

微惑星とガス円盤の相互作用に伴う非平衡ダスト形成

三浦 均¹ (東北大・理)

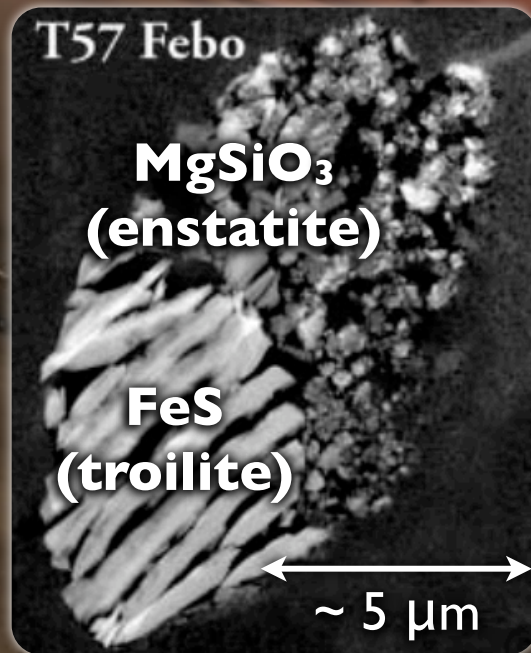
田中 今日子², 山本 哲生², 中本 泰史³, 山田 淳也¹, 塚本 勝男¹, 野澤 純¹

¹東北大・理, ²北大・低温研, ³東工大・地惑



COSMIC CRYSTALS

Fine dust from comet



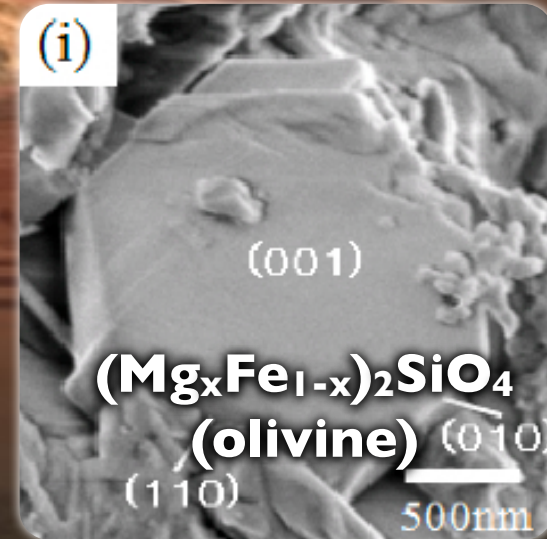
Stardust mission
(e.g., Brownlee et al. 2006)

IDPs



(Bradley et al. 1983)

Primitive meteorite

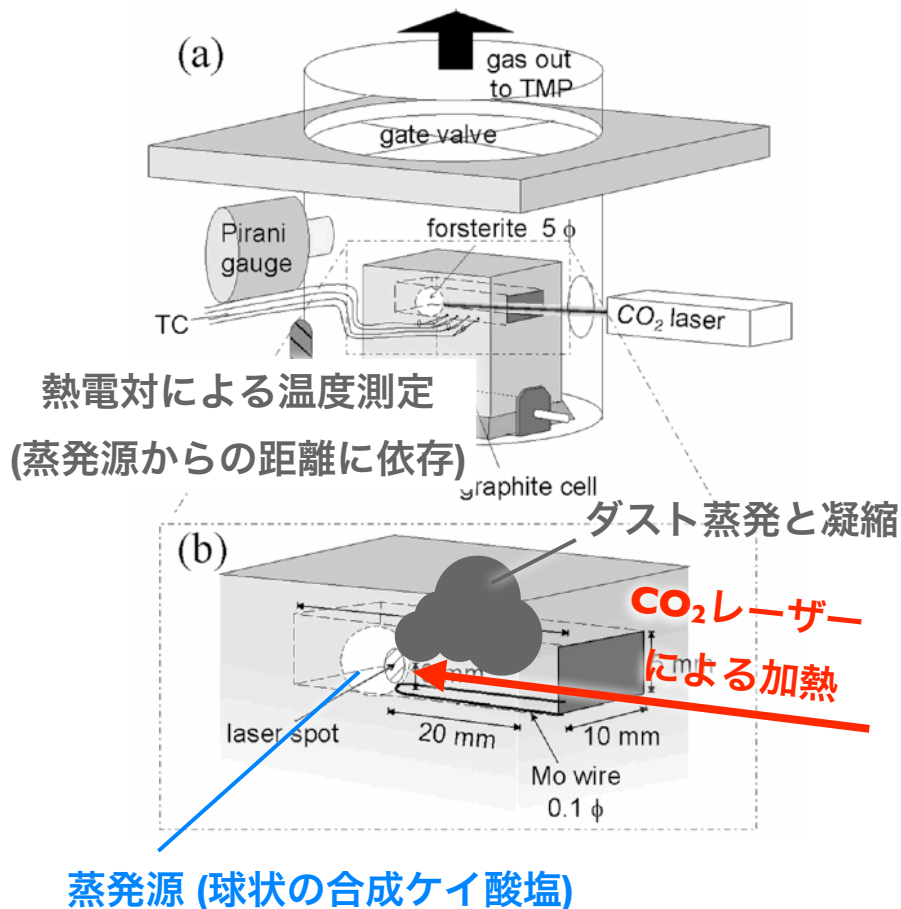


(Nozawa et al., submitted)

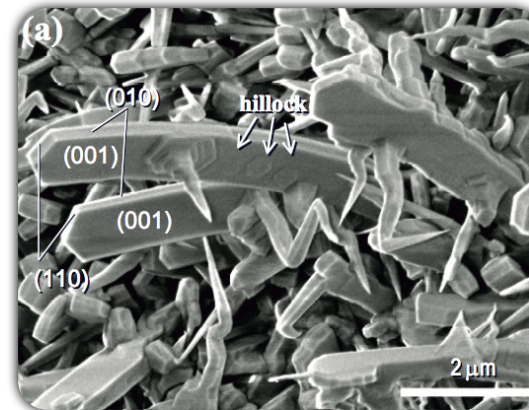
- 形成過程は？
- 惑星形成との関係は？

ケイ酸塩蒸気からの直接凝縮

ダストの蒸発・凝縮実験
(Kobatake et al. 2008; Yamada 2009)

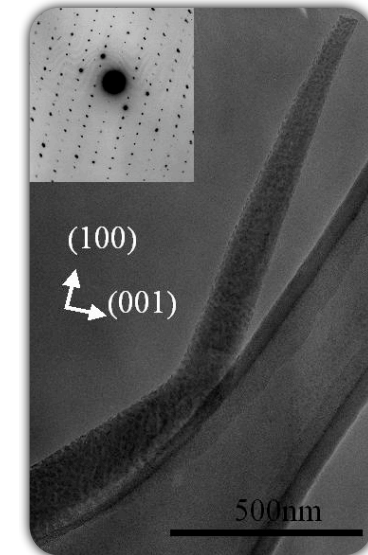


板状オリビン
(Mg₂SiO₄) 結晶



~ 973 - 1273 K で形成
(Kobatake et al. 2008)

