

超新星爆発時における ダストの生成と生存

野沢 貴也

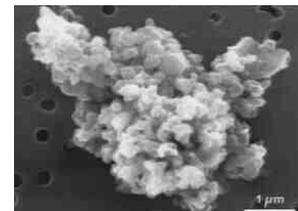
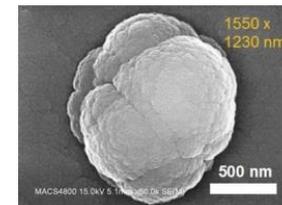
(国立天文台 理論研究部)

○ 宇宙ダスト(宇宙塵)

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

星間塵: 星間空間に存在するダスト

→ 大きさ: $0.001 \sim 1 \mu\text{m}$

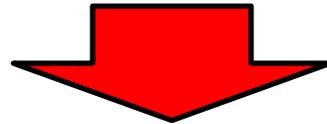


1-1. 星間ダスト

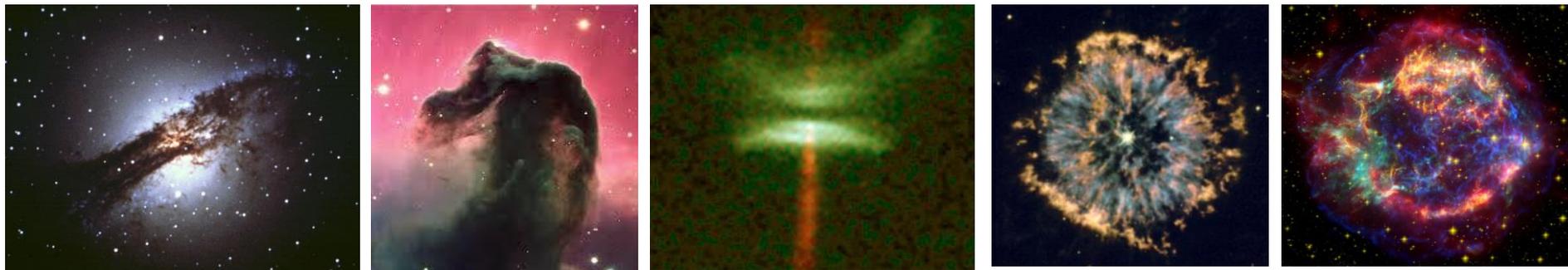
可視光線で見た天の川銀河 → 多くの領域が暗く見える



赤外線で見えた天の川銀河 → 可視光で暗い領域が明るい



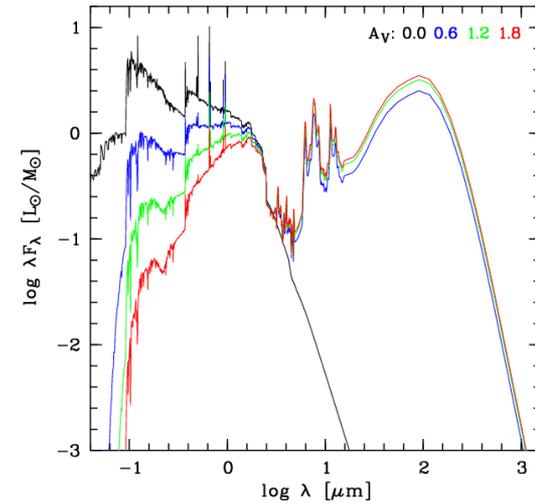
ダストは紫外可視光線を吸収し、赤外線を放射する



1-2. 宇宙ダストの役割

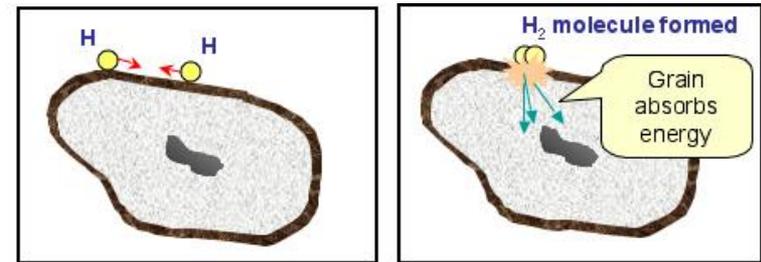
○ 星の光を吸収・散乱、赤外線で熱輻射

- 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



1-3-1. 星間ダストは何からできているか？(1)

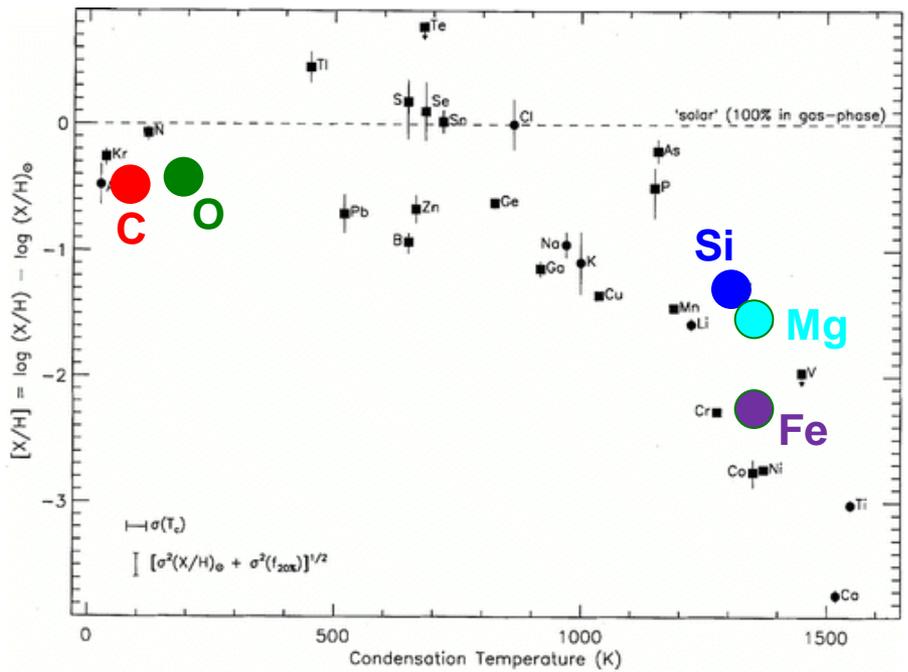
宇宙に存在する元素(太陽の元素組成)のトップ10

(Asplund+2009, ARAA, 47, 481)

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

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)

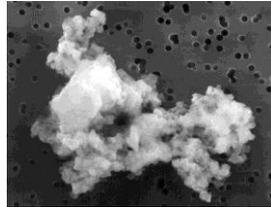
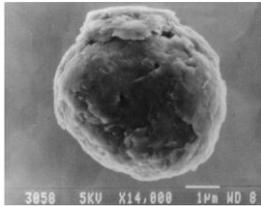


炭素・酸素のおよそ半分、シリコン・マグネシウム・鉄の90%以上はガス相にない
 → 固相(ダスト)として存在するはず

1-3-2. 星間ダストは何からできているか？(2)

○ 炭素質ダスト

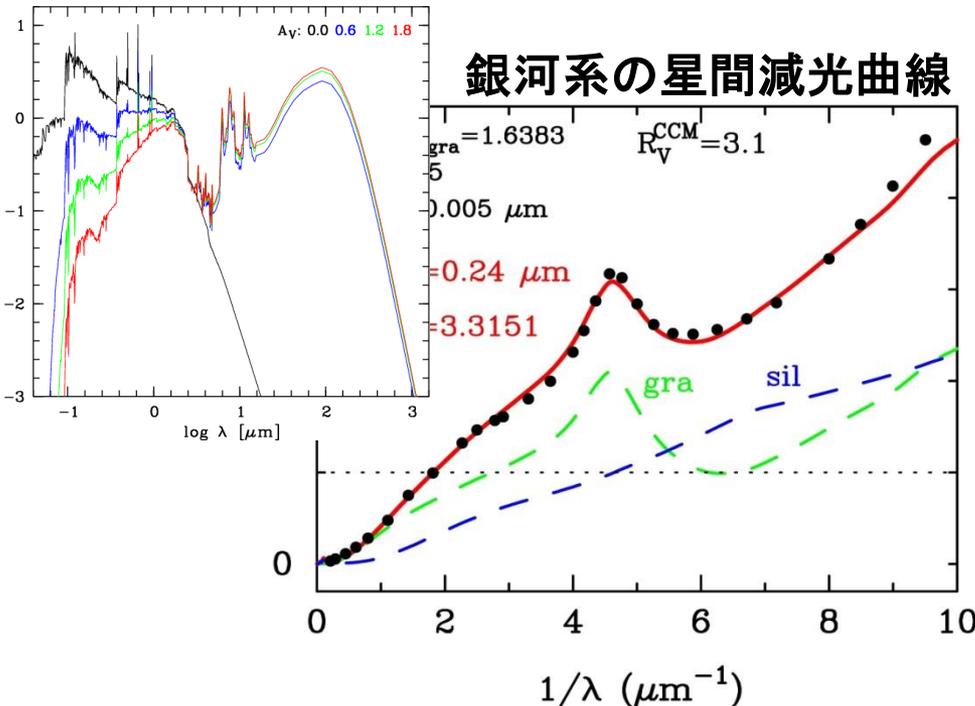
- graphite (グラファイト)
- 非晶質炭素



○ 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)

銀河系の星間減光曲線



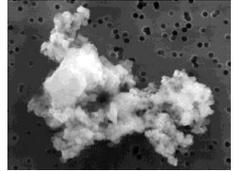
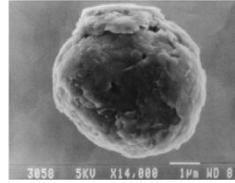
○ MRN ダストモデル

(Mathis, Rumpl, & Nordsieck 1977)

- 星間ダストの組成
シリケート & グラファイト
 $M_{sil} / M_{gra} \sim 2$
- 星間ダストのサイズ分布
べき乗分布 $n(a) \propto a^{-3.5}$
 $a_{max} \sim 0.25 \mu m$, $a_{min} \sim 0.005 \mu m$

1-4. 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



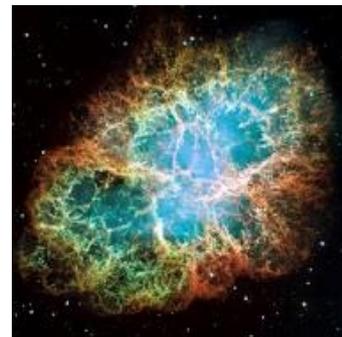
○ 宇宙ダスト(固体微粒子)の生成条件

- 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°C 以下に減少する)



