する物質はいつどこでできた？
- ・ 生命はどのようにして誕生したのか？

# 0-2. 惑星の原材料としてのダスト

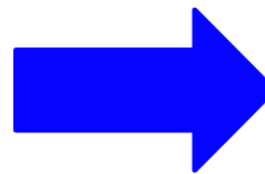
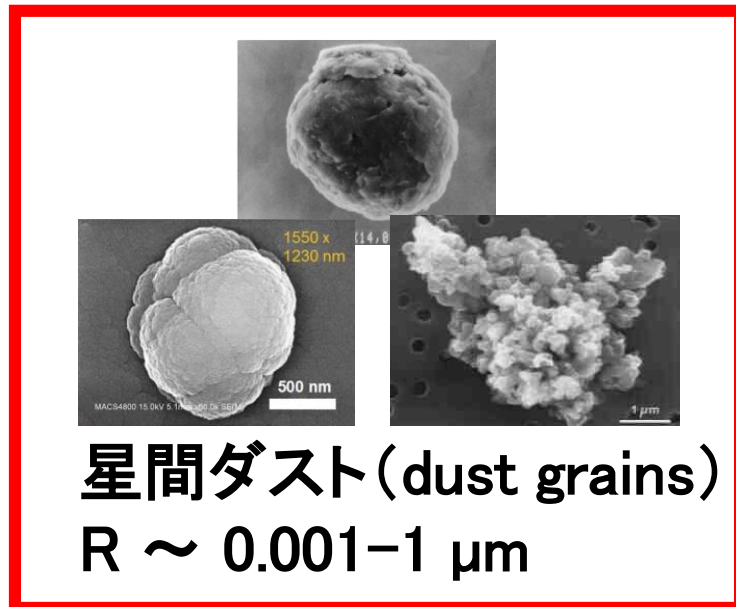
惑星 (planets)

$R \sim 2000-100000 \text{ km}$



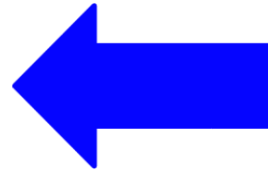
微惑星 (planetesimals)

$R \sim 0.1-1000 \text{ km}$



小石/石 (pebbles/rocks)

$R \sim 0.1-100 \text{ cm}$

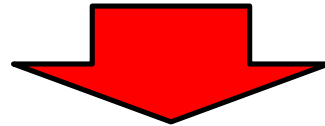


# 1-1. 星間ダスト

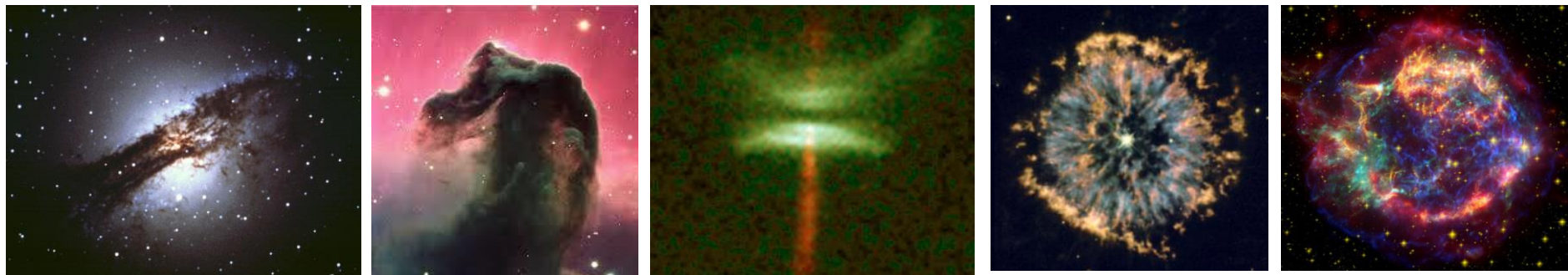
可視光線で見た天の川銀河 → 多くの領域が暗く見える



赤外線で見えた天の川銀河 → 可視光で暗い領域が明るい



**ダストは紫外可視光線を吸収し、赤外線を放射する**

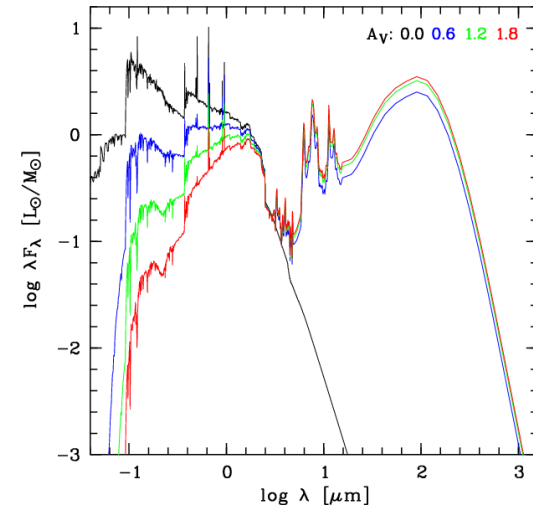




# 1-2. 宇宙ダストの役割

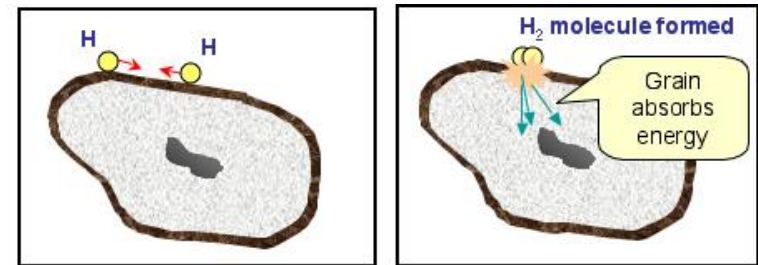
## ○ 星の光を吸収・散乱、赤外線で熱輻射

- 星や銀河の見かけを大きく変える
- 星間空間のエネルギーバランスを制御



## ○ 表面上における分子の形成

- 分子雲中での星の形成を促進
- 有機物の形成場所



## ○ 地球などの固体惑星の原材料(構成物質)

- ダストの集積で惑星を形成
- 生命を生み出す基盤に



# 1-3. 星間ダストは何からできているか？

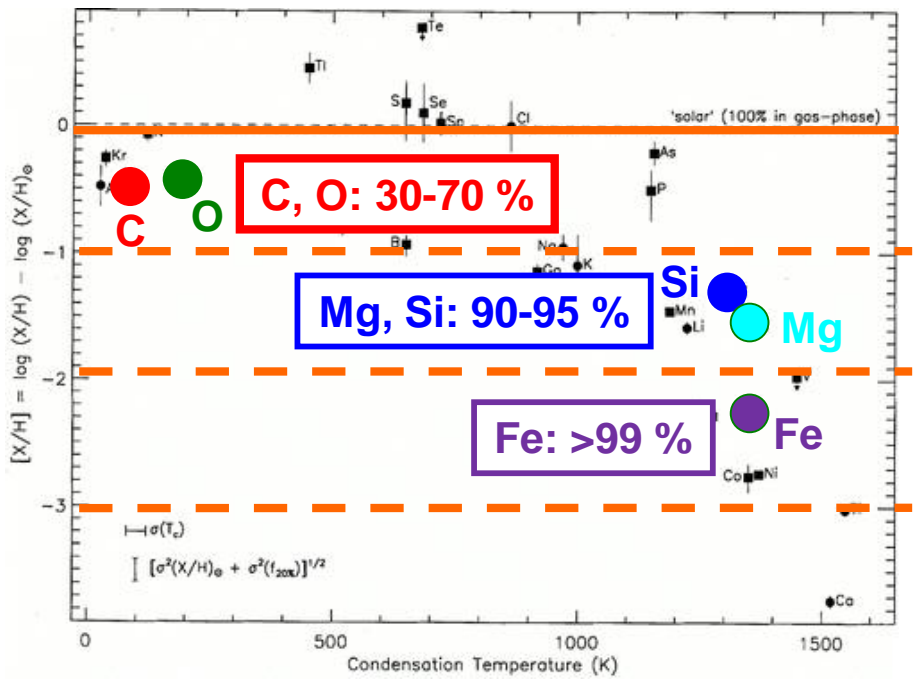
宇宙に存在する元素(太陽の元素組成)のトップ10

(Asplund+2009, ARAA, 47, 481)

Element	Log10(n)	Ratio to H
<del>H</del>	<del>12.00</del>	<del>1.00</del>
<del>He</del>	<del>10.93</del>	<del>8.51x10<sup>-2</sup></del>
O	8.69	4.90x10 <sup>-4</sup>
C	8.43	2.69x10 <sup>-4</sup>
<del>Ne</del>	<del>7.93</del>	<del>8.51x10<sup>-5</sup></del>
<del>N</del>	<del>7.83</del>	<del>6.76x10<sup>-5</sup></del>
Mg	7.60	3.98x10 <sup>-5</sup>
Si	7.51	3.24x10 <sup>-5</sup>
Fe	7.50	3.16x10 <sup>-5</sup>
S	7.12	1.32x10 <sup>-5</sup>

星間ガス相における元素の存在量(太陽の元素組成に対する比)

(Savage & Sembach 1996, ARAA, 34, 270)

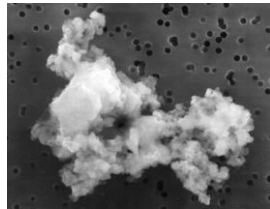
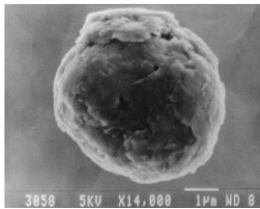


炭素・酸素のおよそ半分、シリコン・マグネシウム・鉄の90%以上はガス相にない  
 → 固相(ダスト)として存在するはず

# 1-4. 星間ダストの組成・サイズ・存在量

## ○ 炭素質ダスト

- graphite (グラファイト)
- 非晶質炭素



## ○ ケイ酸塩(シリケート)ダスト

- $Mg_xFe_{(1-x)}SiO_3$  (輝石)  
 $MgSiO_3$ 、 $FeSiO_3$
- $Mg_{2x}Fe_{2(1-x)}SiO_4$  (かんらん石)  
 $Mg_2SiO_4$ 、 $Fe_2SiO_4$ 、 $MgFeSiO_4$
- $SiO_2$  (石英)

## ○ 星間ダストのサイズ分布

古典的モデル (Mathis, Rumpl, & Nordsieck 1977)