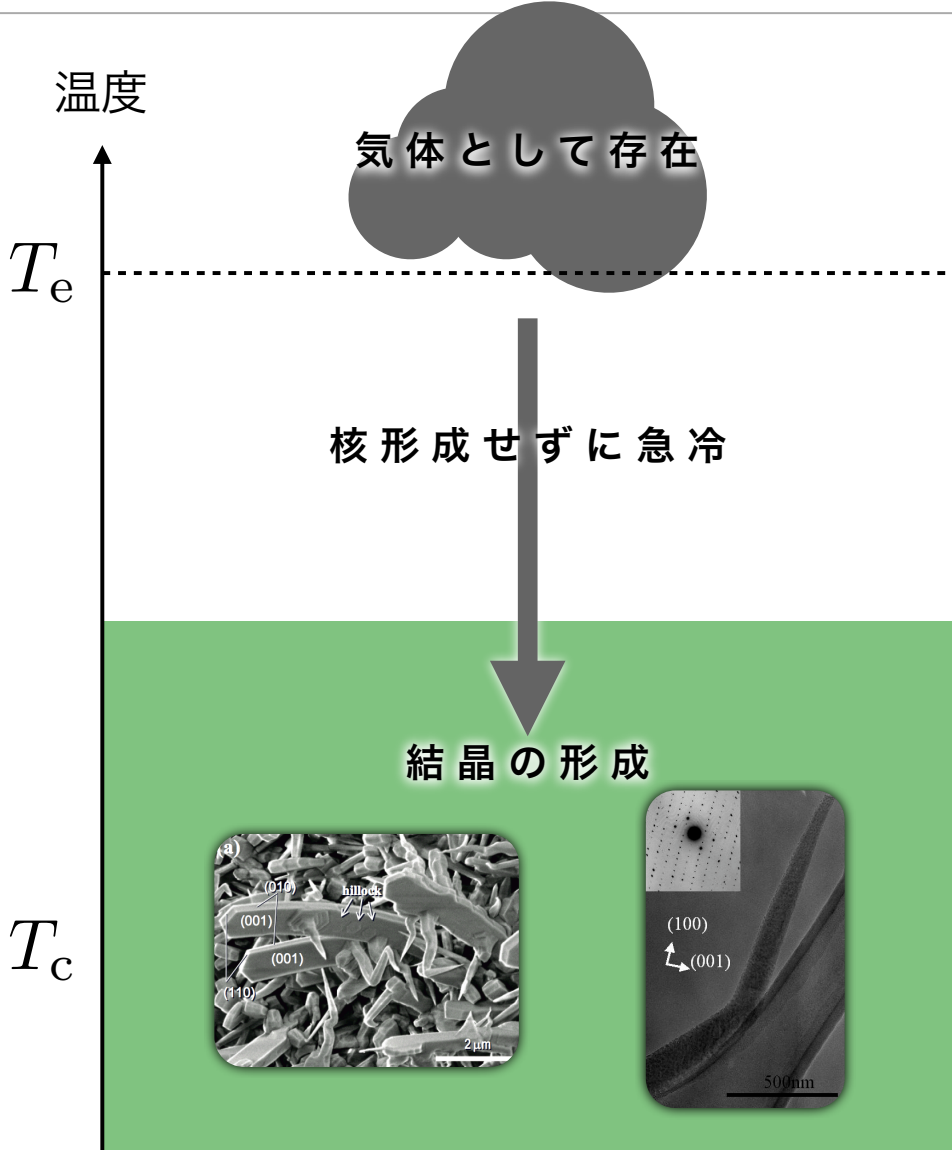
針状エンスタタイト
(MgSiO₃) 結晶



~ 700 - 1150 K で形成
(Yamada et al. 2008)

その他, 凝縮温度に応じて
多様な形態の微結晶が形成

非平衡下におけるダスト形成



平衡凝縮温度 ~ 1400 K for Mg_2SiO_4
at 10^{-3} atm (Grossman 1972)