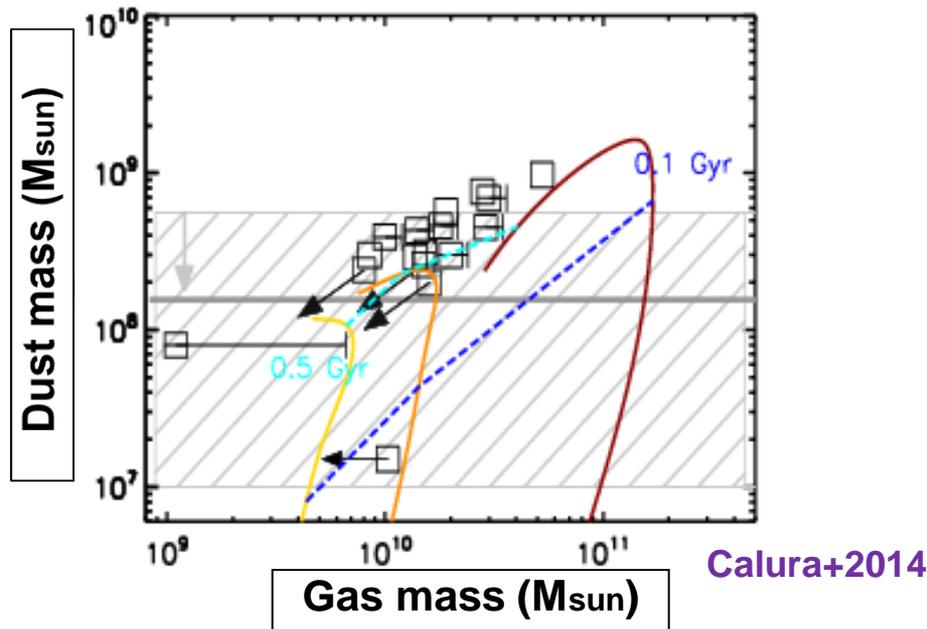
○ ダストは星が死ぬ時に形成される

- 低質量星の進化後期に放出されるガス中
→ 主に漸近巨星分枝 (AGB) 星
- **大質量星から起こる超新星爆発**

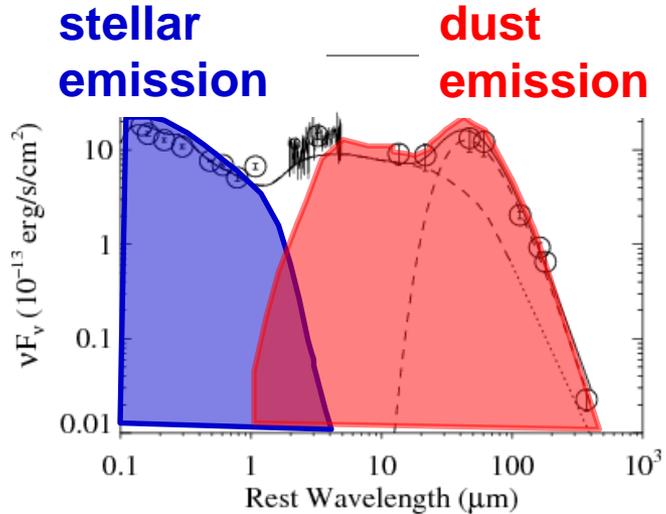
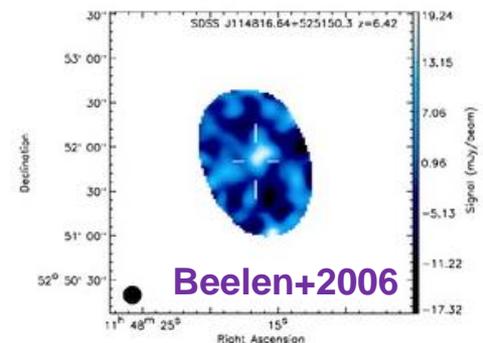


1-5. 宇宙初期にも大量のダスト

今世紀に入ってから、赤方偏移5以上（現在の宇宙年齢のおよそ1/10）の宇宙初期にも大量に星間ダストが存在することが観測的にわかっている



SDSS J1148+5251 at z=6.4



宇宙初期のダストの起源

- 超新星爆発（大質量星の寿命は短い）
- △ AGB星（低質量星の寿命は長い）
- ◎ 分子雲中でのダスト成長

ここまでのまとめと研究の目的

○ 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性質

→ シリケートとグラファイト(炭素質)、べき乗サイズ分布(0.005-0.25 μm)

○ ダストは進化末期の星(超新星とAGB星)で形成される

○ 初期宇宙にも星間ダストは大量に存在

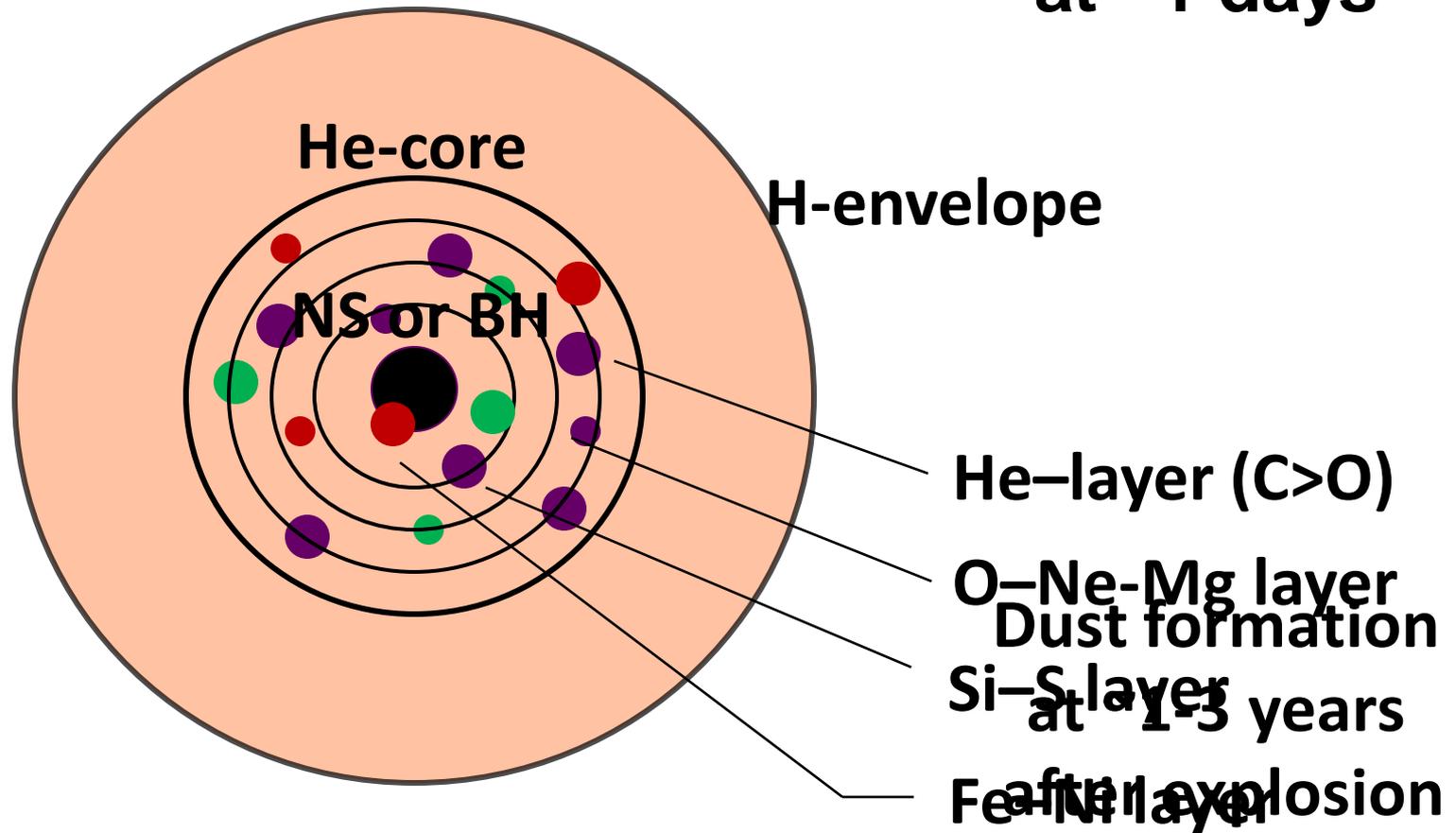
→ 宇宙初期の主なダストの供給源は超新星であるだろう

研究の目的

超新星爆発時に放出されるダストの組成・サイズ分布・量を明らかにする

2. 超新星爆発時におけるダスト形成

at ~1 days



2-1. ダスト形成理論

○ ダスト形成計算：(定常)均質核形成成長理論

(1) 安定核の生成
(nucleation)

(2) ガス降着による成長
(grain growth)

シリケートなどの場合

化学反応式の中で最も衝突頻度の小さい(分子)ガス種 (key species) が、ダストの形成過程を律速する、と仮定

Dust species	Chemical reactions
$\text{Fe}_{(s)}$	$\text{Fe}_{(g)} \rightarrow \text{Fe}_{(s)}$
$\text{FeS}_{(s)}$	$\text{Fe}_{(g)} + \text{S}_{(g)} \rightarrow \text{FeS}_{(s)}$
$\text{Si}_{(s)}$	$\text{Si}_{(g)} \rightarrow \text{Si}_{(s)}$
$\text{Ti}_{(s)}$	$\text{Ti}_{(g)} \rightarrow \text{Ti}_{(s)}$
$\text{V}_{(s)}$	$\text{V}_{(g)} \rightarrow \text{V}_{(s)}$
$\text{Cr}_{(s)}$	$\text{Cr}_{(g)} \rightarrow \text{Cr}_{(s)}$
$\text{Co}_{(s)}$	$\text{Co}_{(g)} \rightarrow \text{Co}_{(s)}$
$\text{Ni}_{(s)}$	$\text{Ni}_{(g)} \rightarrow \text{Ni}_{(s)}$
$\text{Cu}_{(s)}$	$\text{Cu}_{(g)} \rightarrow \text{Cu}_{(s)}$
$\text{C}_{(s)}$	$\text{C}_{(g)} \rightarrow \text{C}_{(s)}$
$\text{SiC}_{(s)}$	$\text{Si}_{(g)} + \text{C}_{(g)} \rightarrow \text{SiC}_{(s)}$
$\text{TiC}_{(s)}$	$\text{Ti}_{(g)} + \text{C}_{(g)} \rightarrow \text{TiC}_{(s)}$
$\text{Al}_2\text{O}_3(s)$	$2\text{Al}_{(g)} + 3\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3(s)$
$\text{MgSiO}_3(s)$	$\text{Mg}_{(g)} + \text{SiO}_{(g)} + 2\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{MgSiO}_3(s)$
$\text{Mg}_2\text{SiO}_4(s)$	$2\text{Mg}_{(g)} + \text{SiO}_{(g)} + 3\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{Mg}_2\text{SiO}_4(s)$
$\text{SiO}_2(s)$	$\text{SiO}_{(g)} + \text{O}_{(g)} \rightarrow \text{SiO}_2(s)$
$\text{MgO}_{(s)}$	$\text{Mg}_{(g)} + \text{O}_{(g)} \rightarrow \text{MgO}_{(s)}$
$\text{Fe}_3\text{O}_4(s)$	$3\text{Fe}_{(g)} + 4\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(s)$
$\text{FeO}_{(s)}$	$\text{Fe}_{(g)} + \text{O}_{(g)} \rightarrow \text{FeO}_{(s)}$