→ べき乗分布  $dn/dt \propto a^{-3.5}$  between  $a = 0.005-0.25 \mu m$

## ○ 銀河系の星間ダストの総質量 ( $\sim 5 \times 10^8 M_{sun}$ )

ガスの質量のおよそ1% (DISM  $\sim 0.01$ )、全重元素量の半分

シリケートと炭素質ダストの質量比 :  $M_{sil} / M_{gra} \sim 2$



# 1-5. 宇宙ダストの形成場所

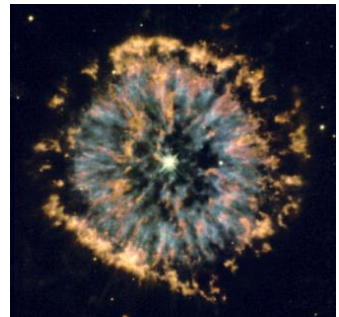
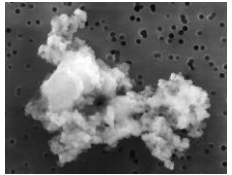
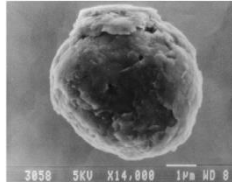
星間空間内では、密度が低すぎてダストは形成できない

## ○ 宇宙ダスト(固体微粒子)の生成条件

- ・ 密度が高い ( $> \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ )
- ・ ダストの原材料である重元素が豊富に存在する
- ・ 温度が低い ( $1500^\circ\text{C}$ 以下に減少する)

## ○ ダストは星の進化末期に形成される

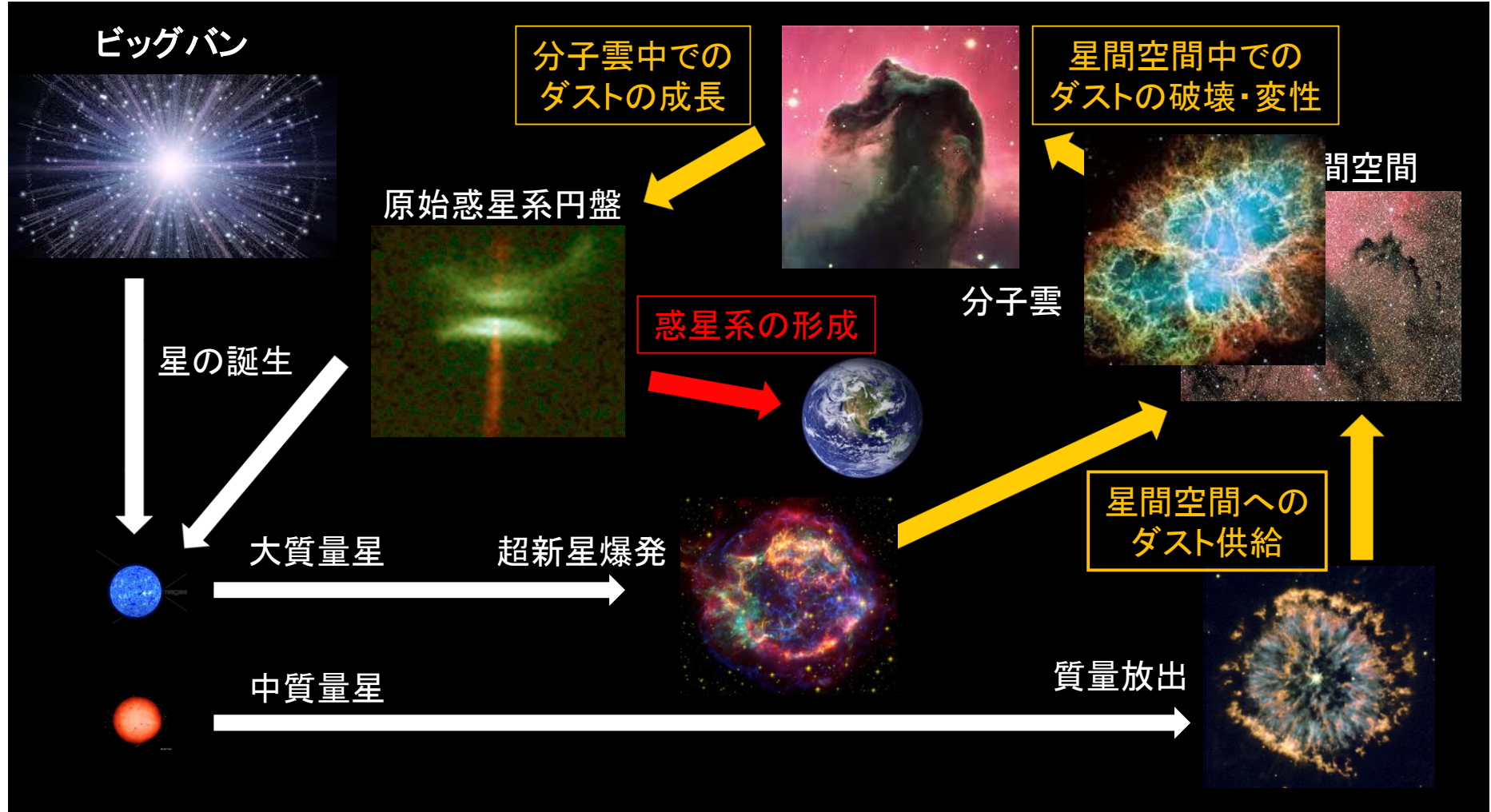
- 中質量星(太陽質量の2-8倍)の進化後期に放出されるガス中 → 主に**漸近巨星分枝(AGB)星**
- 大質量星(太陽質量の8倍より重い星)から起こる**超新星爆発**



# ここまでのまとめ

- 星間ダストは惑星形成の基本構成物質と考えられている
- ダストは紫外可視光線を吸収し、赤外線を放出する
  - 光の吸収・散乱・熱輻射の効率は、ダストの組成・サイズ分布・量に依存
- 銀河系の星間ダストの組成とサイズ
  - 炭素質ダストとシリケート、典型的なサイズ(0.005–0.3  $\mu\text{m}$ )
- 銀河系内の星間ダストの量
  - ガスの質量のおよそ1% ( $\sim 5 \times 10^8 M_{\text{sun}}$ )、全重元素量の半分
  - Mg, Si, Fe原子のほぼすべてがダストに取り込まれている
- ダストは進化末期の星(AGB星と超新星)で形成される

# 2-1. 宇宙におけるダストの生成と進化



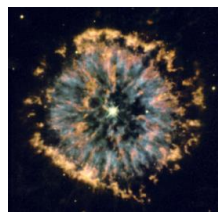
ダストは様々な天体現象と密接に関わっており、銀河中のダストのサイズ分布・存在量は星形成活動とともに時々刻々と変化する

# 2-2. 星間ダストの供給と破壊

## ○ 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



AGB星  
0.004 Msun/yr



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

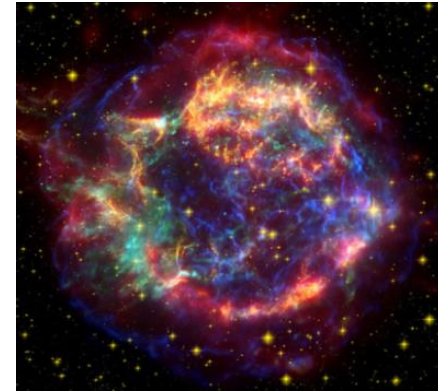
星間ダストの破壊効率は供給率を上回る

→ 星間ダストの量は時間とともに減少するはず

# 2-3. 高温ガス中でのダストの破壊過程

## ○ 高温プラズマ中でもダストは蒸発しない

- ガス密度が非常に低いため
- ダストの温度は高々100K程度  
(電子の衝突加熱とダストの熱放射冷却のバランスで決まる)



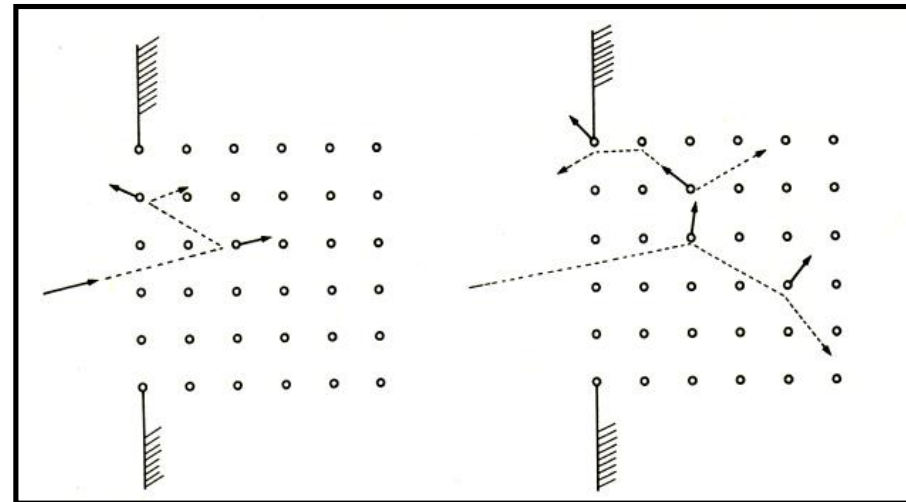
## ○ スパッタリング (sputtering)

高エネルギーのイオンの衝突により、固体表面の原子がはじきだされる物理過程

- ダストの表面が徐々に削られる

### スパッタリングイールド $Y(E)$ :

入射イオン一個の衝突あたりに  
固体から放出される原子の数



## 2-4. スパッタリングイールドの見積もり

### ○ スパッタリングイールドの理論公式 (Bohdansky 1984)

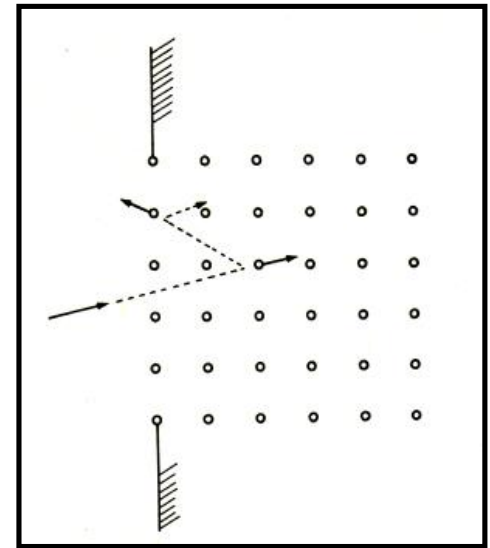
$$Y_i^0(E) = 4.2 \times 10^{14} \frac{S_i(E)}{U_0} \frac{\alpha_i(\mu_i)}{K\mu_i + 1} \left[ 1 - \left( \frac{E_{\text{th}}}{E} \right)^{2/3} \right] \left( 1 - \frac{E_{\text{th}}}{E} \right)^2,$$