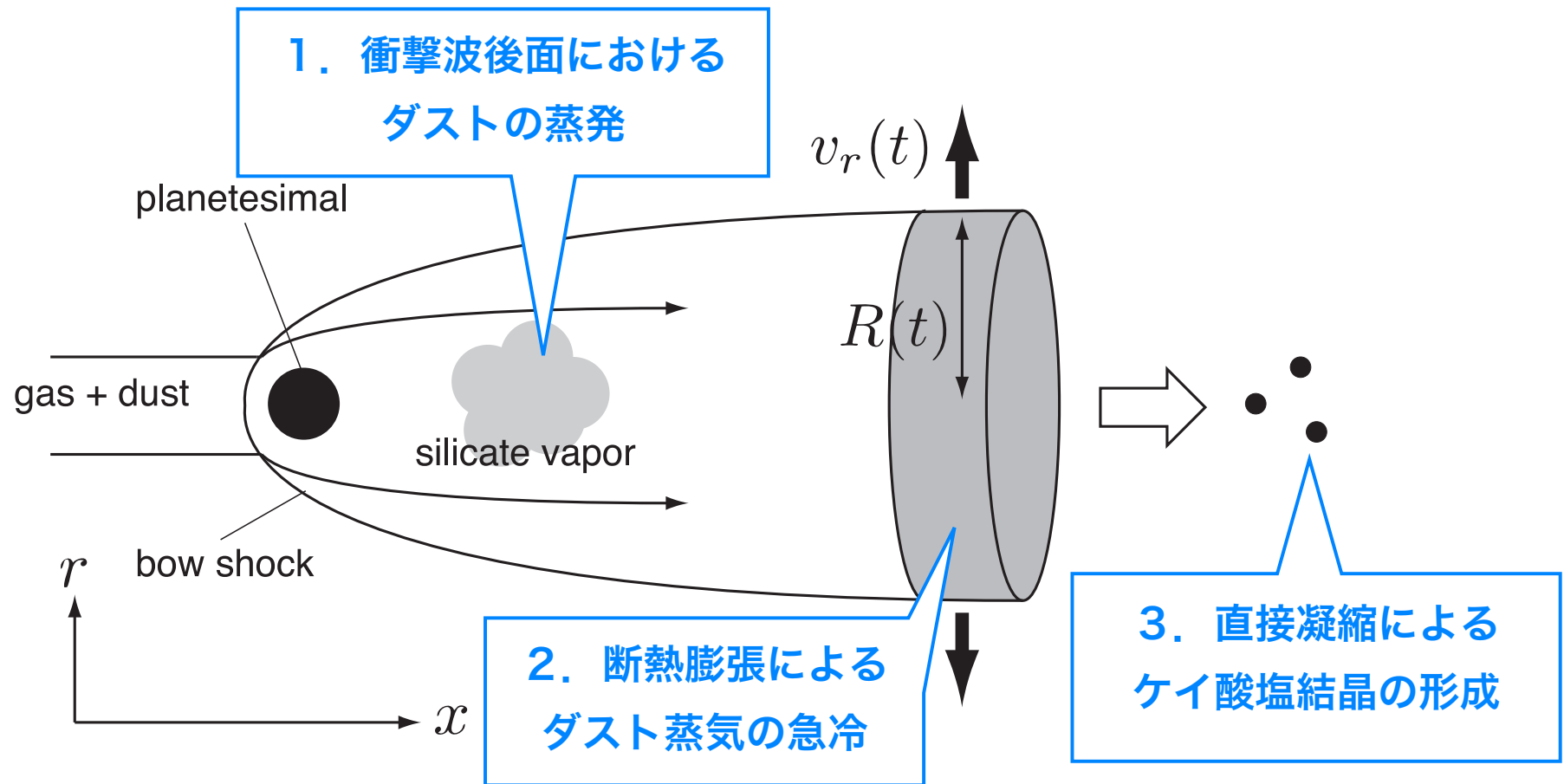
$\sim 200 - 700$ K もの過冷却度

大量のダスト蒸気を発生
かつ
それを急冷するメカニズム

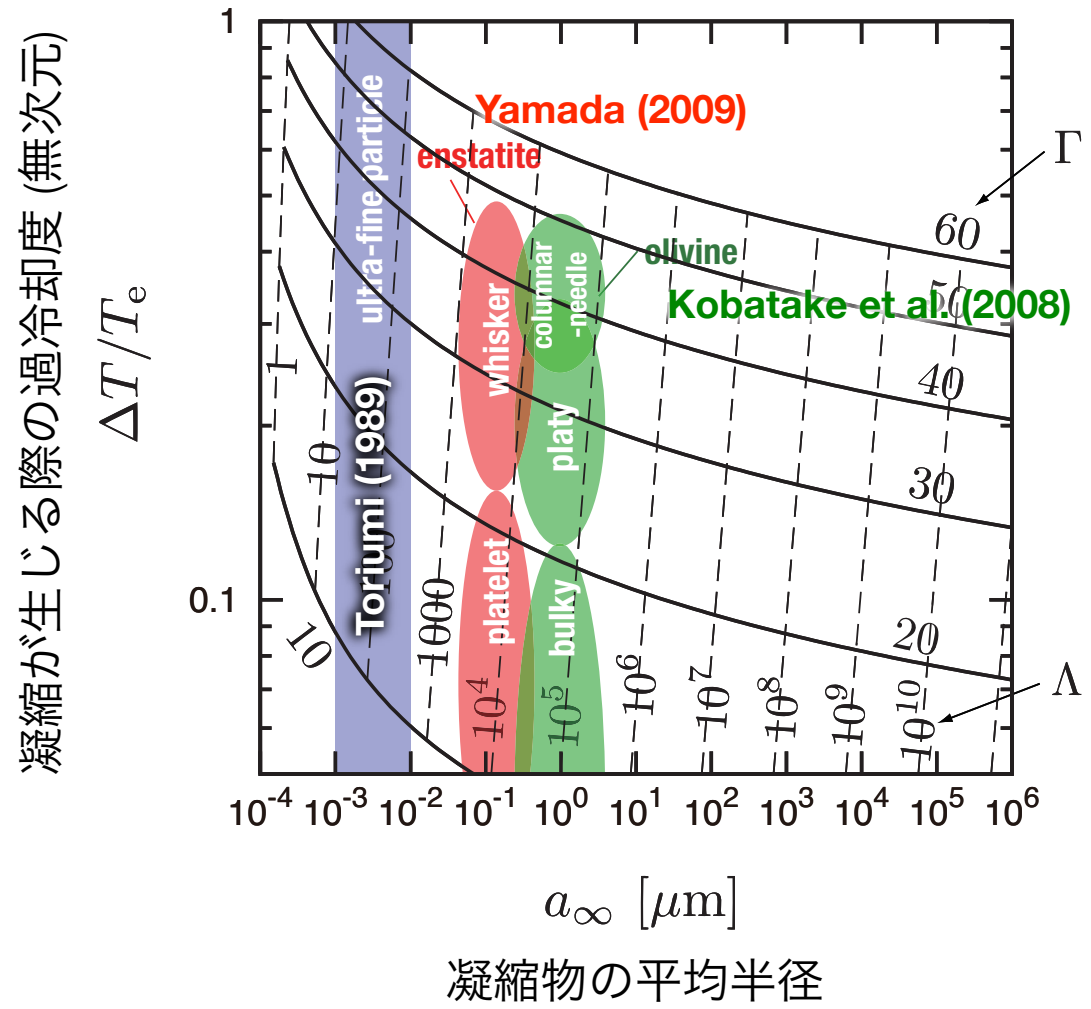
cosmic crystal 凝縮温度 $\sim 700-1200$ K
(Kobatake et al. 2008; Yamada 2009)

微惑星による衝撃波

ガス円盤中を楕円運動する微惑星 (~ 1 - 1000 km)



凝縮温度と平均サイズ



- 冷却時間 (無次元)

蒸気分子の衝突頻度 ↓ ↓ 冷却時間

$$\Lambda = \frac{\nu_{\text{coll}} t_T}{H/T_e - 1},$$

蒸発潜熱 ↑ ↑ 平衡凝縮温度

- 分子の表面エネルギー (無次元)

$$\Gamma = 4\pi a_0^2 \gamma_s / k_B T_e,$$

分子半径 ↑ ↑ 表面張力

$$10 \lesssim \Lambda \lesssim 10^5$$

is required!