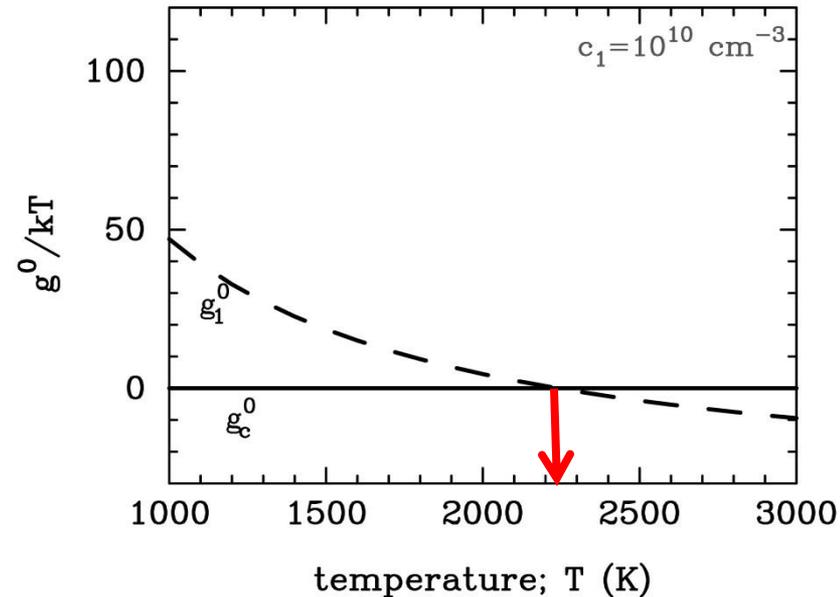
2-2-1. 相転移と過飽和比

○ 気相から固相への相転移

→ 平衡熱力学の枠組みで考える

平衡では、各相のギブスエネルギー
(化学ポテンシャル)は等しい

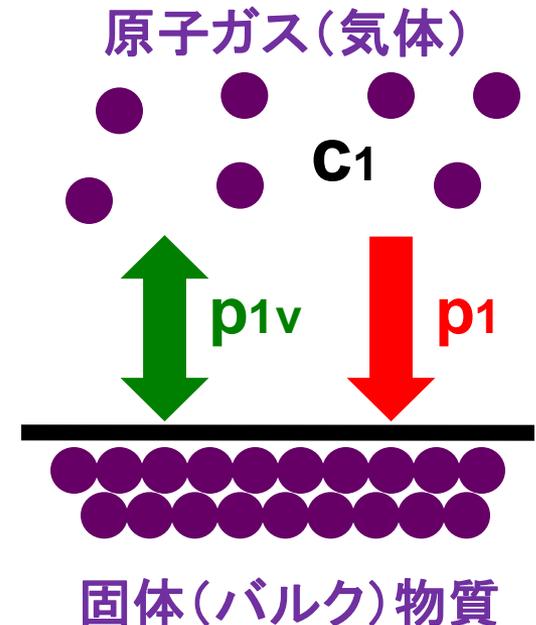
- 気体: $G^{01} = n (g^{01} + kT \ln[p_1/p_s])$
- 固体: $G^{0c} = n g^{0c}$



○ 過飽和比, S (supersaturation ratio)

$$\ln S = \ln \left(\frac{p_1}{p_{1v}} \right) = -\frac{1}{kT} (\dot{g}_c - \dot{g}_1) + \ln \left(\frac{p_1}{p_s} \right)$$

**$\ln S > 0$ ($S > 1$)であれば、
固体の方が気体よりも安定**



2-2-2. クラスターの形成

○ 気相からのクラスター形成

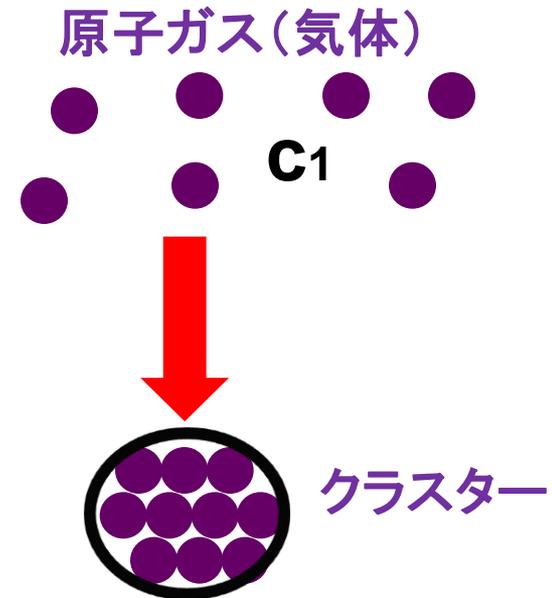
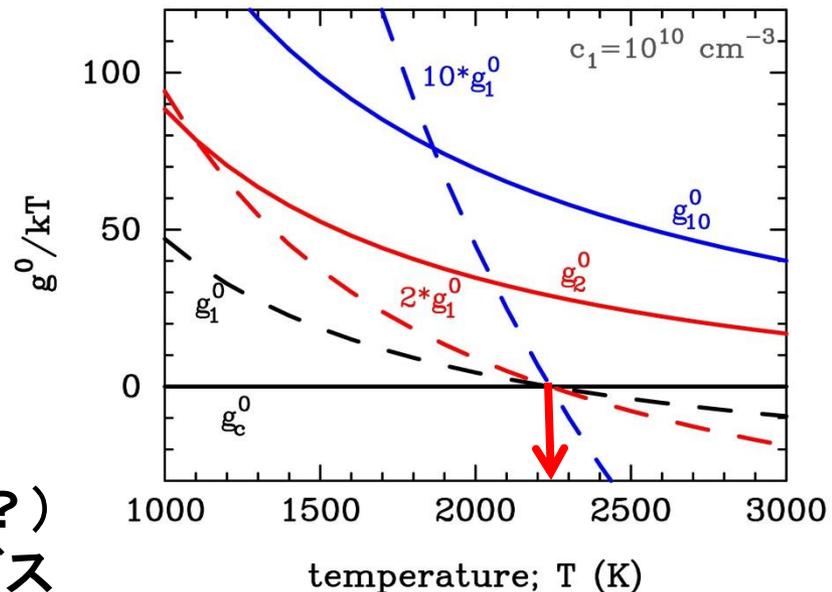
→ 新たに固体表面を作る必要がある
(バルク物質のギブスエネルギーを
直接使用するのは良くない)

- capillary approximation (毛管近似?)
- n個の原子からなるクラスターのギブスエネルギー

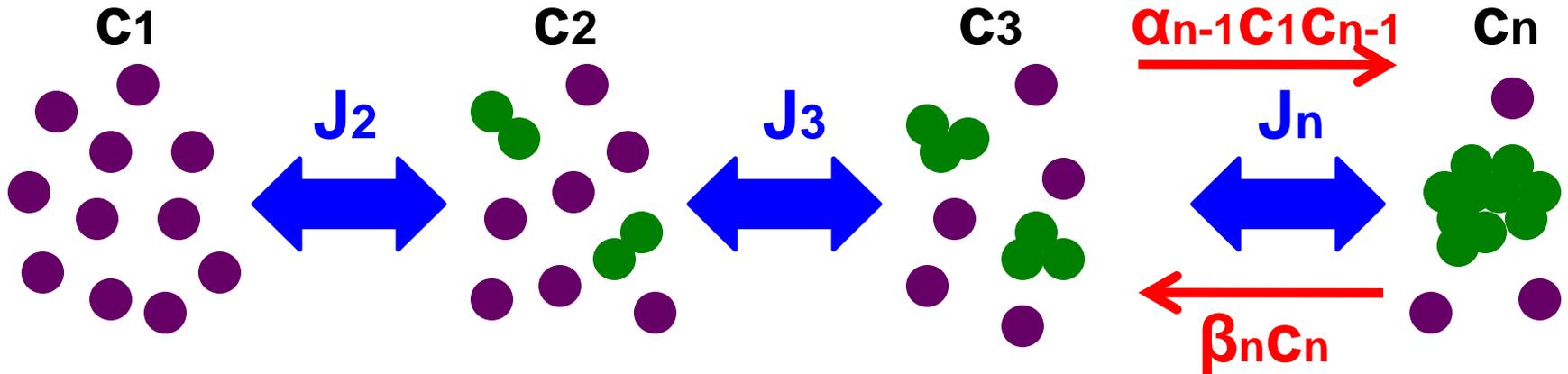
$$\dot{g}_n = 4\pi a_0^2 \sigma (n-1)^{\frac{2}{3}} + (n-1)\dot{g}_c + \dot{g}_1$$

σ : 表面エネルギー (単位 erg cm^{-2})
 a_0 : 1原子あたりの半径

熱力学的には、原子の数(n)が
多いクラスターの方が形成しやすい



2-3-1. 定常均質核形成率の導出 (1)



・ マスター方程式 (master equations)

$$\frac{dc_n}{dt} = J_n(t) - J_{n+1}(t) \quad \text{for } 2 \leq n \leq n_*,$$

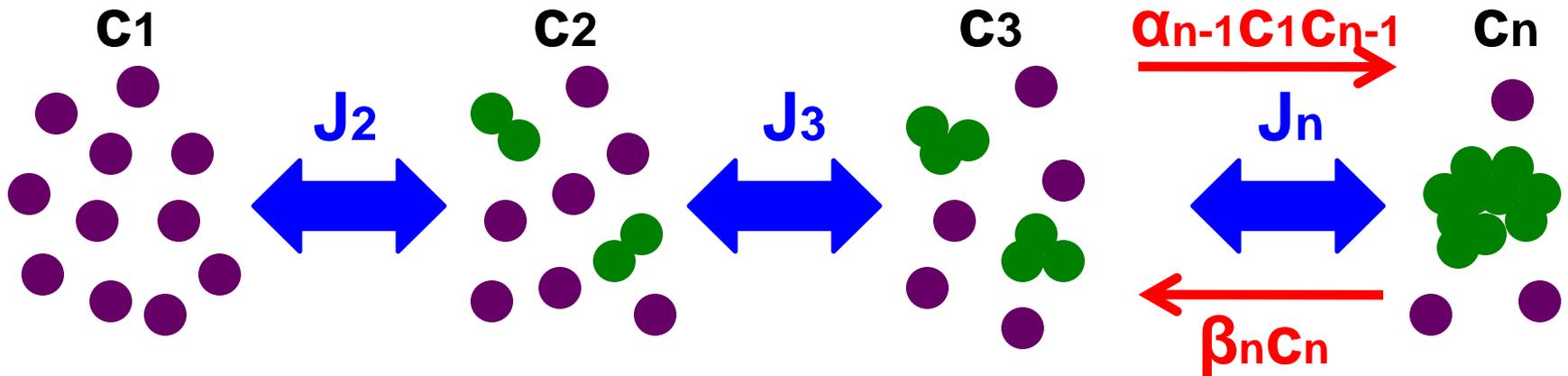
$$J_n(t) = \alpha_{n-1} c_{n-1} c_1 - \beta_n c_n \quad \text{for } 2 \leq n \leq n_*,$$