**## backward sputtering, normal incidence (垂直入射)**

$$S_i(E) = 4\pi a_{\text{sc}} Z_i Z_d e^2 \frac{M_i}{M_i + M_d} s_i(\epsilon_i),$$

$$a_{\text{sc}} = 0.885 a_0 \left( Z_i^{2/3} + Z_d^{2/3} \right)^{-1/2}$$

$$E_{\text{th}} = \begin{cases} \frac{U_0}{g_i(1 - g_i)} & \text{for } \frac{M_i}{M_d} \leq 0.3, \\ 8U_0 \left( \frac{M_i}{M_d} \right)^{1/3} & \text{for } \frac{M_i}{M_d} > 0.3, \end{cases}$$

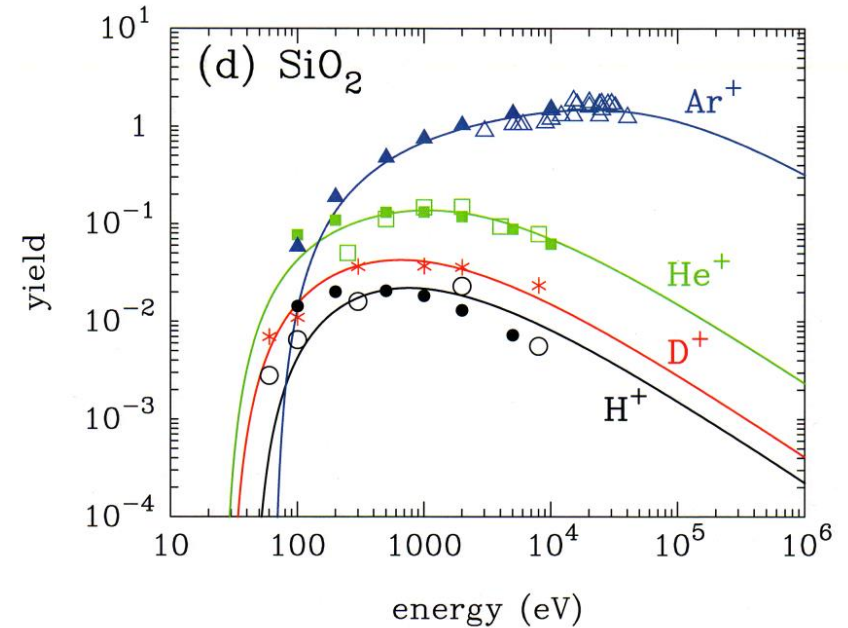
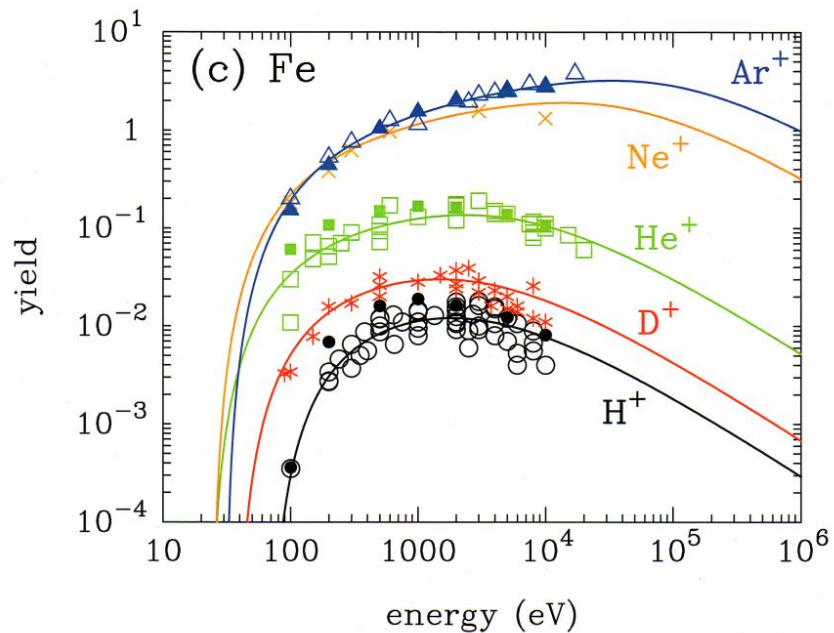
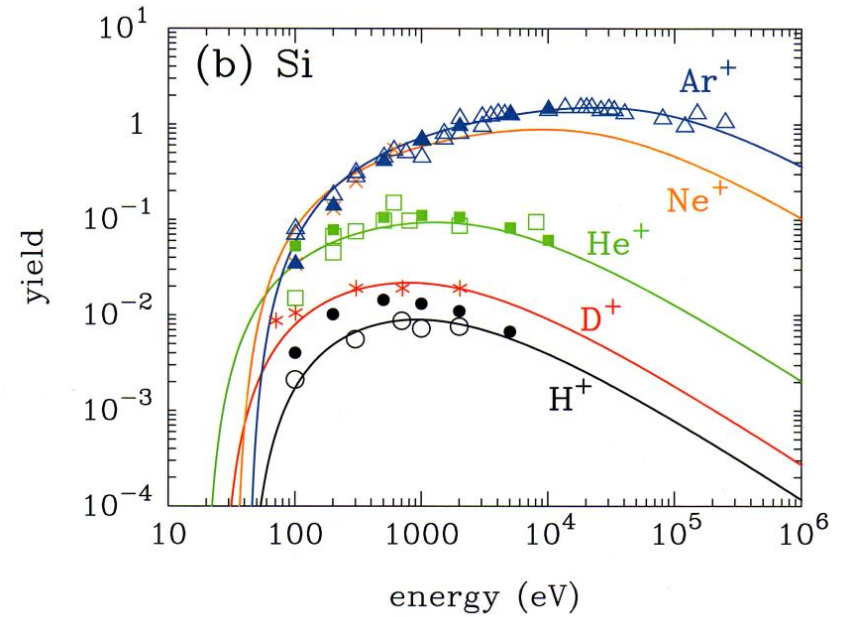
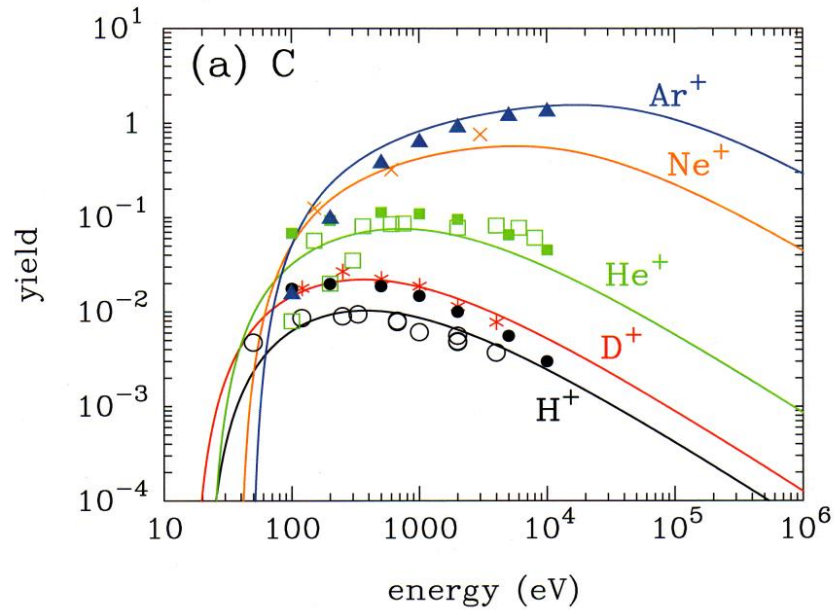