目的

微惑星 bow shock は
cosmic crystals 形成モデルとして妥当であるか？

微惑星衝撃波のモデル

- 冷却速度
- ダスト蒸気密度

+

核形成理論

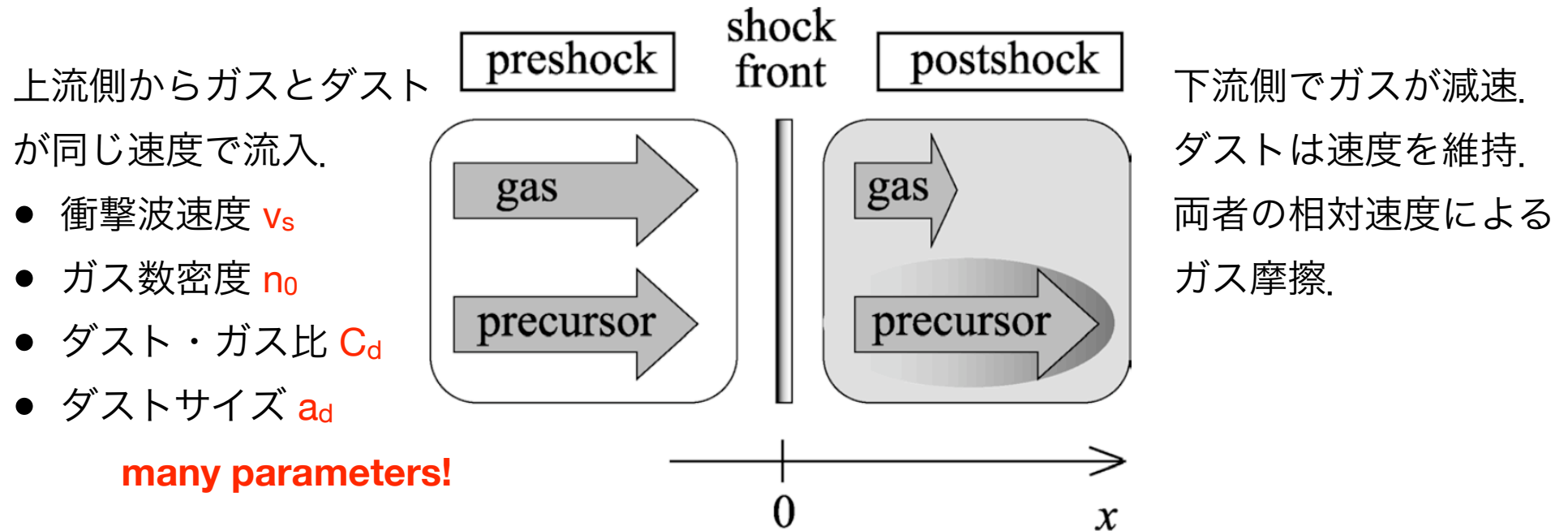
- 凝縮温度（過冷却）
- 凝縮物のサイズ



ダスト蒸発・凝縮実験と比較

- 凝縮温度と微結晶の形態（モロロジー）
- 典型的サイズ

衝撃波加熱の数値計算（定常平行平板モデル）



- ガス・ダイナミクス（流体方程式, 放射冷却, 化学反応）
- ダスト・ダイナミクス（ガスとの摩擦, 蒸発, 輻射場との相互作用）
- 輻射輸送方程式

Hood & Horanyi 1991, 1993; Ruzmaikina & Ip 1994; Desch & Connolly 2002;
Ciesla & Hood 2002, Miura et al. 2002, Miura & Nakamoto 2005, 2006

衝撃波後面におけるダスト熱的進化

$$R_p = 100 \text{ km}, n_0 = 10^{15} \text{ cm}^{-3}, v_s = 10 \text{ km s}^{-1}, C_d = 0.01, a_d = 1 \mu\text{m}$$