付着確率

$$\alpha_n = \frac{s_n}{1 + \delta_{1n}} 4\pi a_0^2 n^{\frac{2}{3}} \left(\frac{kT}{2\pi m_n} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\beta_n = \alpha_{n-1} \frac{\overset{\circ}{c}_{n-1}}{\overset{\circ}{c}_n} \overset{\circ}{c}_1,$$

2-3-2. 定常均質核形成率の導出 (2)



・ マスター方程式 (master equations)

$$\frac{dc_n}{dt} = J_n(t) - J_{n+1}(t) \quad \text{for } 2 \leq n \leq n_*,$$

$$J_n(t) = \alpha_{n-1}c_1 [c_{n-1} - c_n \exp(\gamma_n)]$$

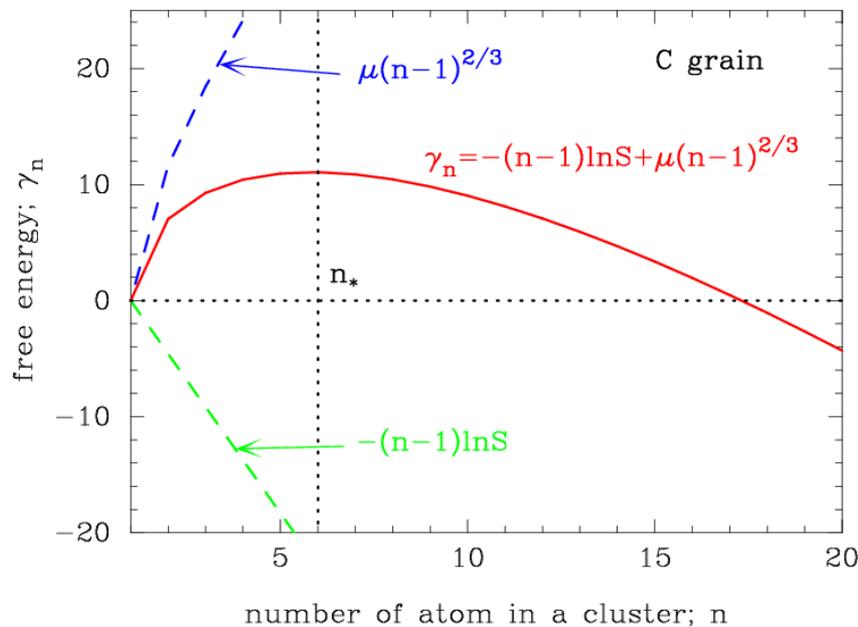
$$\gamma_n = \mu \left[(n-1)^{\frac{2}{3}} - (n-2)^{\frac{2}{3}} \right] - \ln S,$$

$$\mu = 4\pi a \sigma^2 / kT$$

2-3-3. 定常均質核形成率の導出(3)

○ 定常均質核形成率, J_s ($J_s = J_2 = J_3 = \dots = J_n$)

$$J_s = \left\{ \frac{1}{\alpha_1 c_1} + \sum \frac{1}{\alpha_n c_1^2} \exp[g(n)] \right\}^{-1}$$



$$g(n) = -(n-1) \ln S + \mu(n-1)^{2/3}$$

$$(n_c - 1)^{1/3} = \frac{2}{3} \frac{\mu}{\ln S}$$

単位時間、単位体積あたりに
安定な核が何個形成されるか

$$J_s = s \Omega_0 \left(\frac{2\sigma}{\pi m_1} \right)^{1/2} c_1^2 \exp \left[-\frac{4}{27} \frac{\mu^3}{(\ln S)^2} \right]$$

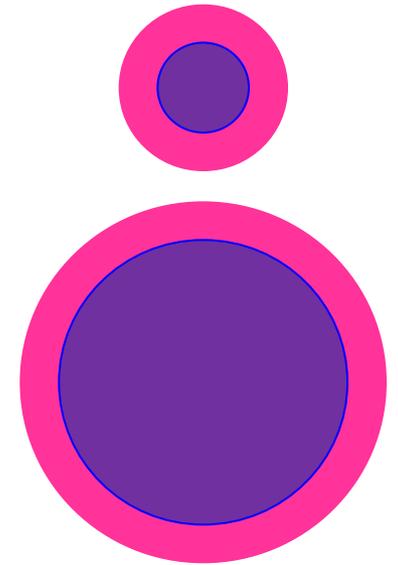
2-4. ダストの成長

・ ダストの半径 (a) の増加率の式

$$\frac{da}{dt} = s\Omega_0 \left(\frac{kT}{2\pi m_1} \right)^{\frac{1}{2}} c_1 \left(1 - \frac{1}{S} \right),$$



$$\frac{dV}{dt} = s\Omega_0 4\pi a^2 \left(\frac{kT}{2\pi m_1} \right)^{\frac{1}{2}} c_1 \left(1 - \frac{1}{S} \right),$$



原子の付着による半径の増加率は、ダスト半径に依存しない

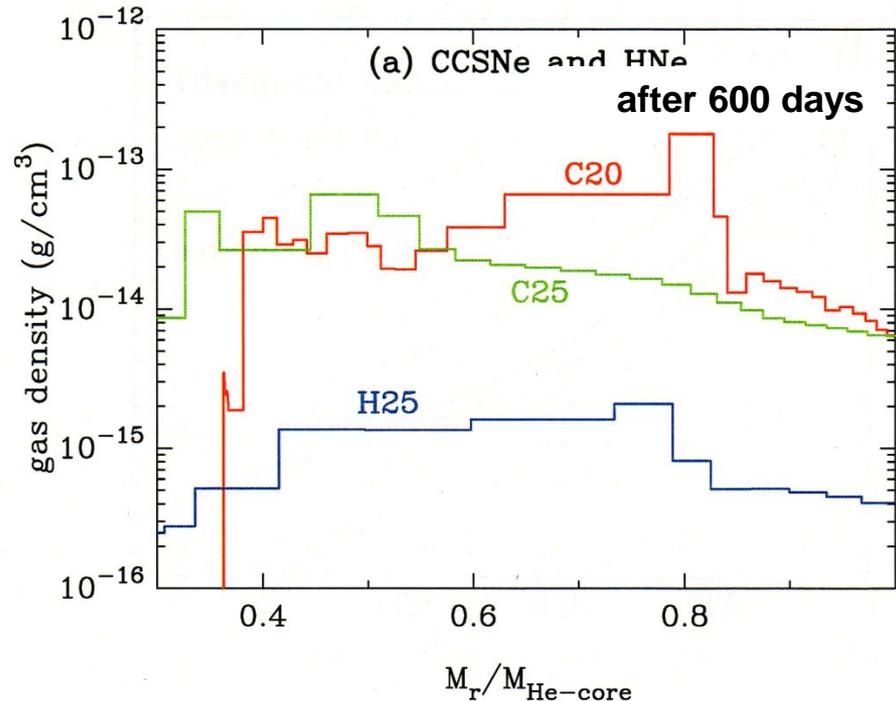
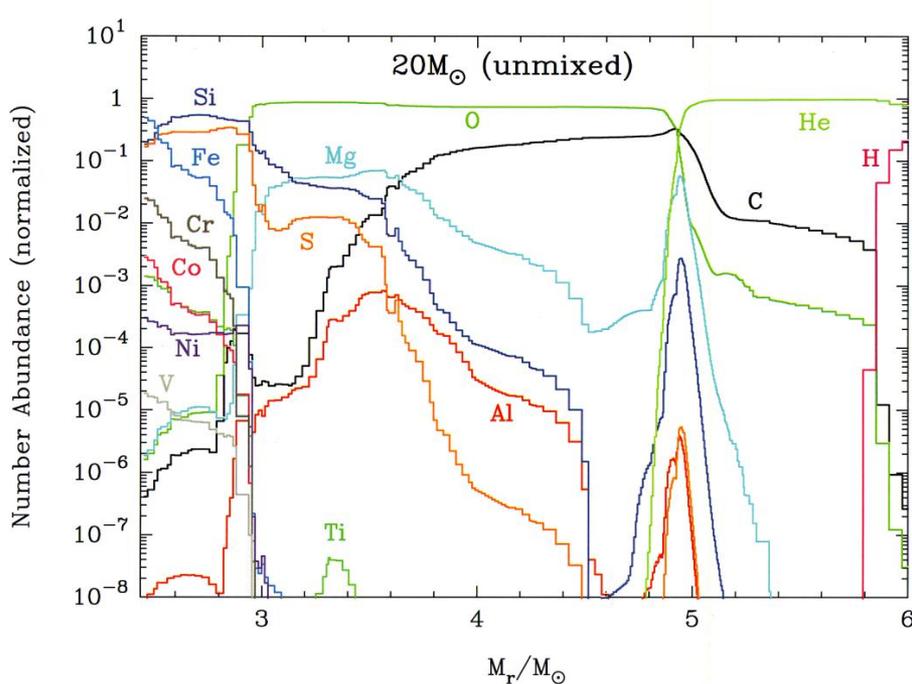
・ 質量(原子数)保存の式