**K (free parameter) → 実験との比較から決定**



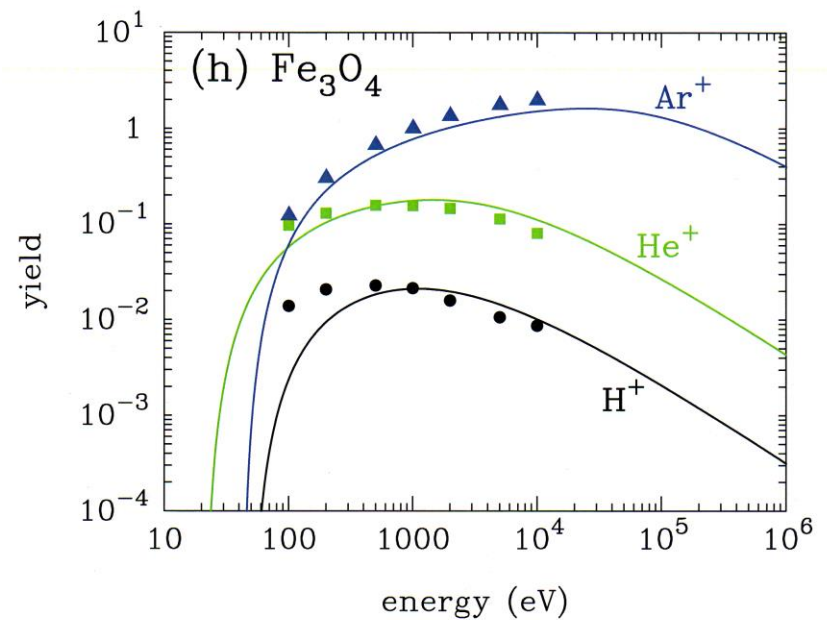
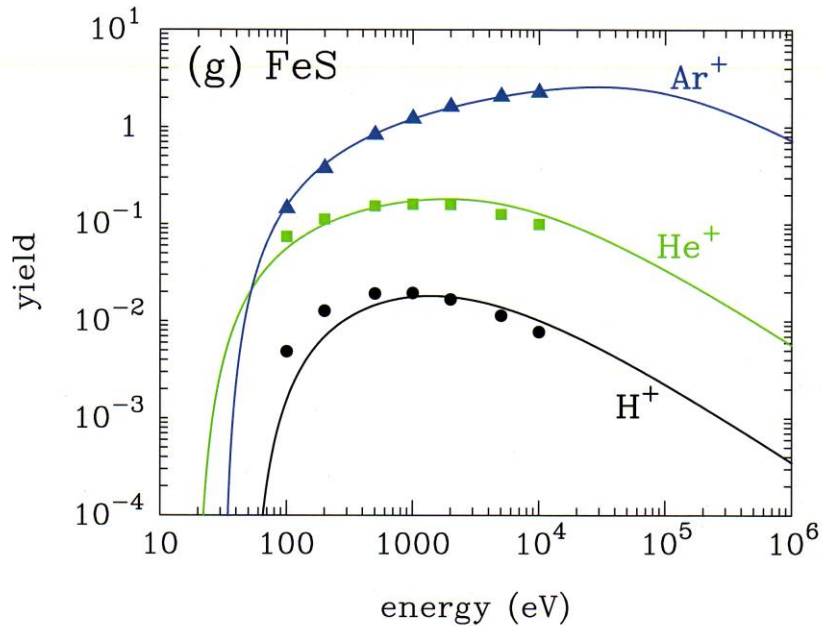
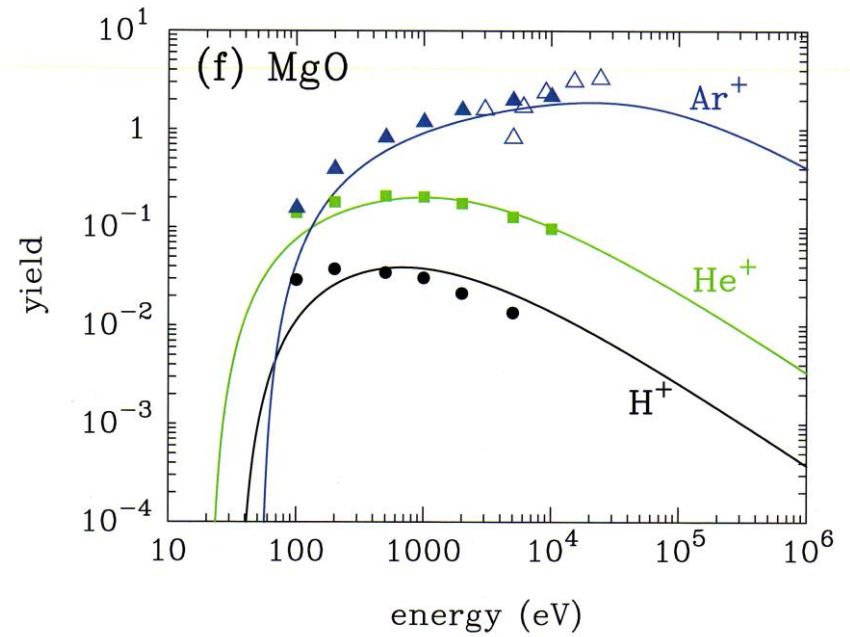
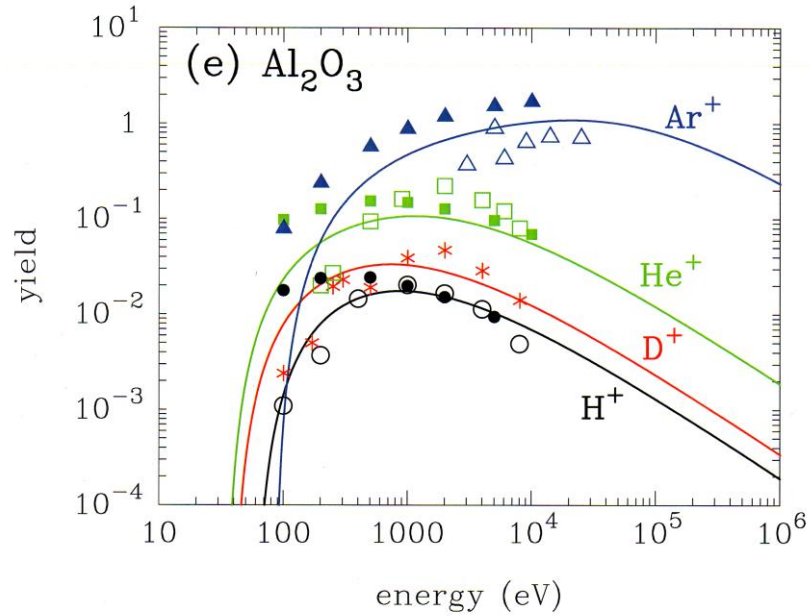
# 2-5-1. スパッタリングイールド(1)

Nozawa+2006



# 2-5-2. スパッタリングイールド(2)

Nozawa+2006



# 2-6-1. スパッタリングによるダストの破壊(1)

## ○ 球形ダストの体積変化

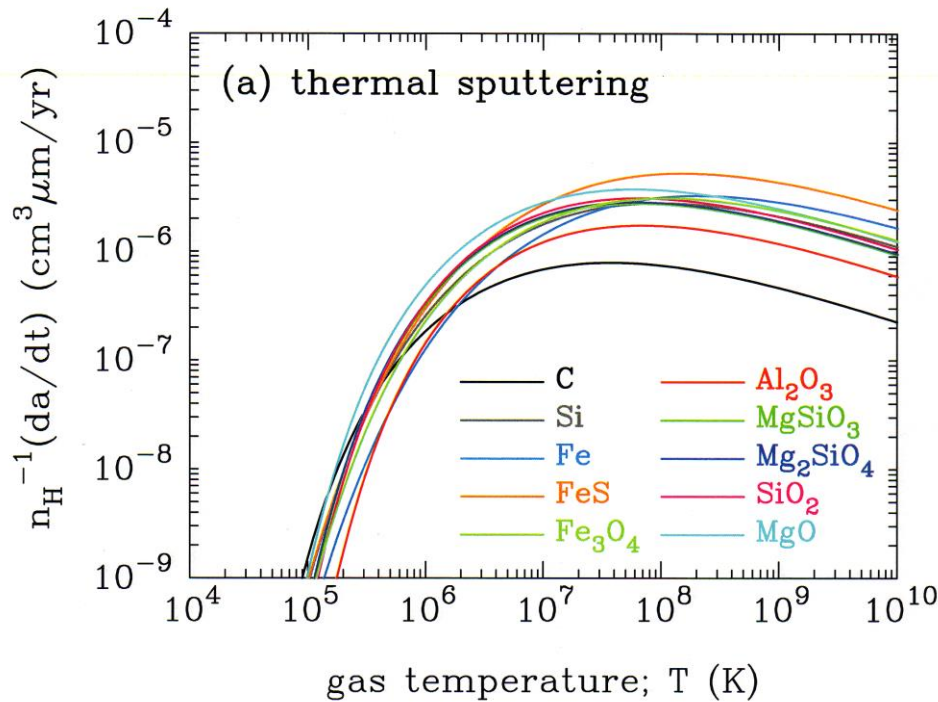
$$\frac{dV_{\text{dust}}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{4\pi a^3}{3} \right)$$

## ○ スパッタリングによるダスト半径の減少率

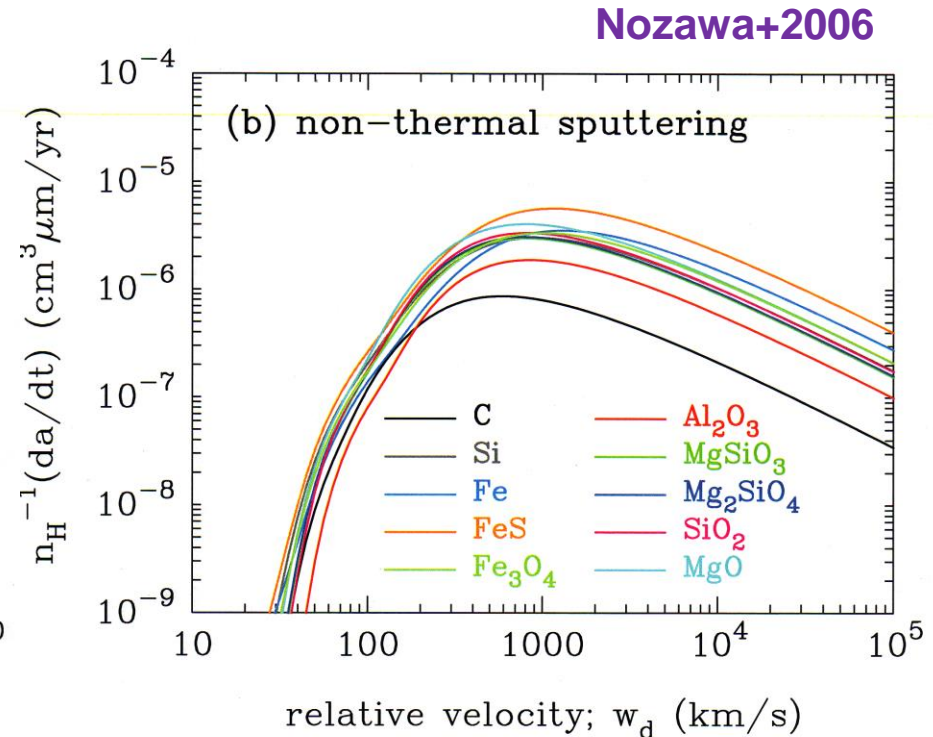
$$4\pi a^2 \left( \frac{da}{dt} \right) = -\Omega_0 \pi a^2 n_i \langle v_i Y_i \rangle$$
$$\frac{da}{dt} = -\frac{\Omega_0}{4} n_i \langle v_i Y_i \rangle$$

スパッタリングによる半径の減少率は、ダストの初期半径に陽に依存しない

# 2-6-2. スパッタリングによるダストの破壊(2)



横軸：イオンの温度(熱速度分布)



横軸：ダストとガスの相対速度

- ・ スパッタリングによるダスト半径の減少率は、 $10^5$  K(数十km) から急激に増加し、 $10^7$ - $10^8$  K(500-1000 km/s)にピークをもつ
- ・  $T > 10^6$  Kでは、半径の減少率は温度にあまり依存しない

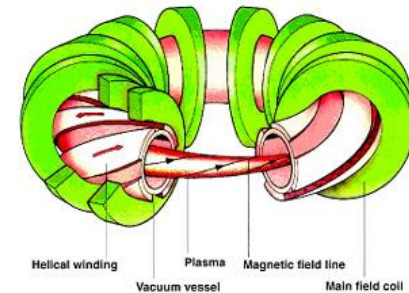
# 3-1. スパッタリングによるダスト半径の減少率

## ○ 宇宙空間でのスパッタリングによるダストの半径の減少率

$$\left| \frac{da}{dt} \right| = 10^{-6} \left( \frac{n_H}{1 \text{ cm}^{-3}} \right) \mu\text{m yr}^{-1} \text{ cm}^{-3}$$

## ○ 地上(核融合炉)でのスパッタリングによる浸食率

$$\begin{aligned} \left| \frac{da}{dt} \right| &= 10^8 \left( \frac{n_H}{10^{14} \text{ cm}^{-3}} \right) \mu\text{m yr}^{-1} \text{ cm}^{-3} \\ &= 10^4 \left( \frac{n_H}{10^{14} \text{ cm}^{-3}} \right) \text{cm yr}^{-1} \text{ cm}^{-3} \\ &\approx 30 \left( \frac{n_H}{10^{14} \text{ cm}^{-3}} \right) \text{cm day}^{-1} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$