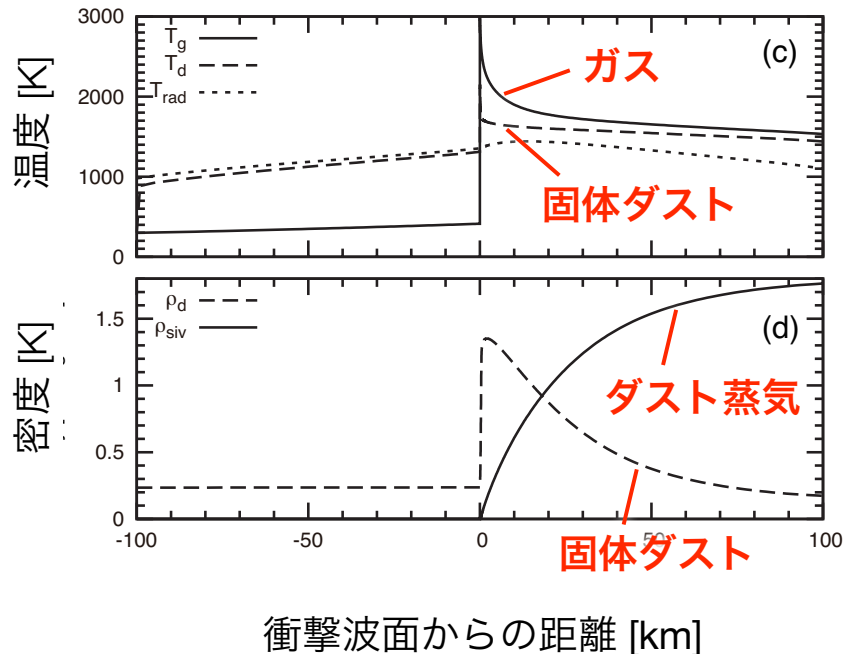
↑ 微惑星半径

↑ ガス数密度

↑ 衝撃波速度

↑
ダスト・ガス質量比

↑ ダスト半径



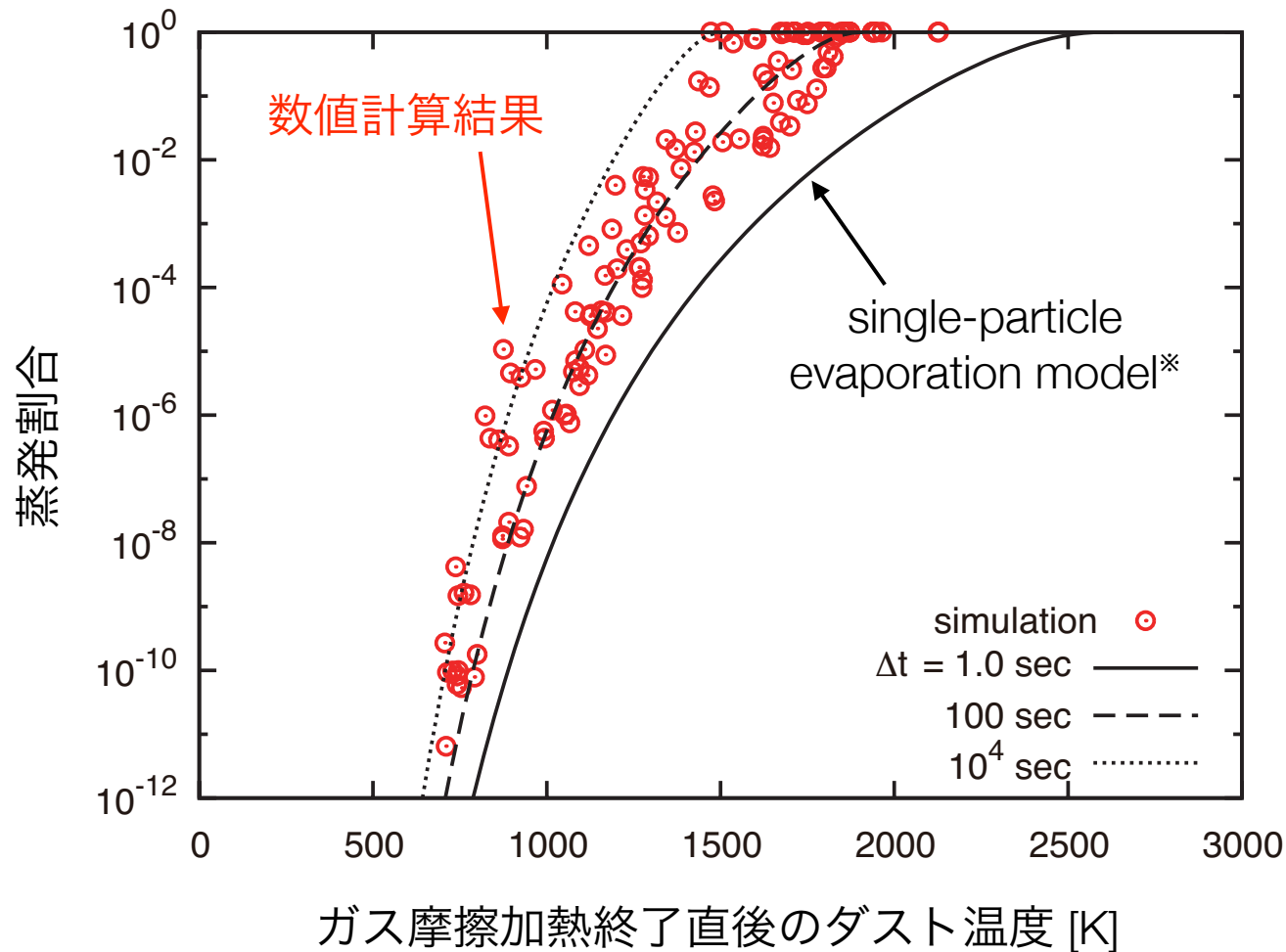
衝撃波通過 → ダスト急加熱 (~ 2000 K)
→ すぐに冷却

周囲の高温ガスからの熱輸送

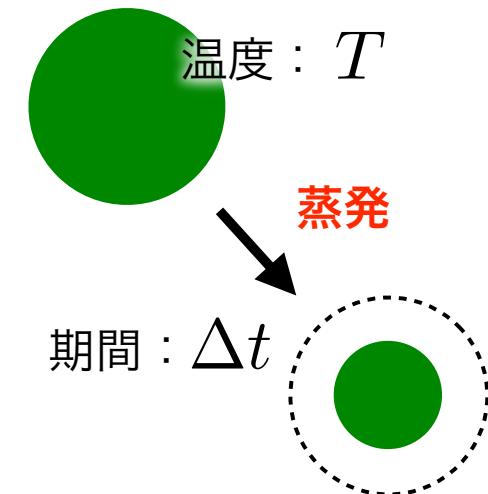
→ ダスト高温状態を維持
→ 蒸発

蒸発したダストの割合: $\eta \equiv \frac{\text{vapor}}{\text{solid} + \text{vapor}} = 0.91$

ダスト蒸発割合



*単一の球状粒子の蒸発を考慮



ダストの蒸発割合は、衝撃波の強度（**衝撃波前面ガス密度**、**衝撃波速度**）に強く依存

衝撃波の強度

ダストの蒸発割合は、衝撃波の強度（**衝撃波前面ガス密度**，**衝撃波速度**）に強く依存
ガス円盤で生じ得る衝撃波強度は？

微惑星とガス円盤の相対速度
(~ **衝撃波速度**) : $v_p \simeq 10 \left(\frac{e}{0.3} \right) \left(\frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^{-1/2} \text{ km s}^{-1}$

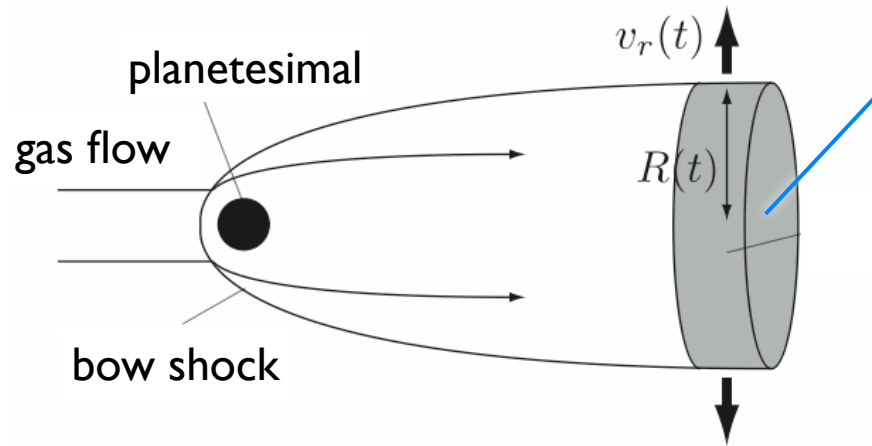
ガス円盤の数密度@赤道面
(~ **前面ガス密度**) : $n_{\text{disk}} \simeq 3 \times 10^{14} \left(\frac{a}{1 \text{ AU}} \right) \text{ cm}^{-3}$

based on MMSN model (Hayashi et al. 1985)

(最大値としての評価に相当)

mmサイズのケイ酸塩ダスト溶融過程，かつ，
ミクロンサイズのダストをほぼ完全に蒸発させ得る
(Iida et al. 2001; Miura & Nakamoto 2005)

Shocked gas の断熱膨張



initial radius, density, pressure, temperature

$$R_0, \rho_0, p_0, T_0$$

Eq. of motion for vertical direction:

$$\frac{dv_r}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r},$$

One-zone approximation:

$$v_r \sim \frac{dR}{dt}, \quad \frac{\partial p}{\partial r} \sim -\frac{p}{R},$$

↓

Eq. of expansion:

$$\frac{d^2 \tilde{R}}{d\tilde{t}^2} = \frac{1}{2} \tilde{R}^{-2\gamma+1},$$

無次元量の定義：

- 半径： $\tilde{R} = R/R_0$
- 時間： $\tilde{t} = c_{s0}t/R_0 = t/t_{s0}$
- 膨張速度： $\tilde{v}_r = d\tilde{R}/d\tilde{t} = v_r/c_{s0}$