$$c_{10} - c_1 = \int_{t_0}^t J_{n_s}(t') \frac{a^3(t, t')}{a_0^3} dt',$$

2-5. 超新星爆発のモデル

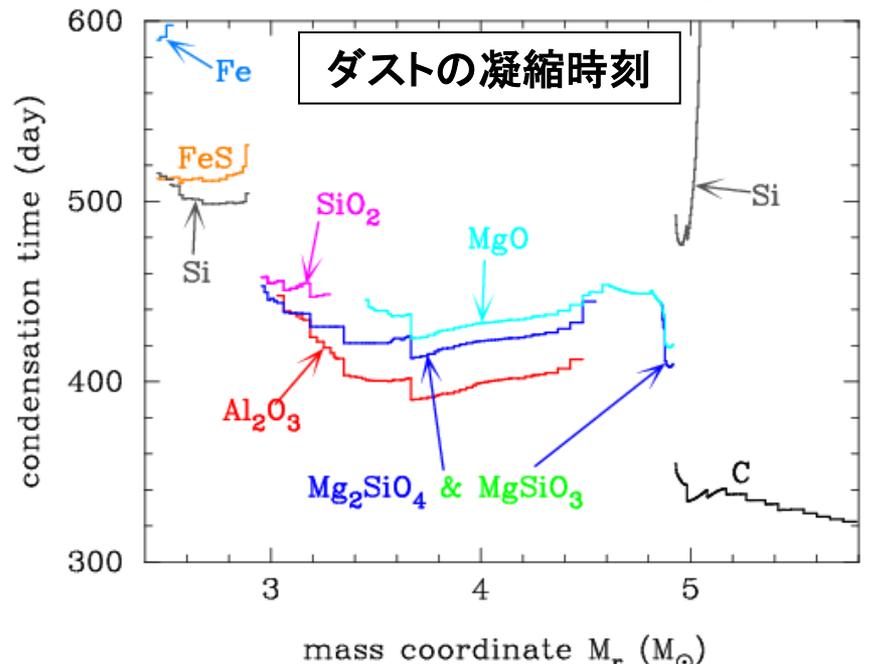
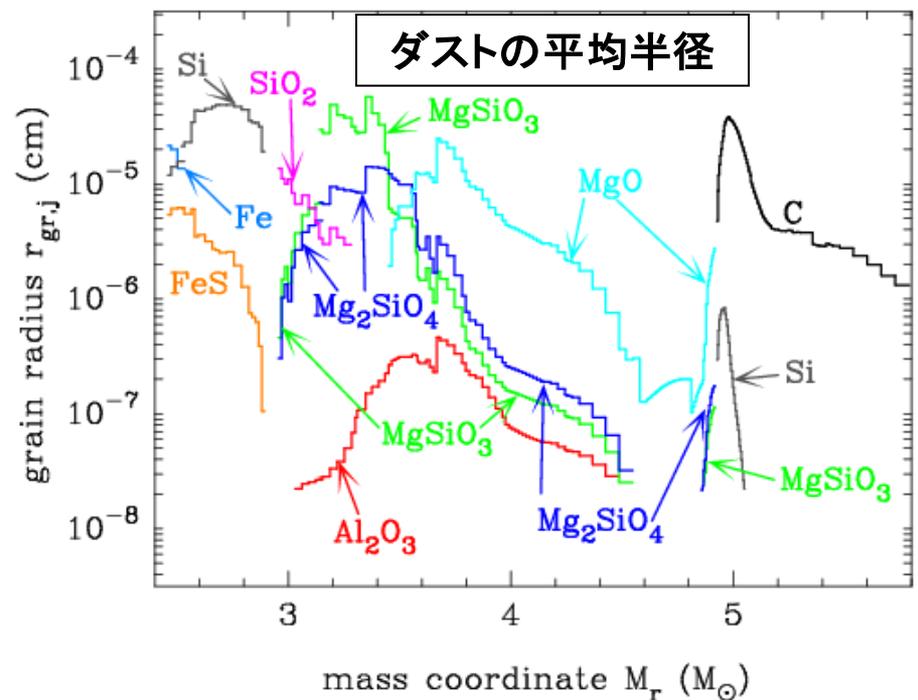
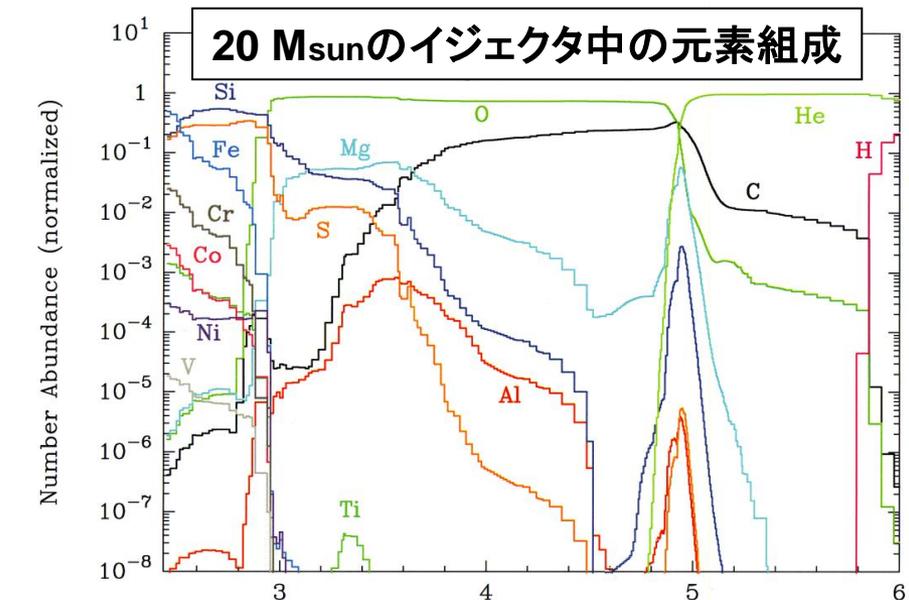
○ 種族III超新星 (Population III SNe) (Umeda & Nomoto 2002)

- 星の初期質量 (M_{ZAMS}) : 13, 20, 25, 30 M_{\odot} ($E_{51}=1$)



- ダストは重元素が豊富に存在するHe core内で起こる
- He core内で元素の混合はない(層構造を維持している)と仮定
- 600日後でのガス密度: $\rho \sim 10^{-14}-10^{-13} \text{ g/cm}^3 \rightarrow n \sim 10^8-10^{10} / \text{cm}^3$

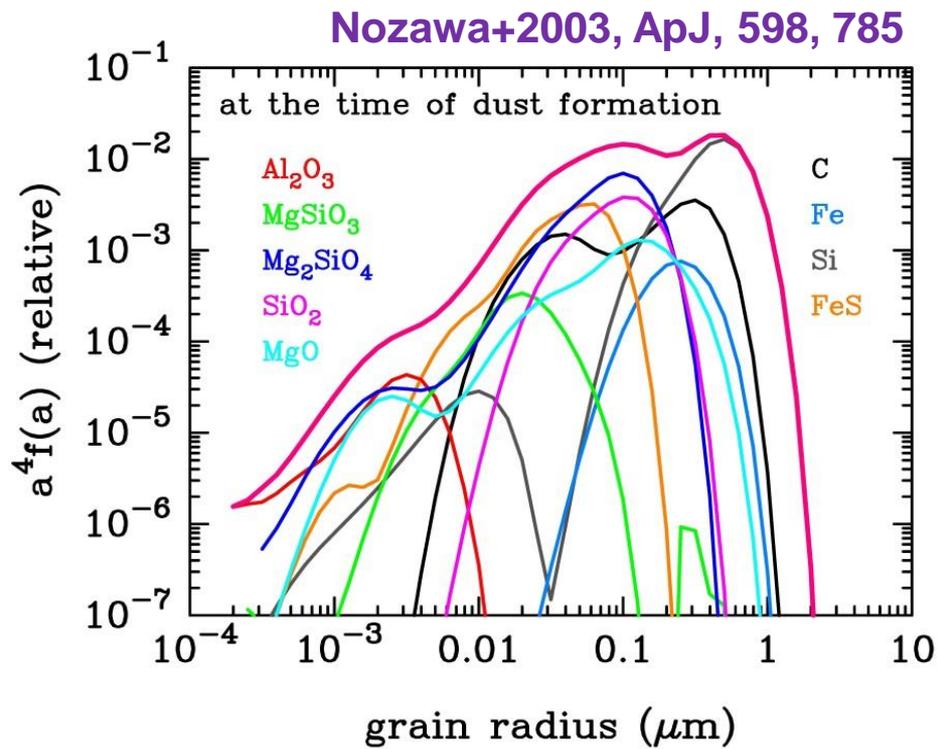
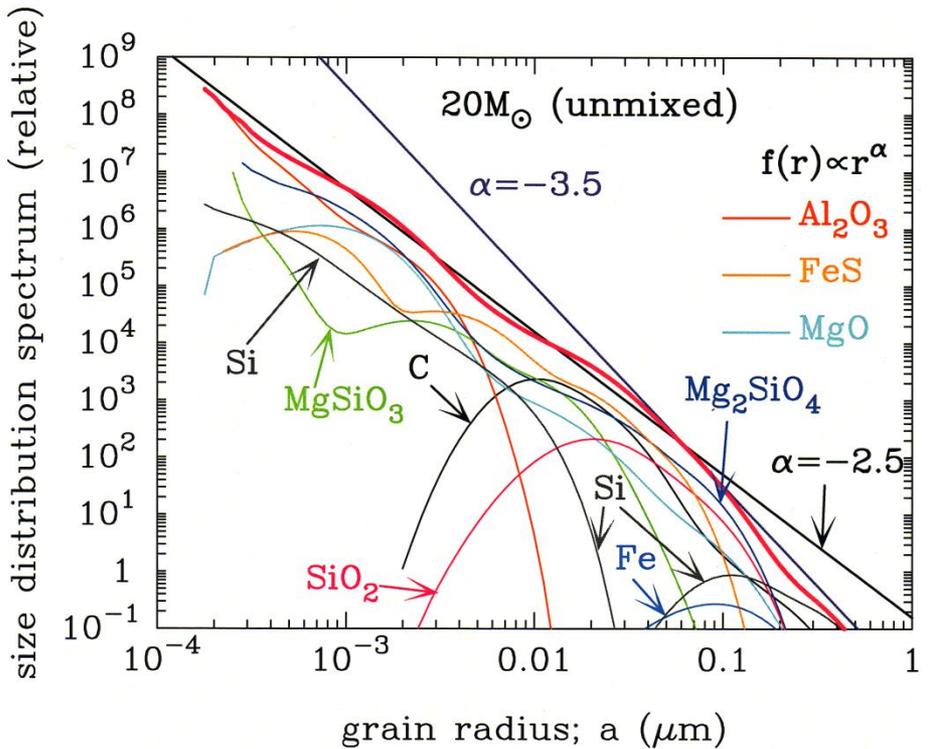
2-6. 形成されるダストの凝縮時刻と平均半径