スパッタリングイールドは過大評価されていないか？



# 3-2. ガスイオンの衝突のタイムスケール

## ○ 原子ガスの衝突のタイムスケール

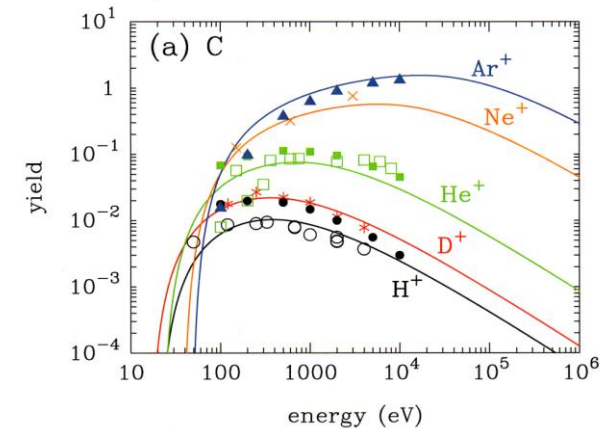
$$\tau_{\text{coll}}^{-1} = \pi a^2 v n_{\text{H}}$$

## ○ 半径1 $\mu\text{m}$ のダスト(ビーム領域)に対して

$$\tau_{\text{coll}}^{-1} = 1.0 \left( \frac{a}{1 \mu\text{m}} \right)^2 \left( \frac{v}{300 \text{ km s}^{-1}} \right) \left( \frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right) \text{ s}^{-1}$$

$$\tau_{\text{coll}}^{-1} = 10^{14} \left( \frac{a}{1 \mu\text{m}} \right)^2 \left( \frac{v}{300 \text{ km s}^{-1}} \right) \left( \frac{n}{10^{14} \text{ cm}^{-3}} \right) \text{ s}^{-1}$$

## 半径1  $\mu\text{m}$ のダストのエネルギー散逸のタイムスケール:  $\sim 10^{-6} \text{ s}$



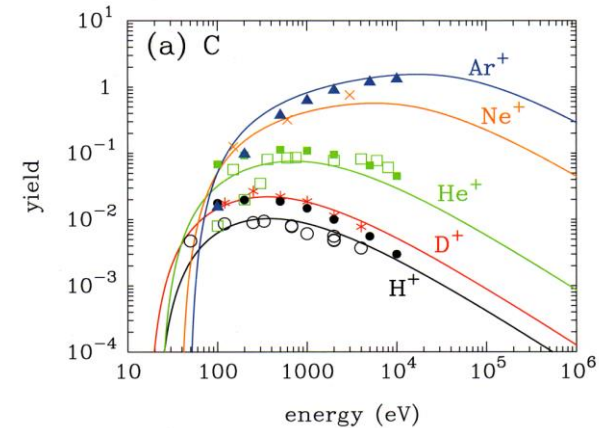
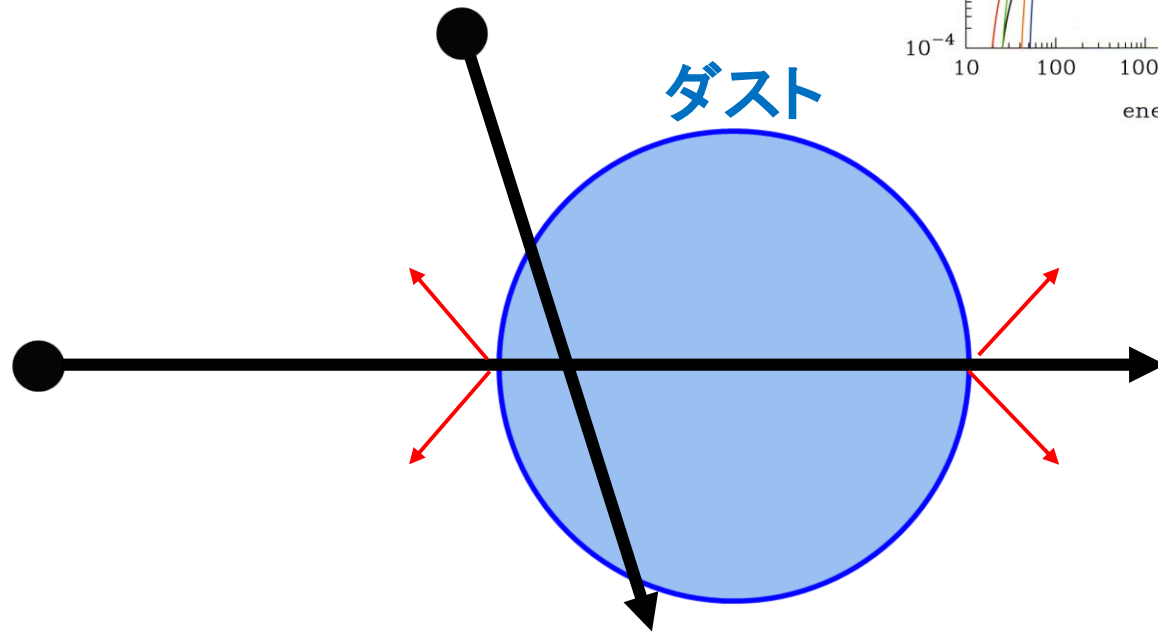
地上実験ではprojectilesは、doseとして入射される  
→ 宇宙環境でのダスト破壊に適用できるのか？