膨張解

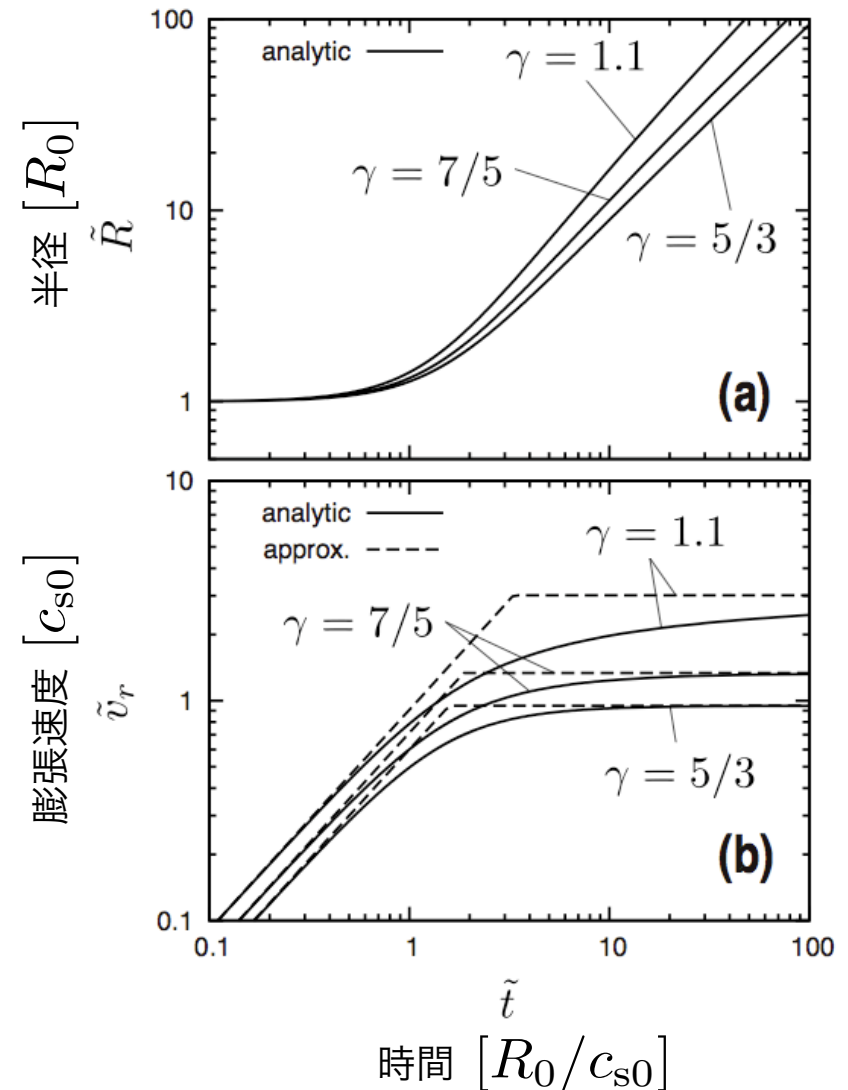
- 膨張速度（半径の関数）：

$$\tilde{v}_r = \frac{d\tilde{R}}{d\tilde{t}} = \left[\frac{1 - \tilde{R}^{-2(\gamma-1)}}{\gamma(\gamma-1)} \right]^{1/2}$$

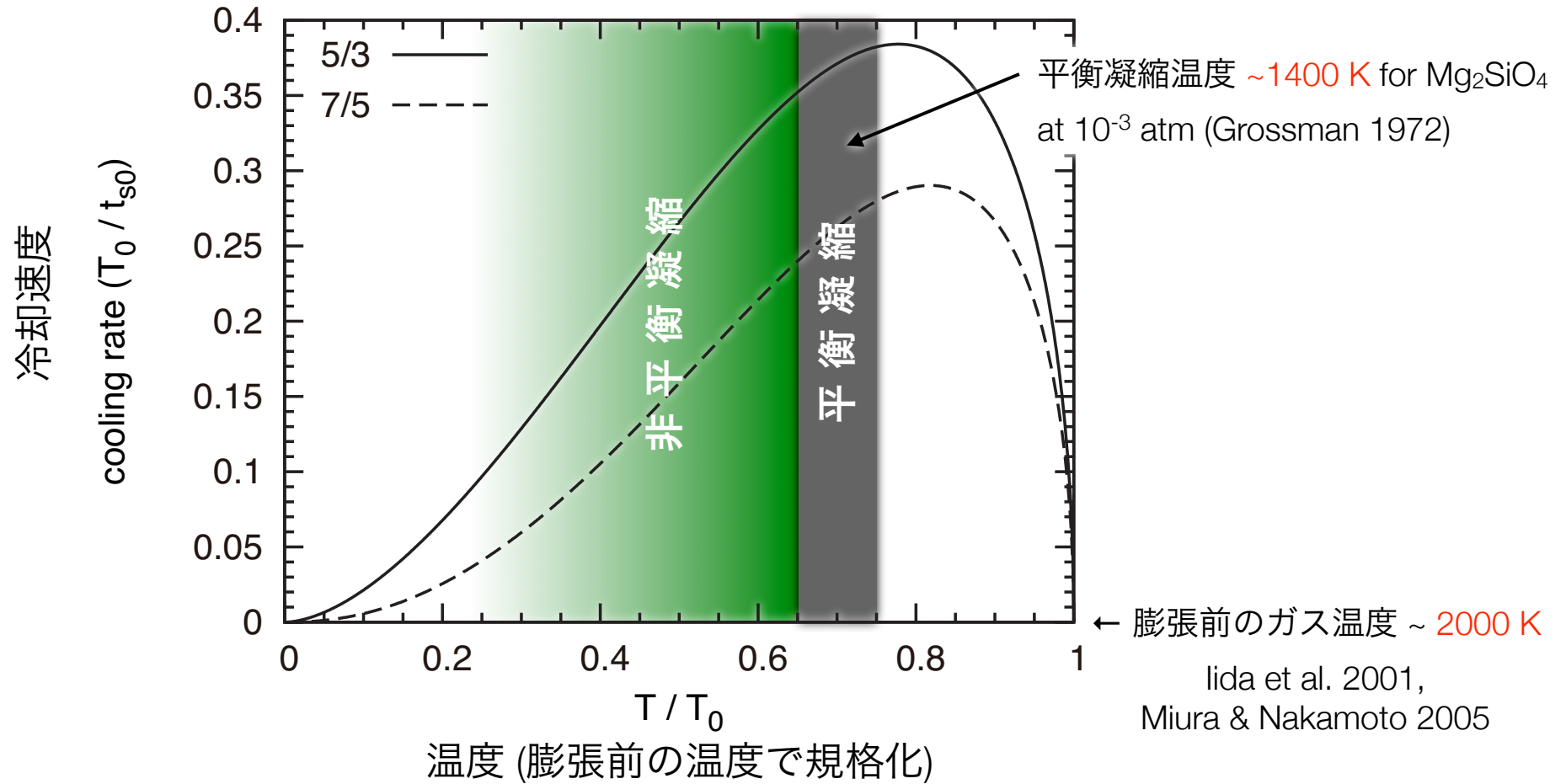
- 半径（時間の関数）：

$$\frac{\tilde{t}}{\sqrt{\gamma(\gamma-1)}} = \int_1^{\tilde{R}} \frac{dy}{\sqrt{1 - y^{-2(\gamma-1)}}$$