○ダスト形成計算の結果

- イジェクタ中の元素組成に応じて様々なダスト種が形成される
- 凝縮時刻: 爆発後**300-600日**
- 平均半径: **数Åから1 μm**まで

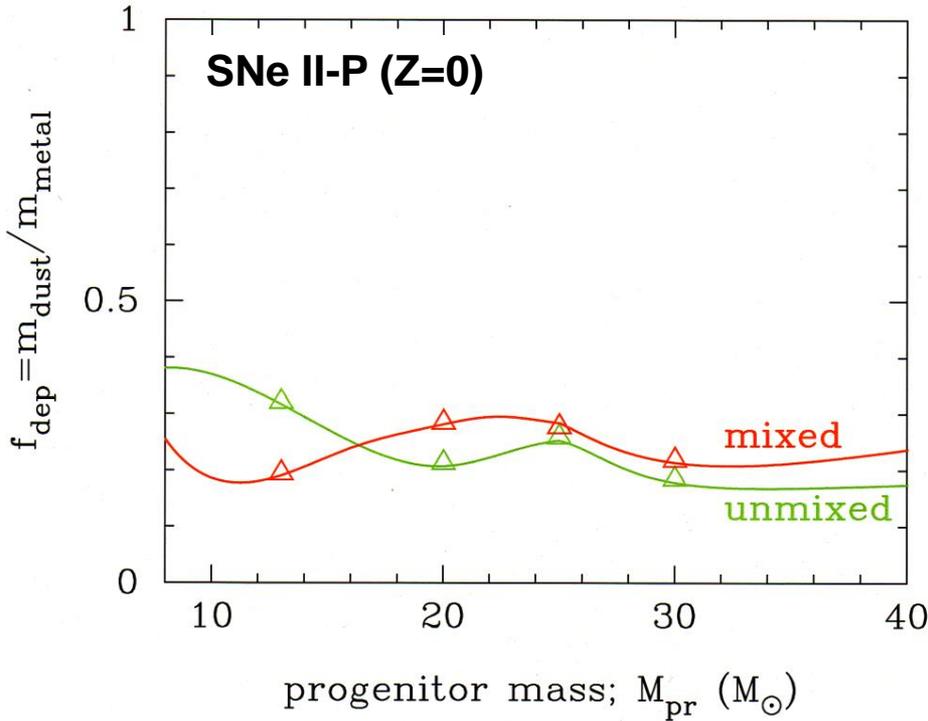
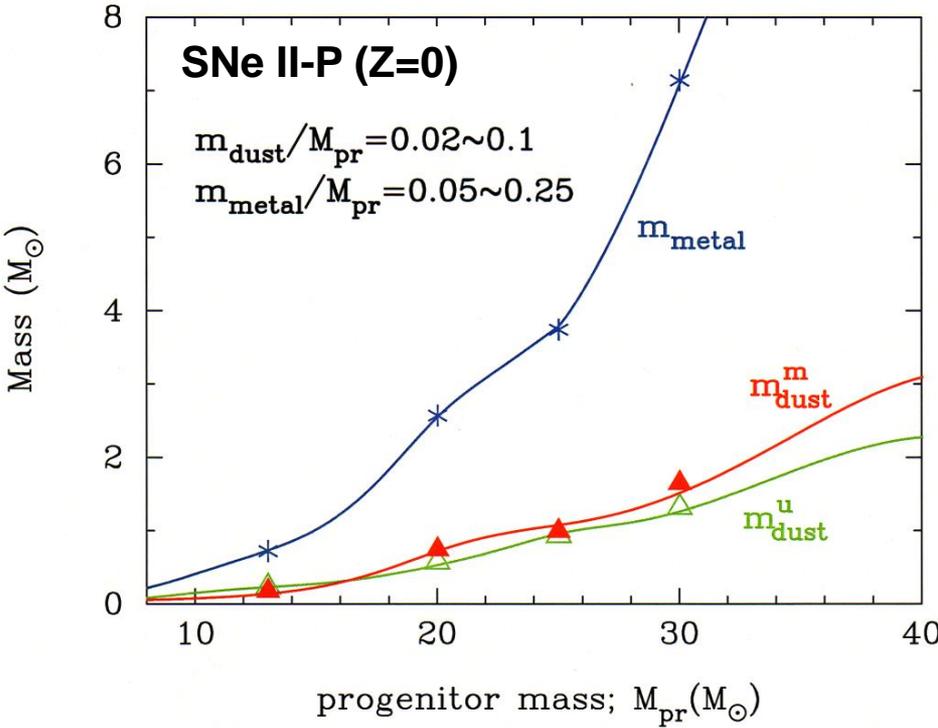
2-7. 形成されるダストのサイズ分布



- C, SiO₂, Feダストは対数正規分布、それ以外のダストはべき乗分布
- 全ダスト種で足し合わせたサイズ分布は、折れ曲がりべき乗則に近い
- 形成されたダスト質量は、0.1-1 μmの半径のものが支配的
- シリケート~0.2 Msun, 炭素質ダスト~0.05 Msun (M_{sil} / M_C ~ 4)

2-8. 形成されるダストの質量

Nozawa+03, ApJ, 598, 785



ダスト形成量は、星の初期質量が高いほど多い
 $M_{\text{dust}} = 0.1-1.5 M_{\text{sun}}$
→ Mg, Si, Feのほぼすべてがダストに取り込まれる

放出された重元素のうち、20-30%がダストとして取り込まれる ($f_{\text{dep}} = 0.2-0.3$)
cf. 銀河系の星間空間では、 $f_{\text{dep}} = 0.4-0.5$

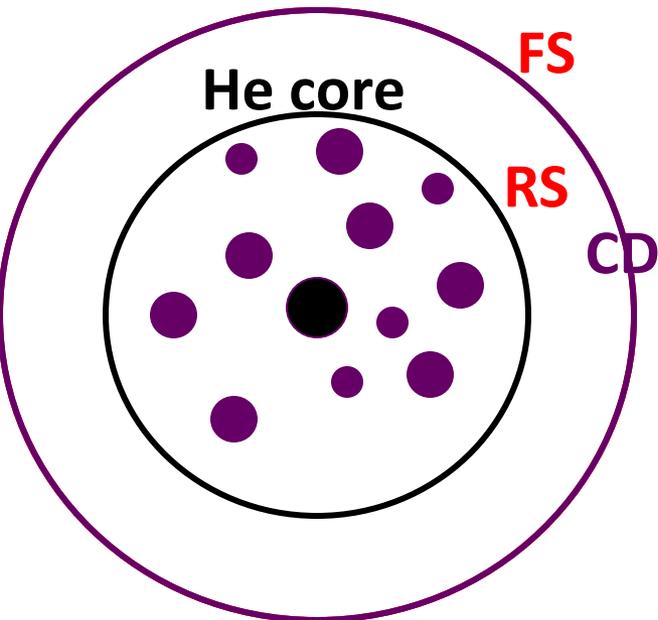
超新星爆発時におけるダスト形成のまとめ

超新星爆発は大量のダストの生成工場

- ダスト凝縮時刻: 爆発後1~2年
- ガスの元素組成に応じて様々なダスト種
- ダスト平均半径: 数 Å から1 μmまで
- ダストのサイズ分布
 - C, SiO₂, Fe: 対数正規分布
 - Mg-シリケートなど: べき乗分布
 - 全ダストの種合計: 折れ曲がりべき乗分布
- ダストの形成量: 0.1-1.5 M_{sun}
 - 0.1 μmより大きいM₂SiO₄, SiO₂、Si、Cが支配的

3. 超新星残骸中でのダストの生存

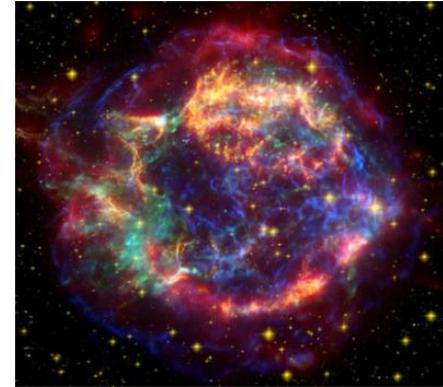
$$T = (1-2) \times 10^4 \text{ K}$$
$$n_{\text{H},0} = 0.1-1 \text{ cm}^{-3}$$



3-1. 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)

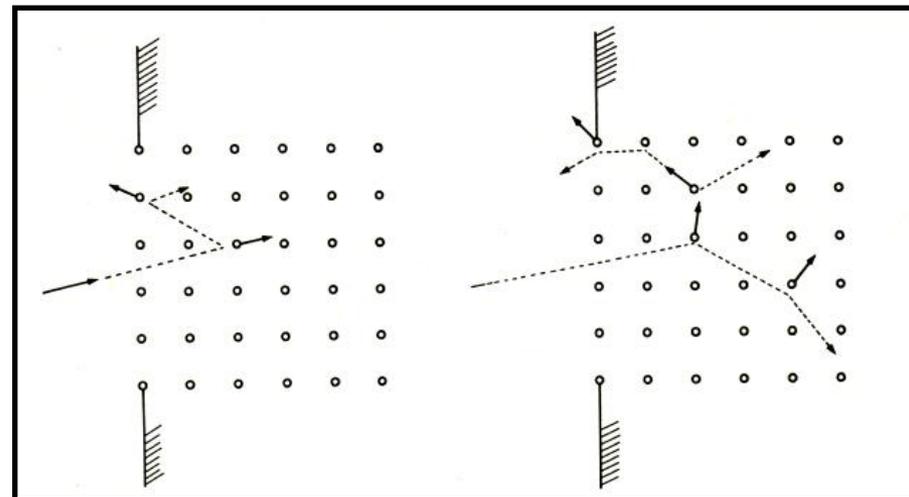


○ スパッタリング (sputtering)

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: イオン一個の衝突あたりに放出される原子の個数



3-2-1. スパッタリングによるダストの破壊(1)

- dust destruction by sputtering (e.g., Dwek, Foster & Vancura 1996)

$$\frac{da}{dt} = -\frac{m_{\text{sp}}}{4\pi a^2 \rho_d} \sum_i \mathcal{R}(Y_i(E))$$

$Y_i(E) = 2Y_i^0(E)$; the angle-averaged sputtering yield

m_{sp} ; average mass of the sputtered atoms

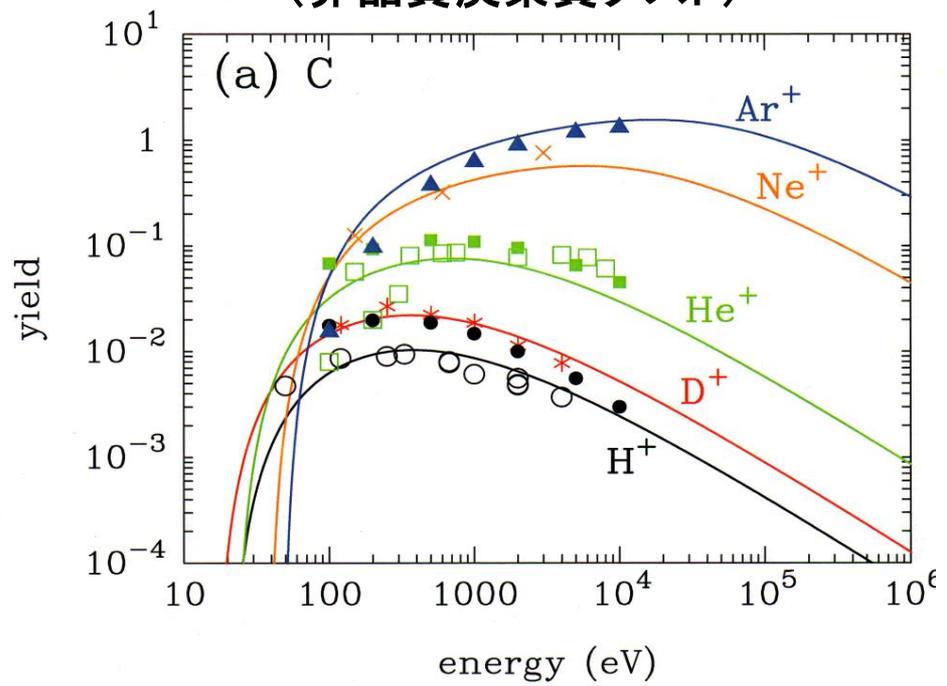
$$\frac{dV_d}{dt} = 4\pi a^2 \frac{da}{dt} = -\pi a^2 \frac{4\pi a_0^3}{3} \sum n_i \langle v_i Y_i \rangle$$