# 3-3. 星間ダストが有限サイズである効果

## ○ 前提

- 垂直入射
- バルク物質を仮定

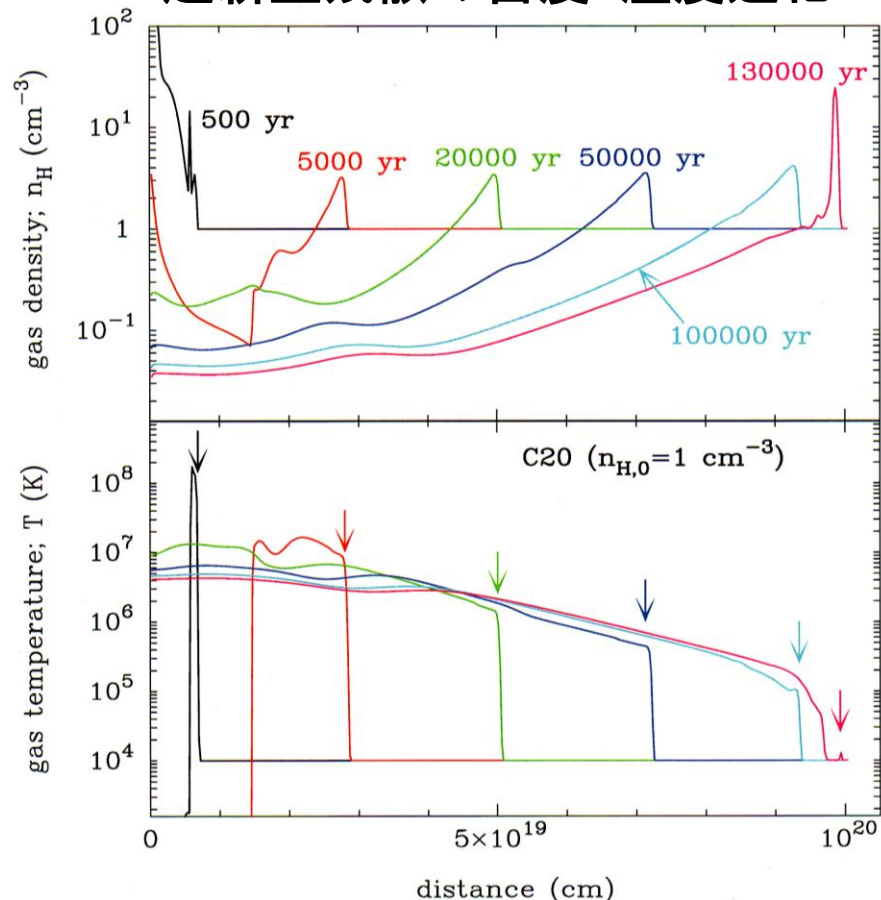


星間ダストは有限サイズ ( $< 1 \mu\text{m}$ ) であり、それがどのような効果をもたらすのかよくわかっていない

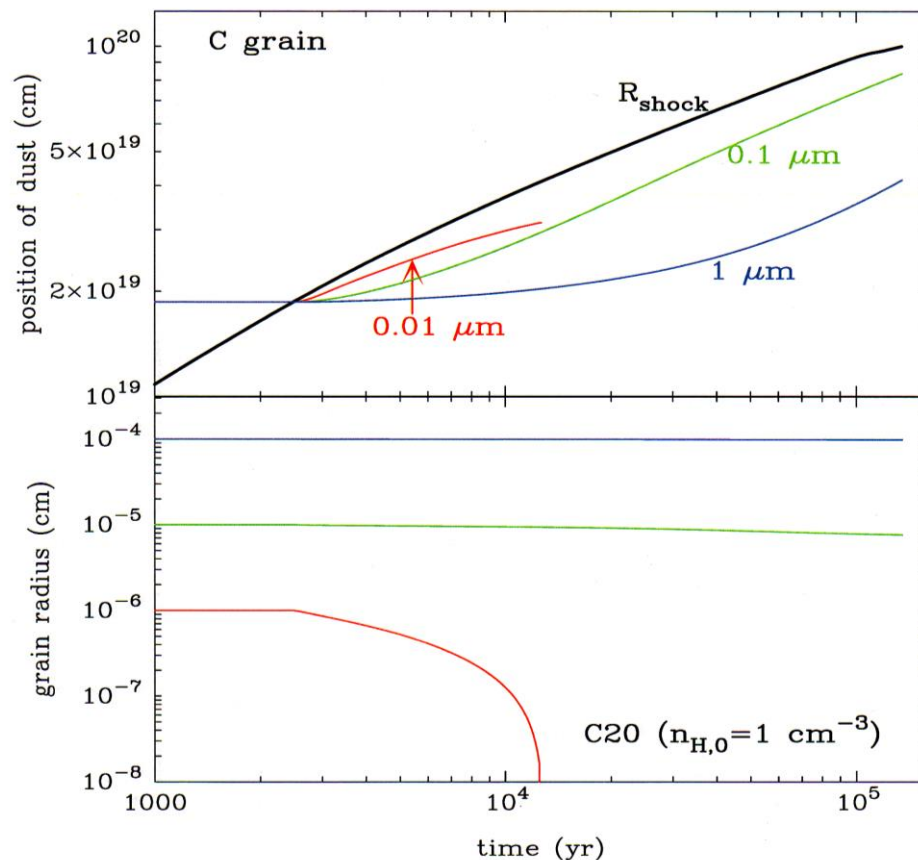
# 3-4. 超新星衝撃波による星間ダストの破壊

Nozawa+2006

## 超新星残骸の密度・温度進化



## 超新星残骸中のダストの進化

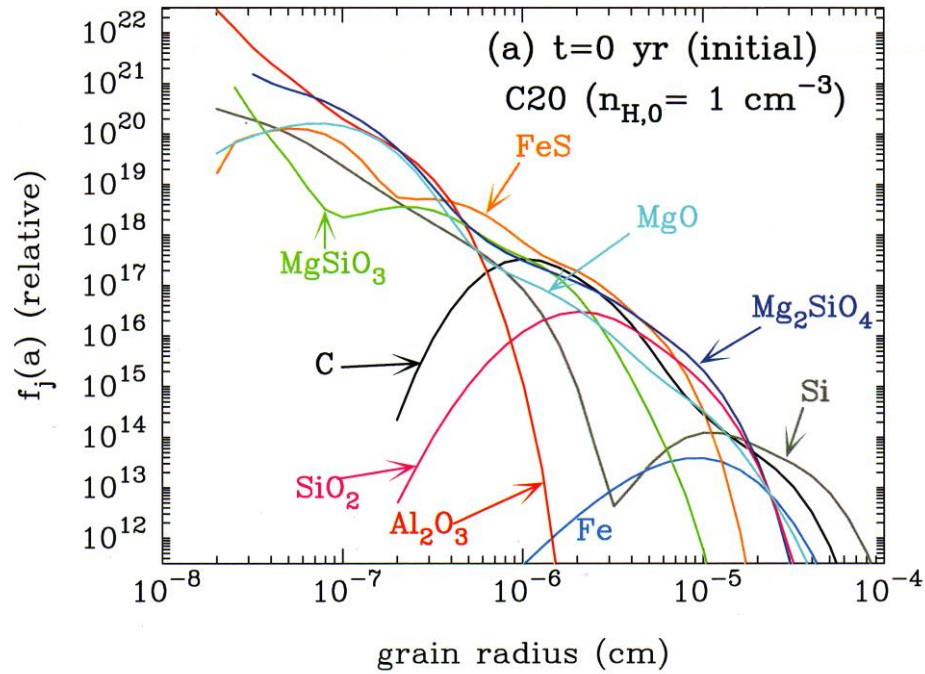


高温プラズマ中では、小さいダストが支配的に破壊される

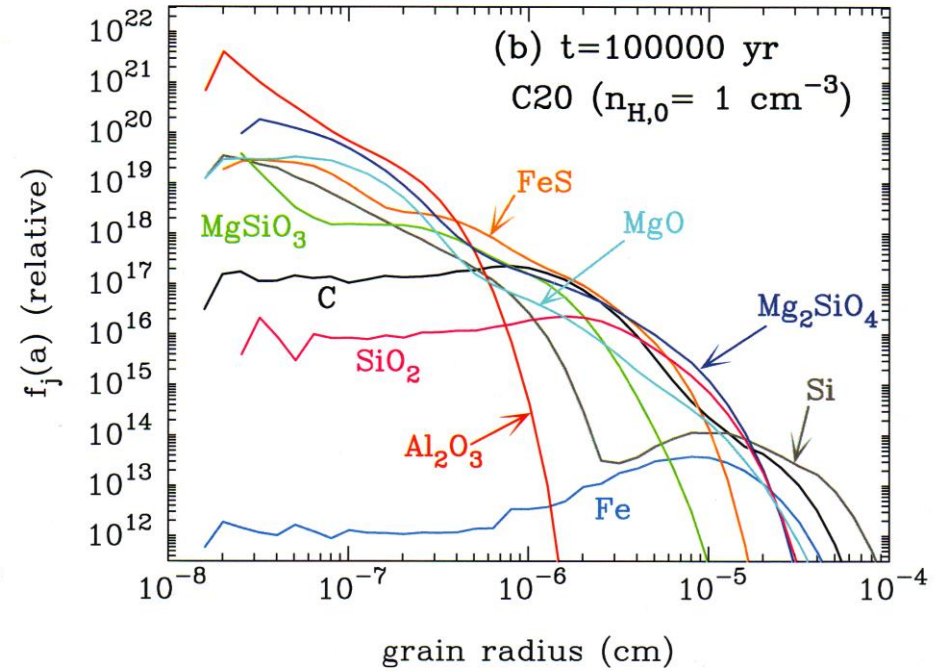
# 3-5. ダストのサイズ分布の変化

Nozawa+2006

破壊前



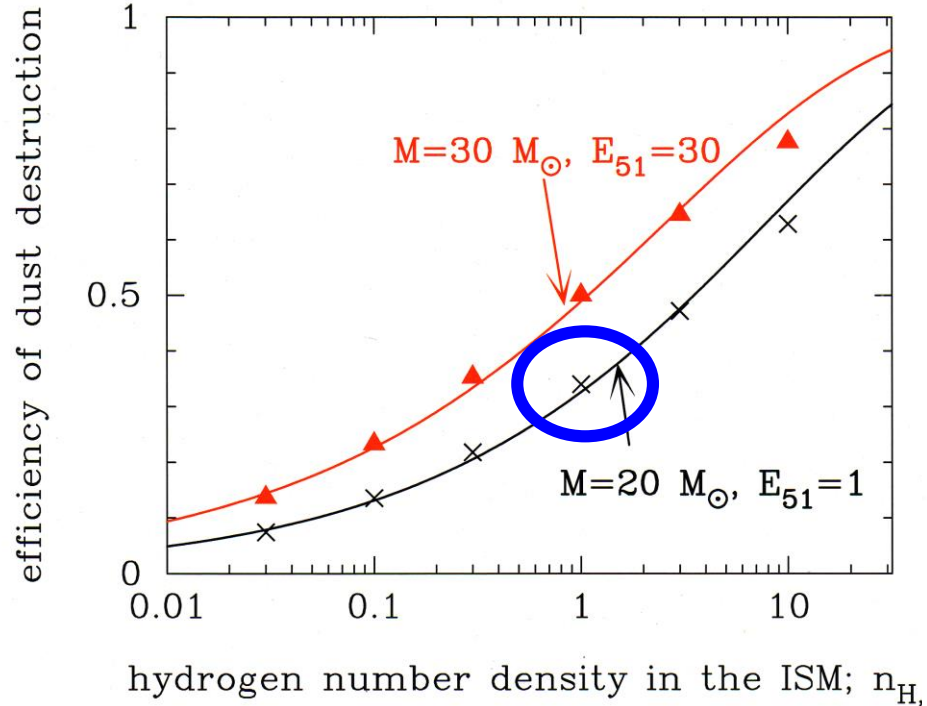
破壊後



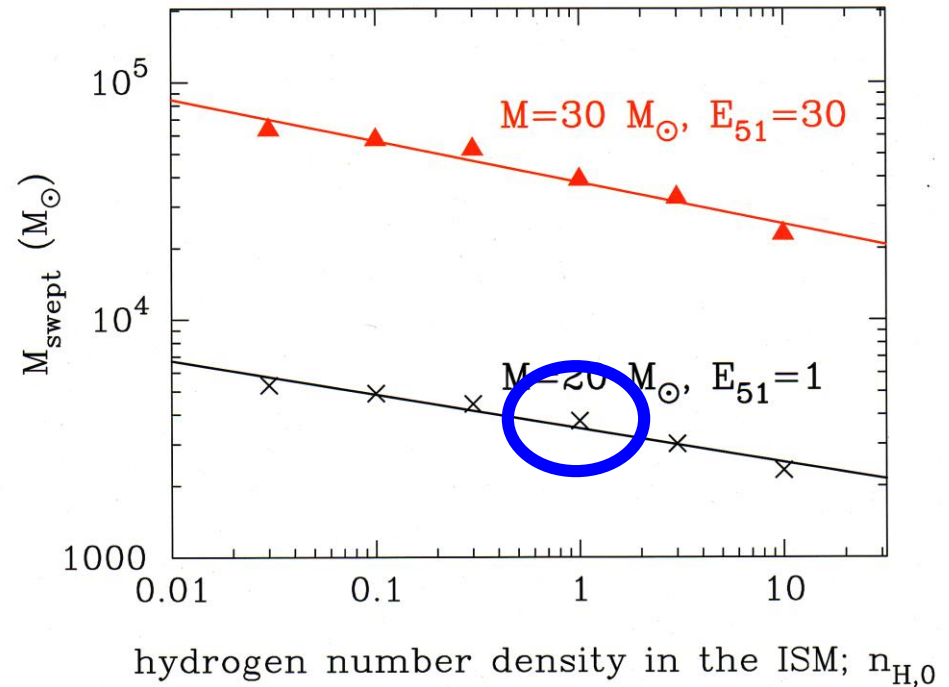
# 3-6. スパッタリングによるダストの破壊効率

Nozawa+2006

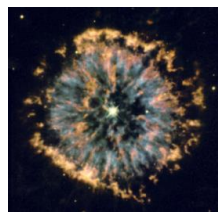
## 衝撃波による星間ダストの破壊効率



## 衝撃波により掃かれるガスの質量



# 4-1. 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      ダストが凝縮

$$M_{\text{dust}} = 0.6 M_{\text{sun}} / \text{SN}$$



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

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

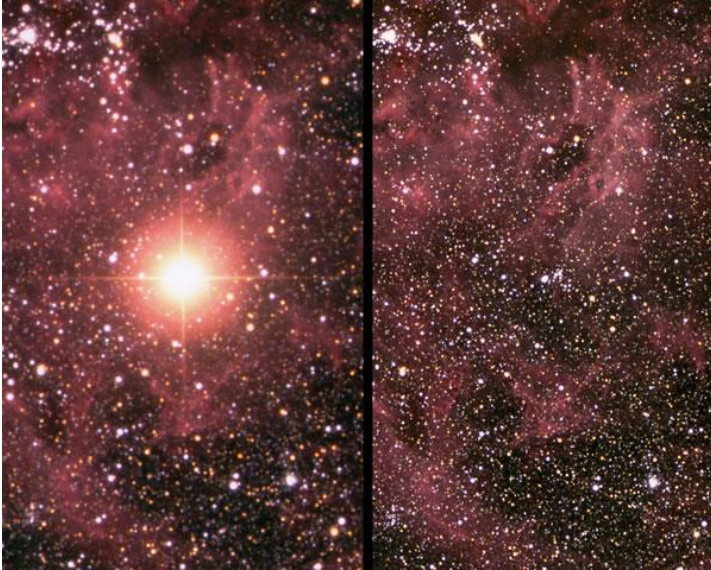
超新星が起こる頻度      衝撃波が掃くガスの質量      星間空間でのダストとガスの質量比      ダストが破壊される割合

$$M_{\text{dust}} = -6 M_{\text{sun}} / \text{SN}$$

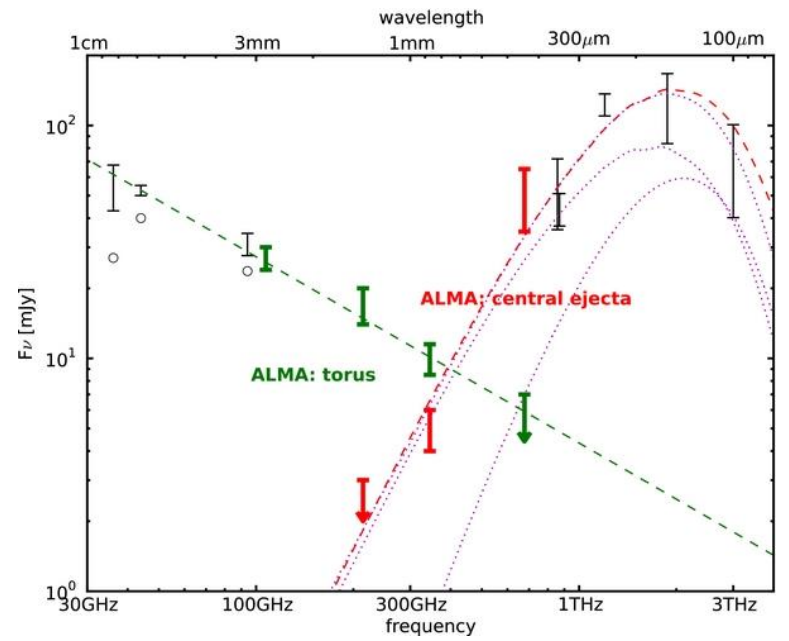
**星間ダストの破壊効率は供給率を上回る  
→ 星間ダストの量は時間とともに減少するはず**