sound-crossing time (R_0/c_{s0}) を過ぎた
あたりから膨張フェイズが始まる

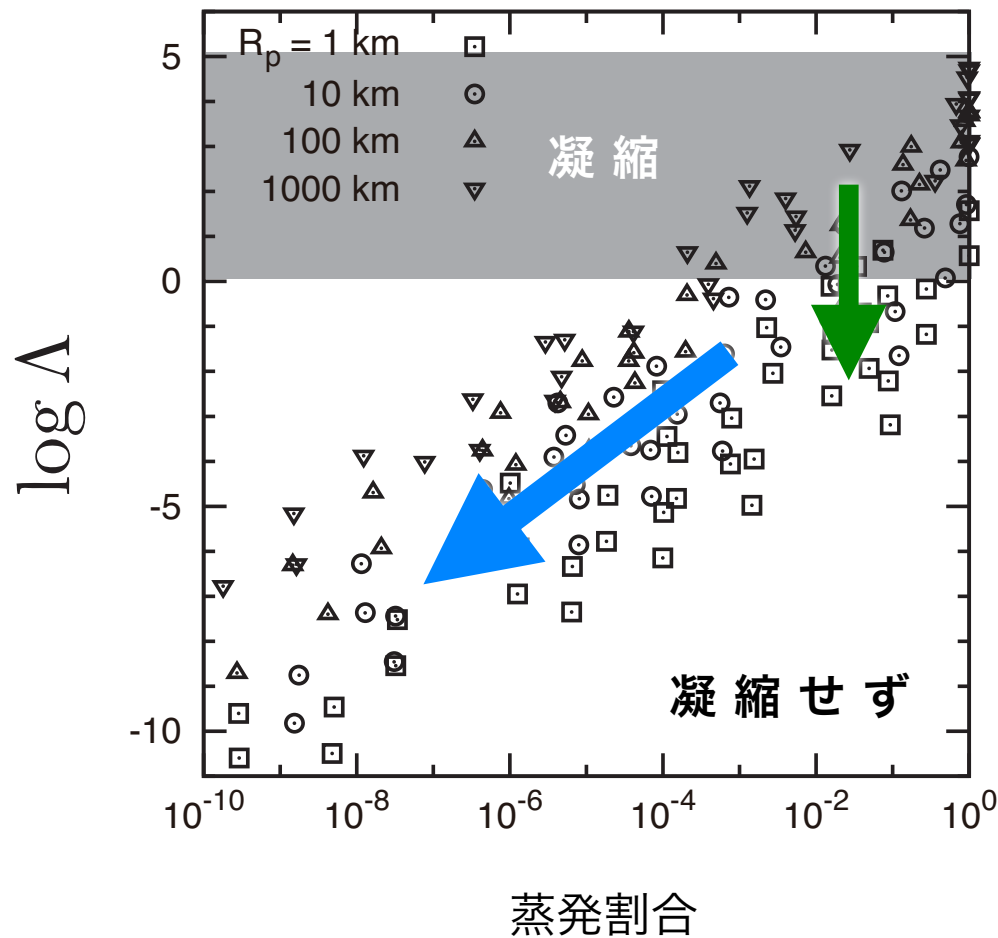


冷却速度



$$-\left(\frac{dT}{dt}\right)_{T_e} \simeq (0.25 - 0.35) \frac{T_0}{R_0/c_{s0}} \simeq 2000 \left(\frac{R_0}{1 \text{ km}}\right)^{-1} \left(\frac{T_0}{2000 \text{ K}}\right) \left(\frac{c_{s0}}{3.7 \text{ km s}^{-1}}\right) \text{ K sec}^{-1}$$

Cooling parameter Λ の値



- 冷却時間 (無次元)

$$\Lambda = \frac{\nu_{\text{coll}} t_T}{H/T_e - 1},$$

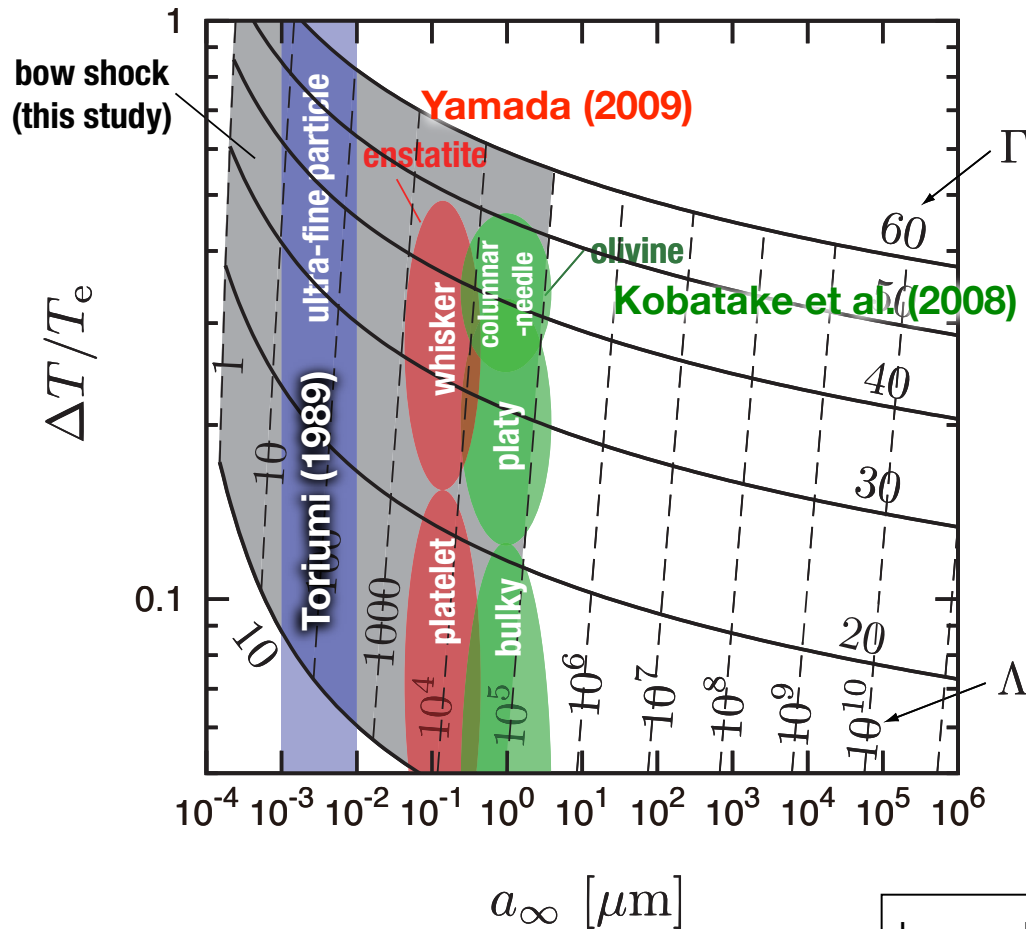
完全蒸発 ($\eta \sim 1$) の場合：

$$1 \lesssim \Lambda \lesssim 10^5$$

蒸発が少ないと、凝縮が生じない
(蒸気分子同士が衝突するよりも
速く蒸気が冷えるため)