$$\frac{da}{dt} = -\frac{1}{4} \Omega n_H \sum A_i \langle v_i Y_i \rangle$$

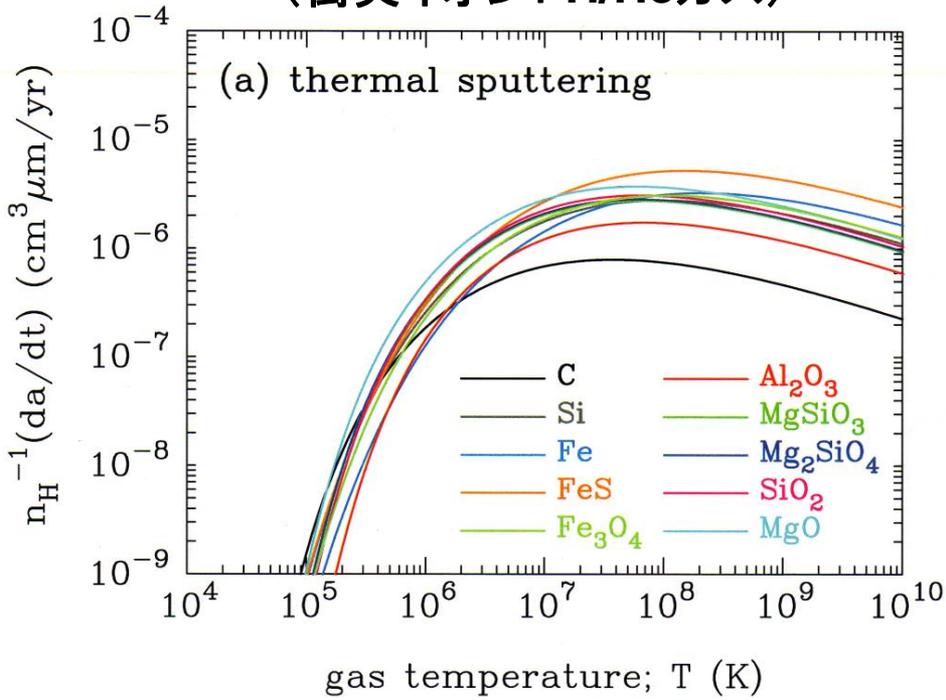
スパッタリングによる半径の減少率は、ダスト半径に陽に依存しない

3-2-2. スパッタリングによるダストの破壊(2)

スパッタリングイールド
(非晶質炭素質ダスト)



ダスト半径の減少率
(衝突イオン: H/Heガス)



Nozawa+2006, ApJ, 648, 435

- ・ スパッタリングによる半径の減少率は、 10^5 K から急激に増加し、 10^7 - 10^8 K付近にピークをもつ
- ・ $T > 10^6$ Kに対する半径の減少率は、 $da/dt \sim 10^{-6} n_H \mu m yr^{-1}$

3-3. ダストの運動 (ガスとの摩擦による減速)

- deceleration of dust due to drag force (Baines et al. 1965)

$$\frac{dw_d}{dt} = \frac{F_{\text{drag}}}{m_d} = -\frac{3n_H kT}{2a\rho_d} \sum_i A_i G_i(s_i) \quad (w_d : \text{relative velocity})$$

$$\begin{aligned}
 F_{\text{drag}} &= m_d \frac{dw_d}{dt} = -\pi a^2 \sum n_i \langle v_i m_i v_i \cos \theta \rangle \\
 \frac{dw_d}{dt} &= -\frac{\pi a^2}{\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_d} n_H \sum A_i \langle v_i m_i v_i \cos \theta \rangle \\
 &= -\frac{3n_H}{4a\rho_d} kT \sum A_i G_i
 \end{aligned}$$

by n_H

ガスとの摩擦による減速率は、ダスト半径と物質密度に反比例する(質量が大きいほど止まりにくい)

where $s_i = m_i w_d / 2kT$

3-4. 超新星残骸のガス密度・温度進化計算

- Basic equations (spherical symmetry)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v) = 0 \quad (\text{連続の式})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v^2) = -\frac{\partial P}{\partial r} \quad (\text{運動方程式})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \frac{P}{\gamma - 1} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \left[\frac{\rho v^2}{2} + \frac{\gamma P}{\gamma - 1} \right] v \right) & (\text{エネルギー保存の式}) \\ & = -(n_e n_H \Lambda_{\text{gas}}(T) + \Lambda_{\text{ic}}(T) + \Lambda_{\text{d}}(n_H, T)) \end{aligned}$$

$\Lambda_{\text{gas}}(T)$: cooling function of gas by the atomic process

(Sutherland & Dopita 1993; Smith et al. 2001)

$\Lambda_{\text{ic}}(T)$: inverse Compton cooling (Ikeuchi & Ostriker 1986)

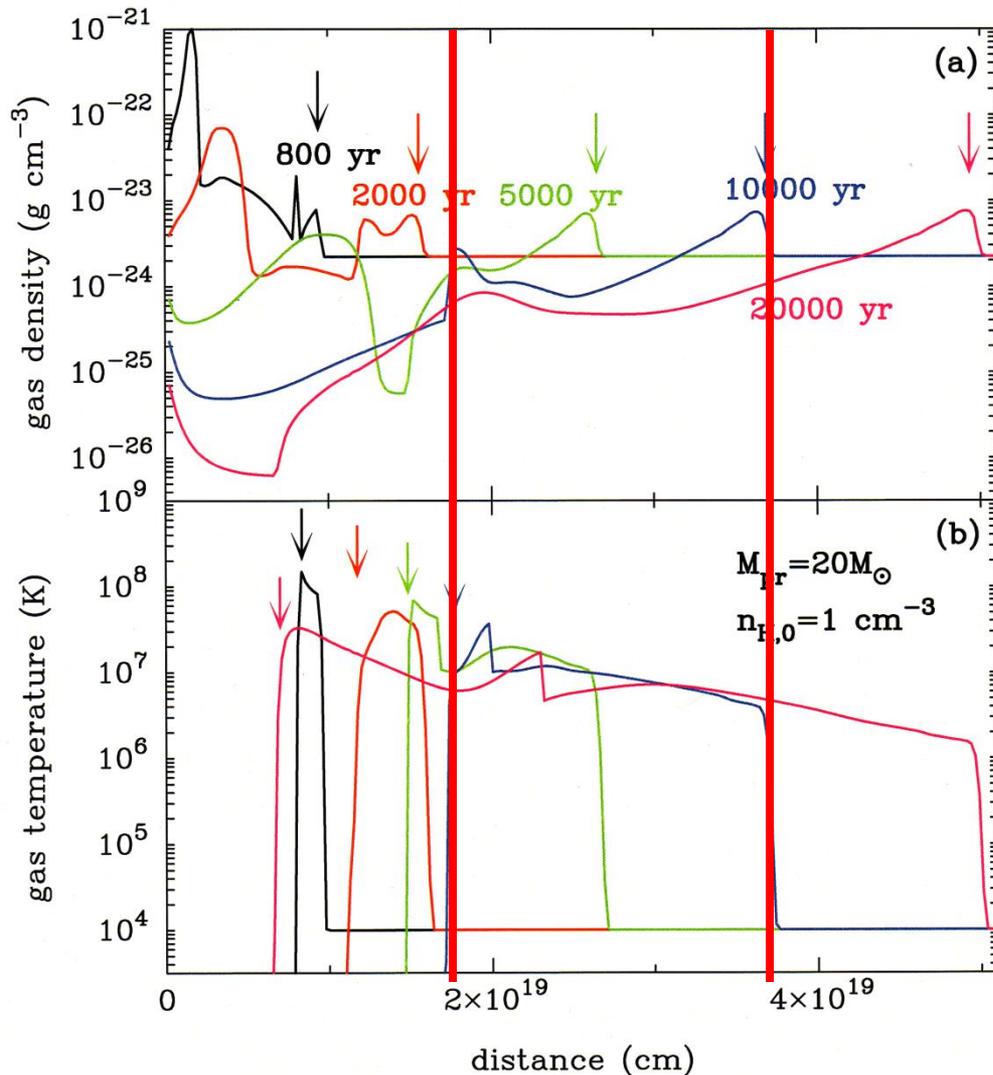
$$\Lambda_{\text{ic}}(T) = 5.41 \times 10^{-32} (1+z)^4 n_e (T/10^4 \text{ K}) \quad (\text{we adopt } z = 20)$$

$\Lambda_{\text{d}}(n_H, T)$: cooling of gas through thermal emission of dust

- numerical code : flux splitting method (van Albada et al. 1982)