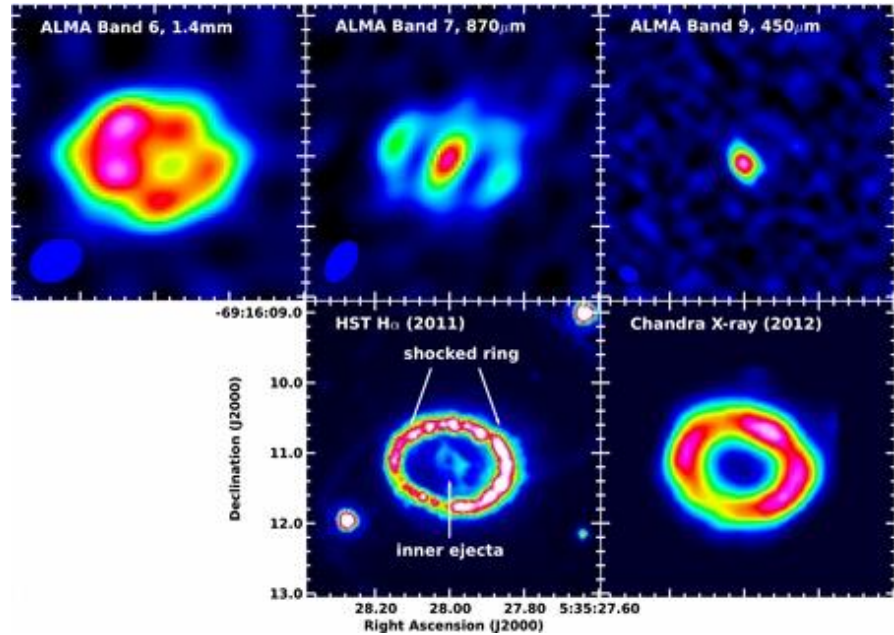
# 4-2. SN 1987A内の大量のダストの観測



SED of 25-years old SN 1987A



Matsuura+2011, Science  
Indebetouw+2014



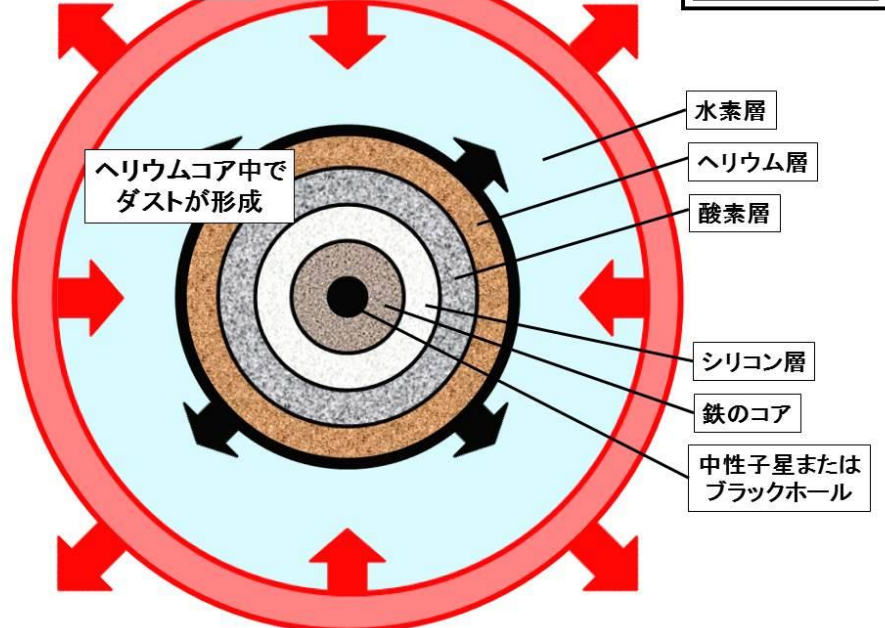
HerschelやALMAによる遠赤外線の観測は、SN 1987A内に  $\sim 0.5 M_{\text{sun}}$  ものダスト (温度20K) が形成されていることを明らかにした



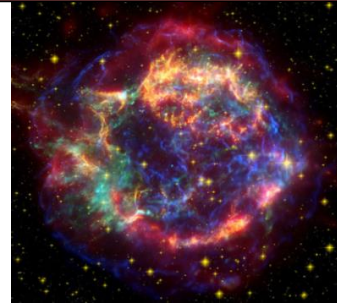
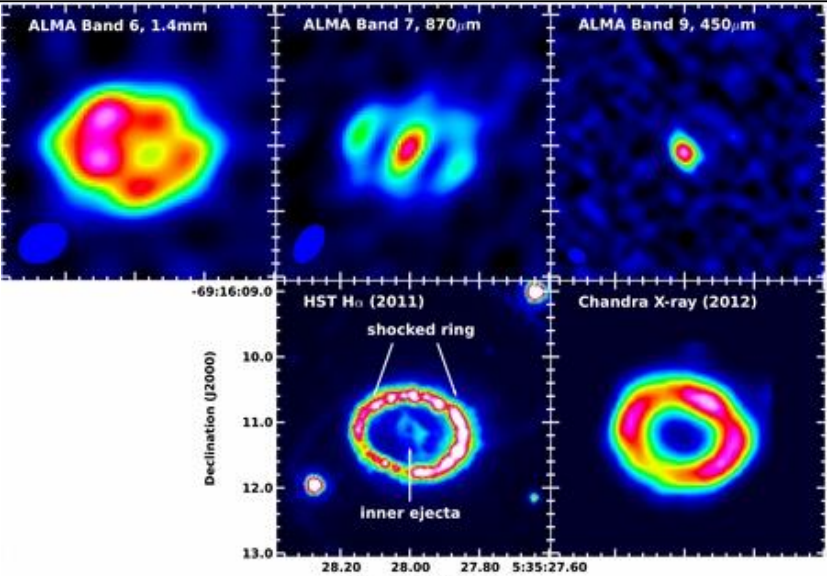
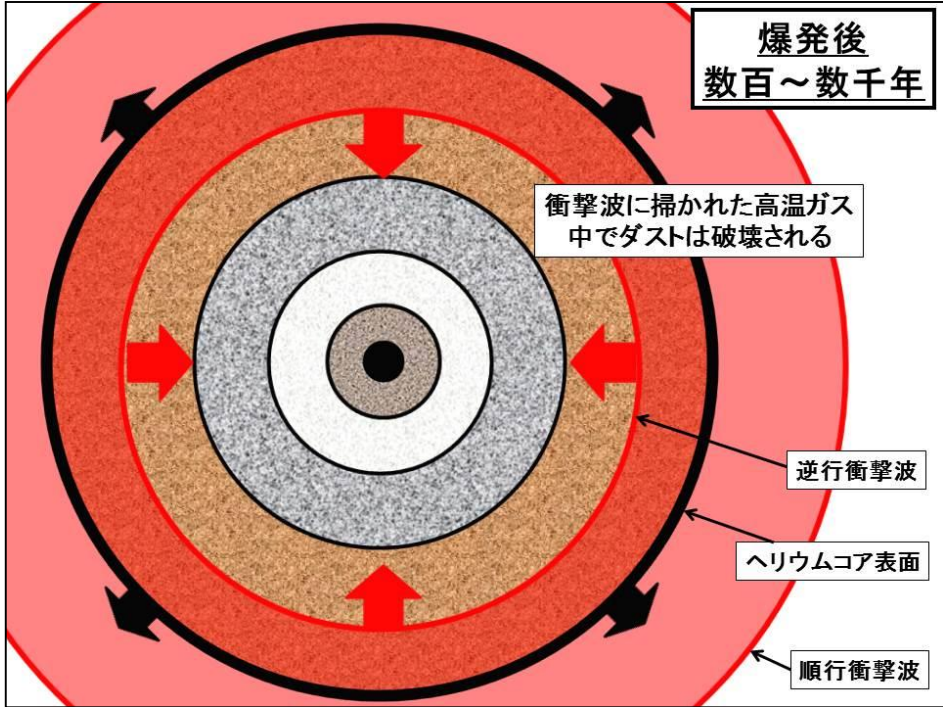
# 4-3. 後退衝撃波による生成したダストの破壊