微惑星半径が小さいほど Λ が小さい
(ガス冷却が速いため)

蒸発・凝縮実験との比較



- **olivine crystals**

$10^4 < \Lambda < 10^5$ 程度で形成, ~ 1000 km
サイズの惑星に相当

- **enstatite crystals (whisker)**

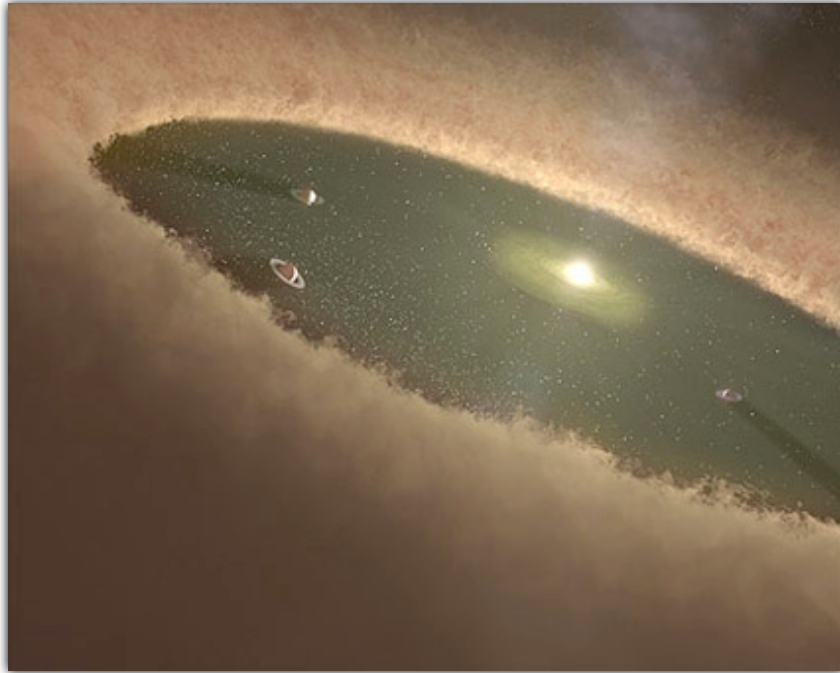
$10^3 < \Lambda < 10^4$ 程度で形成, ~ 100 km
サイズの原始惑星に相当

- **ultra-fine (\sim nm) particles**

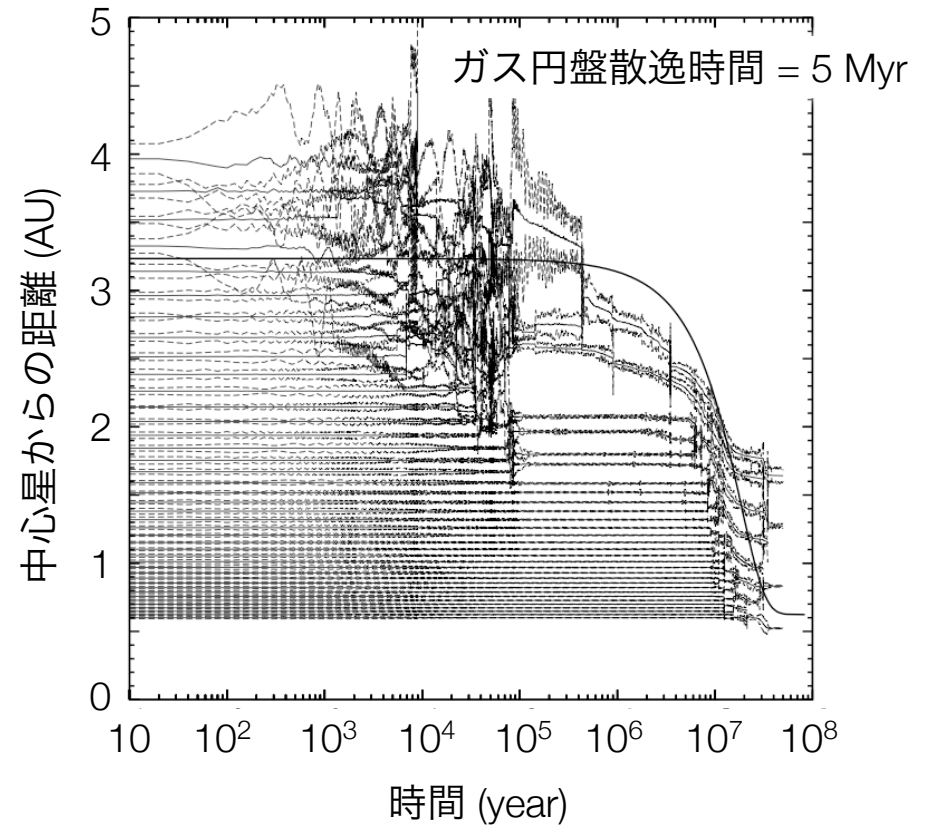
$10 < \Lambda < 100$ 程度で形成, ~ 1 km サイ
ズの微惑星に相当

bow shock を引き起こす惑星サイズに応じて
多様な形態のケイ酸塩結晶が形成される

惑星形成に伴うダスト結晶化シナリオ



円盤から惑星が形成されている様子の想像図
(c)NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC)



ガス円盤散逸とともに岩石惑星が形成する様子の
数値シミュレーション (Nagasawa et al. 2005)

惑星形成のタイミングで cosmic crystals が形成？

まとめ

- **ケイ酸塩ダストの蒸発と， 蒸気の急冷を同時に実現**

コンドリュール形成と同時に， ミクロンサイズの微小ダストがほぼ完全に蒸発． ダスト蒸気の冷却速度は微惑星のサイズに反比例し， 1 km 程度であれば 2000 K の蒸気がわずか ~ 1 sec 程度で断熱膨張・冷却する．

- **凝縮温度と平均サイズの一致**

古典的核形成理論に基づいた評価により， 蒸気からの凝縮は平衡凝縮温度より数 100 K も低温で生じ， 凝縮物の平均サイズは $< 1 \mu\text{m}$ 程度であることが分かった． これは， ダスト蒸発・凝縮実験において， cosmic crystals を形成する条件と良く合っている．

- **多様なケイ酸塩微粒子の形成を説明可**

微惑星サイズに応じて， 冷却速度がオーダーで変化． これにより， nm サイズの olivine 微粒子から μm サイズのケイ酸塩微結晶まで， 多様な粒子を形成することが可能である．