3-5. 超新星残骸のガス温度・密度進化

Nozawa+07, ApJ, 666, 955



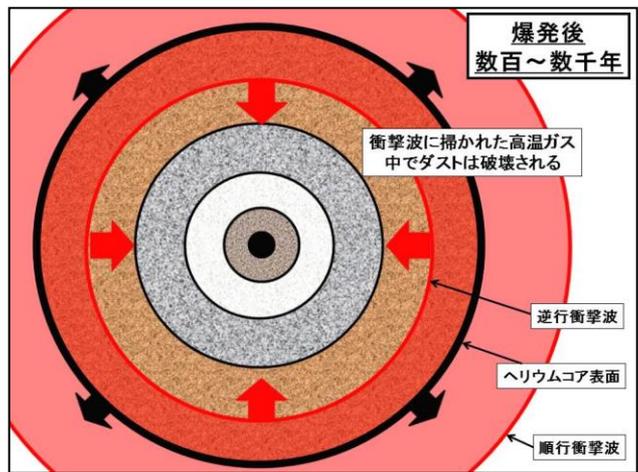
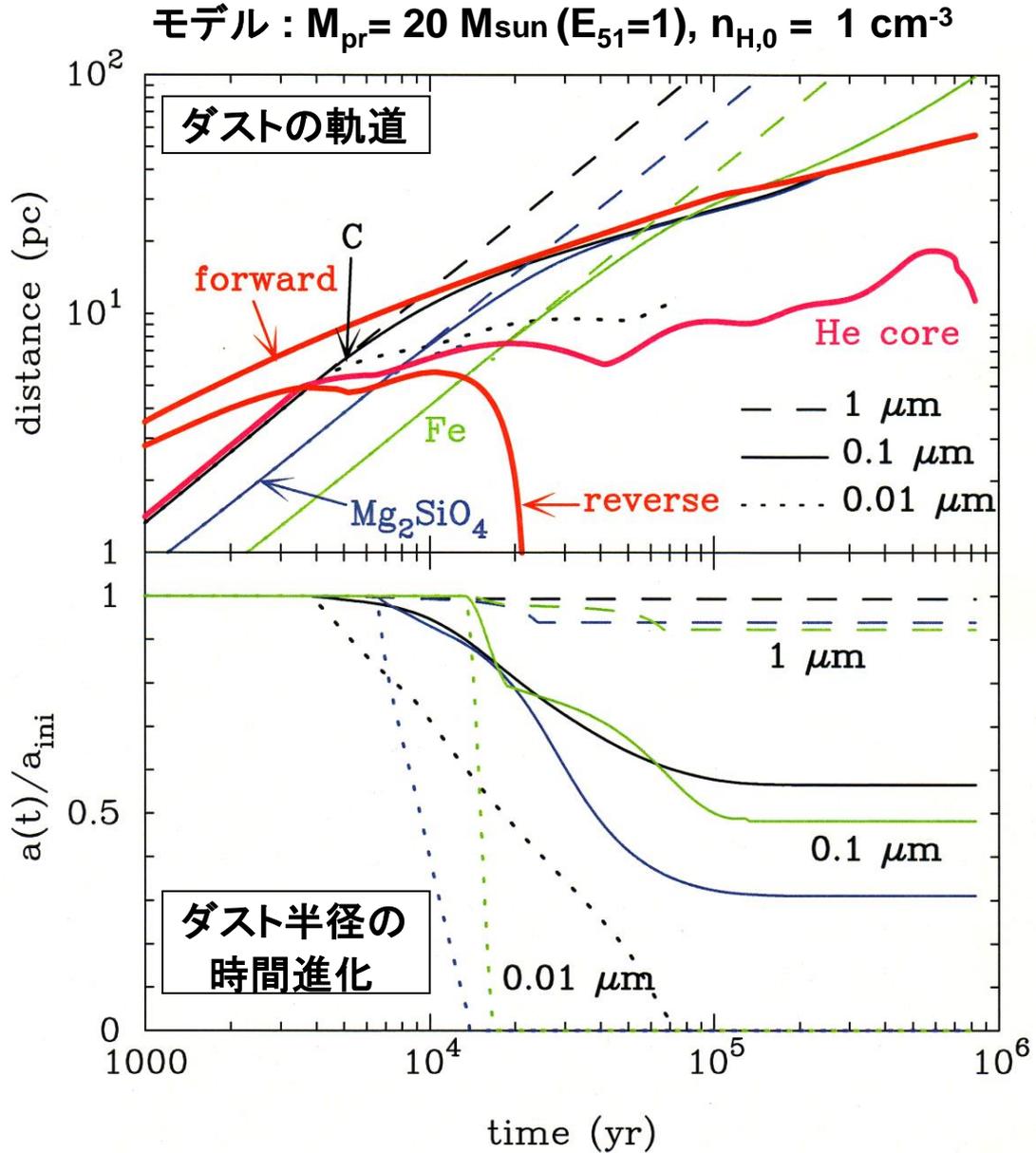
Model : $M_{\text{pr}} = 20 M_{\text{sun}} (E_{51} = 1)$
 $n_{\text{H},0} = 1 \text{ cm}^{-3}$

上図下矢印 : forward shock
下図下矢印 : reverse shock

衝撃波によって掃かれたガスの
温度 $\rightarrow 10^6 - 10^8 \text{ K}$

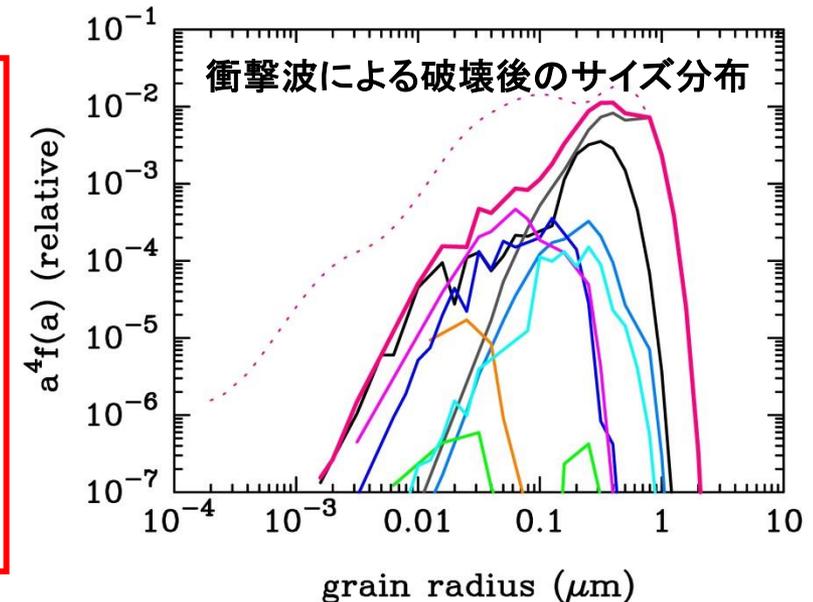
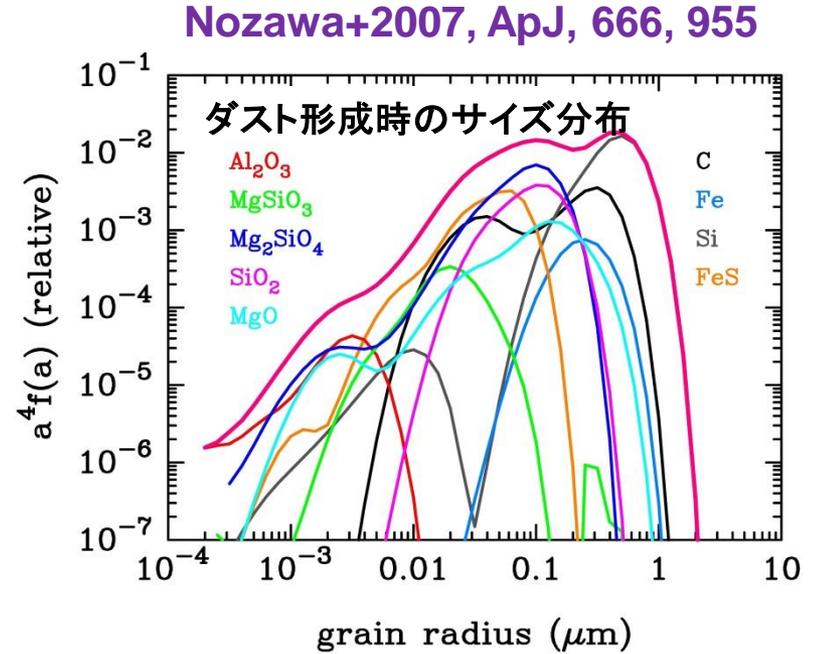
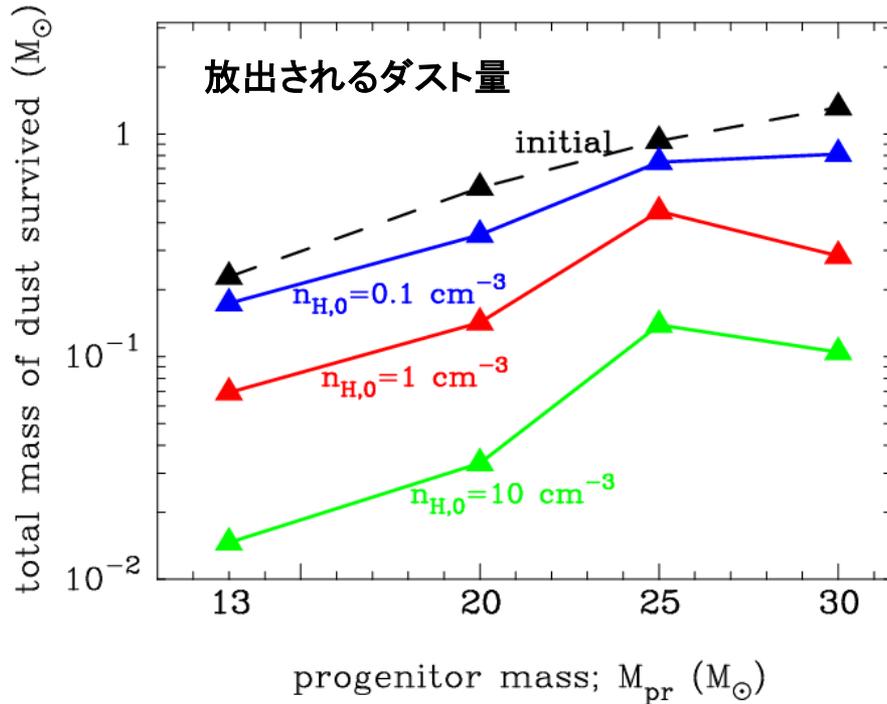
↓
この高温ガスにダストが突入
すると、スパッタリングにより
破壊されていく

3-6. 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
- $a_{ini} = 0.01 \mu\text{m}$ (dotted lines) → 完全に破壊される
- $a_{ini} = 0.1 \mu\text{m}$ (solid lines) → shell中に捕獲される
- $a_{ini} = 1 \mu\text{m}$ (dashed lines) → 星間空間に放出される

3-7. 超新星爆発時に放出されるダストの性質



- 破壊後のダストのサイズ分布は大きい半径 ($> 0.1 \mu\text{m}$) のものに占められる
- 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
- $n_{H,0} = 0.1 - 1 \text{ cm}^{-3}$ の星間ガス密度では、 $0.07 - 0.8 M_{\text{sun}}$ のダストを星間空間へ

超新星残骸中でのダストの生存のまとめ

比較的大きいダストは生き延びることができる

- ダストの生存は、その初期半径に強く依存
 - $a_{\text{ini}} < \sim 0.05 \mu\text{m} \rightarrow$ 完全に破壊
 - $a_{\text{ini}} = \sim 0.05\text{-}0.2 \mu\text{m} \rightarrow$ shell中で捕獲
 - $a_{\text{ini}} > 0.2 \mu\text{m} \rightarrow$ 星間空間に放出
- 超新星から星間空間中へと放出されるダストは、**大きい半径 ($> 0.1 \mu\text{m}$)**のものに限られる
- ダストの放出量: **$0.07\text{-}0.8 M_{\text{sun}}$** for $n_{\text{H}}=0.1\text{-}1 \text{ cm}^{-3}$
 - シリケートは、炭素質ダストよりも破壊されやすい
 - \rightarrow ダスト放出時には、 $M_{\text{C}} > M_{\text{sil}}$ となる