表層では衝撃波が発生

爆発後数年



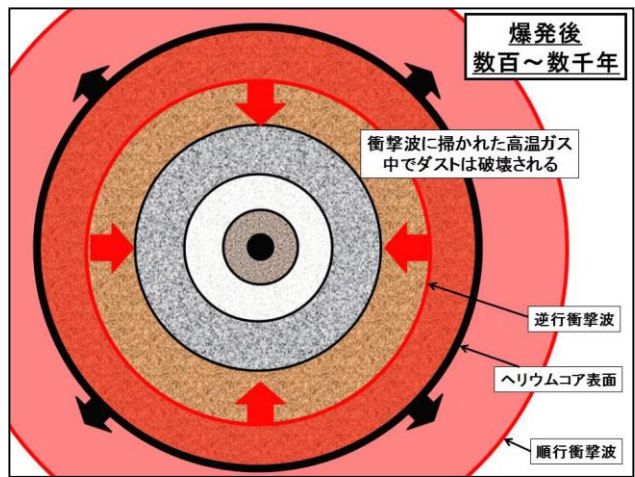
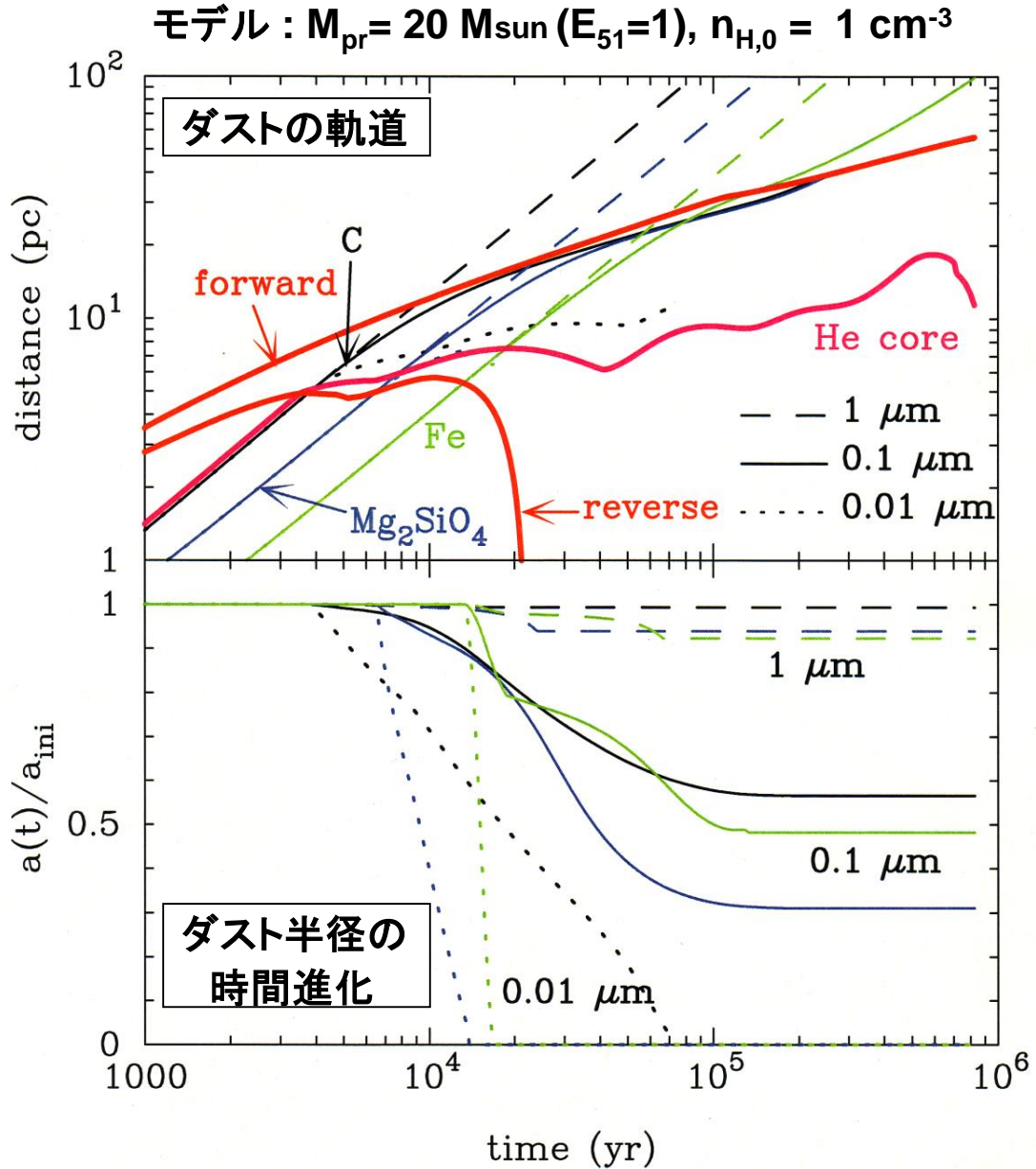
爆発後  
数百～数千年



Nozawa 2014, 天文月報

超新星内部で形成したダストは、やがて後退衝撃波によって掃かれ、その多くは破壊されてしまう

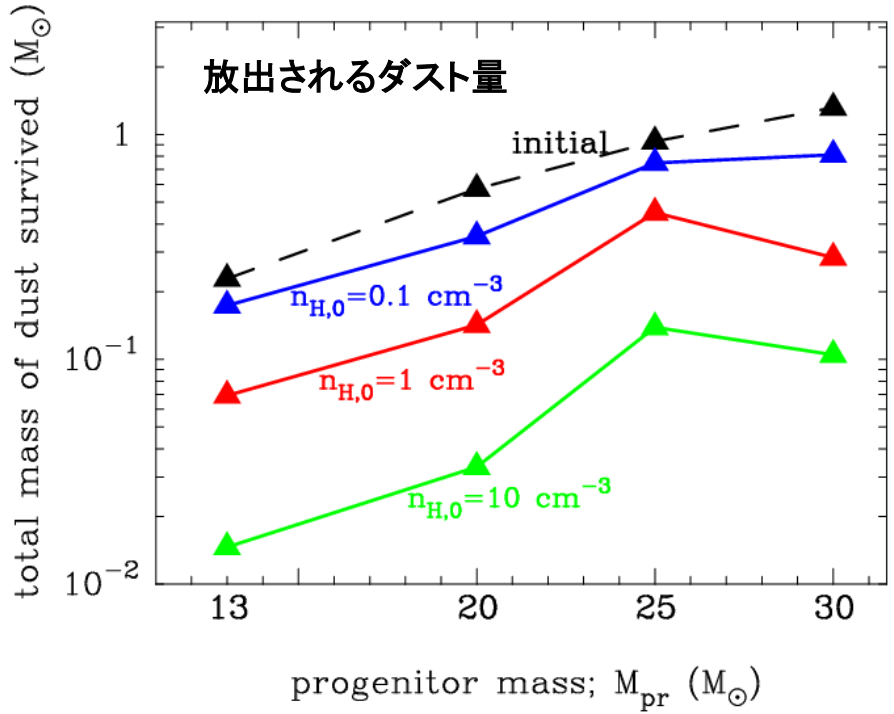
# 4-4. 超新星残骸内でのダストの進化



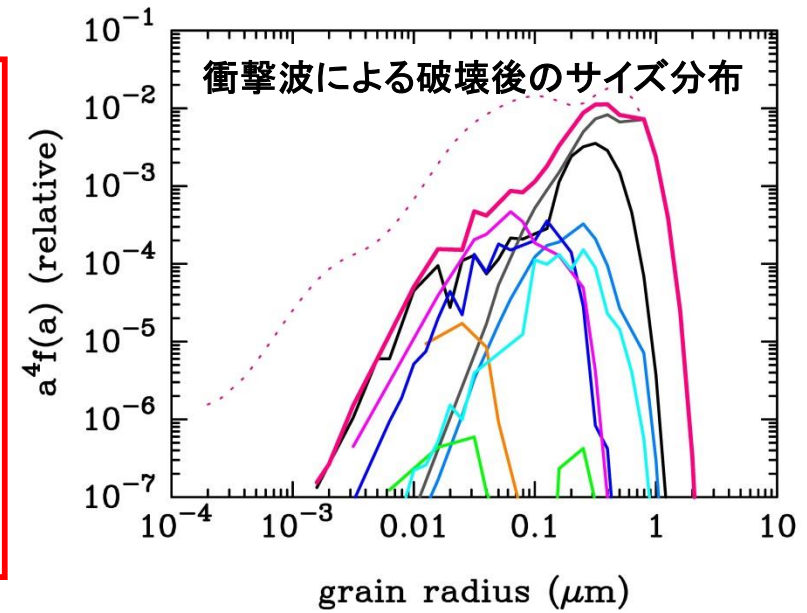
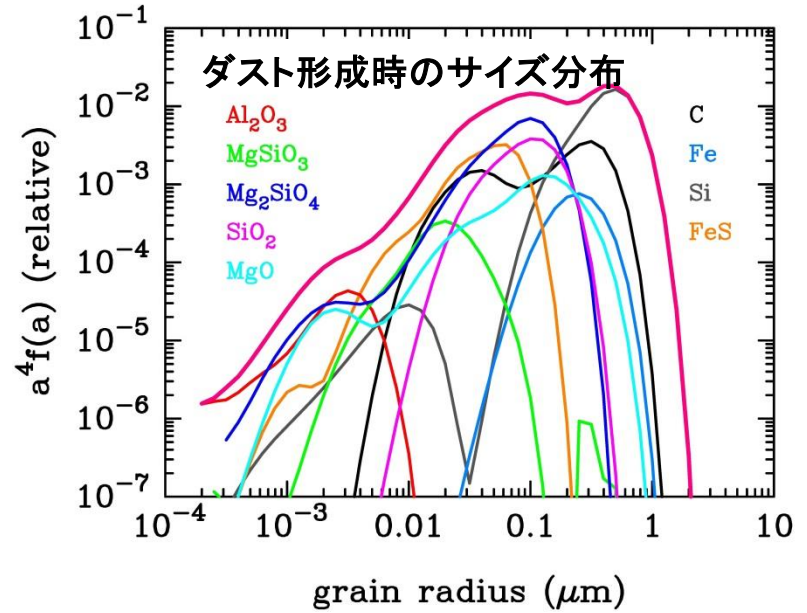
- 超新星残骸内でのダストの進化は、ダストの初期半径と組成に強く依存する
- $a_{ini} = 0.01 \mu m$  (dotted lines) → 完全に破壊される
  - $a_{ini} = 0.1 \mu m$  (solid lines) → shell中に捕獲される
  - $a_{ini} = 1 \mu m$  (dashed lines) → 星間空間に放出される



# 4-5. 超新星爆発時に放出されるダストの性質



Nozawa+2007, ApJ, 666, 955



- 破壊後のダストのサイズ分布は大きい半径 ( $> 0.1 \mu\text{m}$ ) のものに支配される
- 星間空間の密度が高いほど、より多くのダストが破壊される
- $n_H = 1 \text{ cm}^{-3}$  の星間ガス密度では、 $0.07\text{-}0.4 M_{\text{sun}}$  のダストを星間空間へ

# まとめ

## ○ 星間ダストの破壊効率は、星からのダスト供給率よりも高い

→ 現在の銀河系の星間ダストの総量を説明できなさそう

## ○ スパッタリングによるダスト半径の減少率

$$\left| \frac{da}{dt} \right| = 10^{-6} \left( \frac{n_H}{1 \text{ cm}^{-3}} \right) \mu\text{m yr}^{-1} \text{ cm}^{-3}$$

→ バルク物質に対する地上実験結果に基づいている

→ 宇宙環境で有限サイズの星間ダストに適用できるか？

## ○ 超新星内部で形成されたダストも、後退衝撃波によって掃かれ破壊される

→ 超新星による星間ダストの供給量に大きな影響