

# 失敗型超新星におけるダスト形成

## 概要

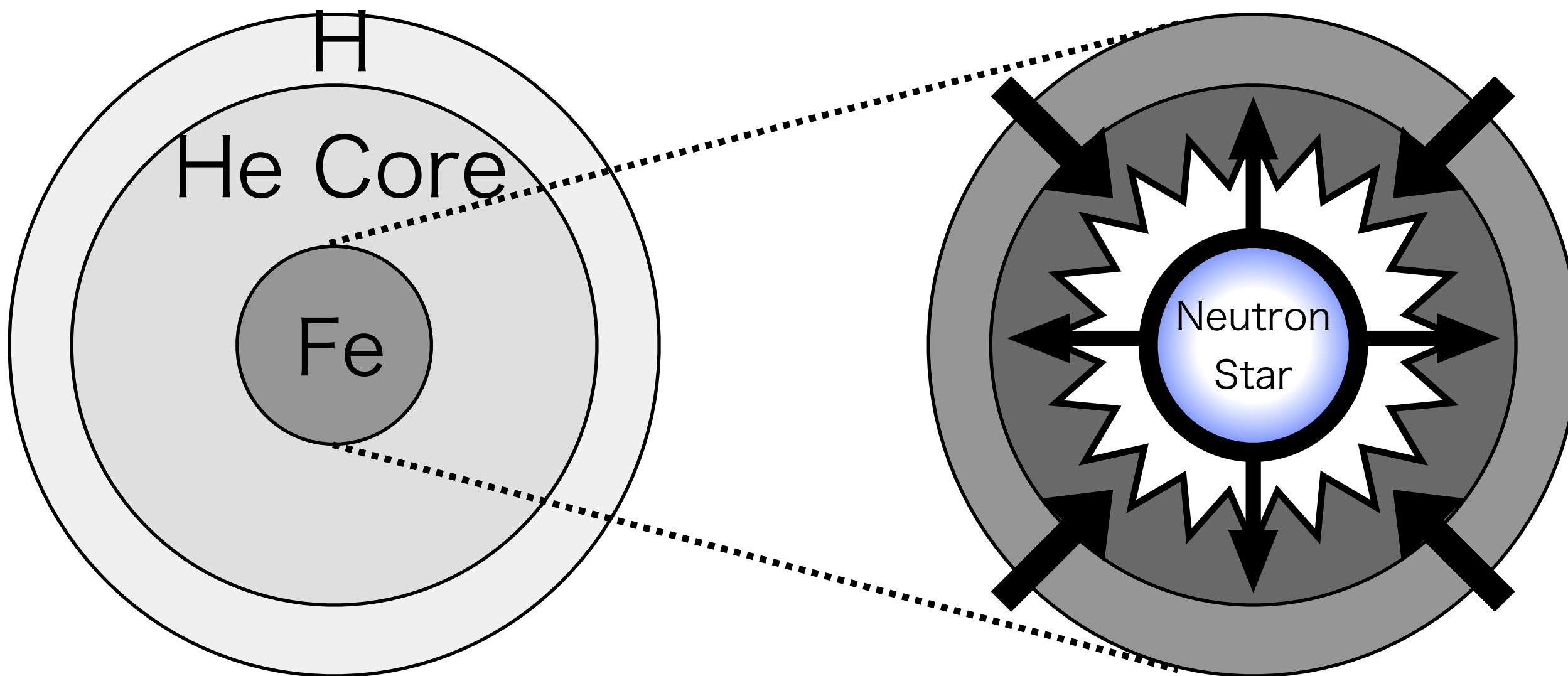
BH を作るチャンネルの一つである失敗型超新星はダストによる赤外放射を出す可能性があり、そのダスト組成・サイズ分布は通常超新星・ISM ダストと異なる。

篠田兼伍 (東京大学)

共同研究者：

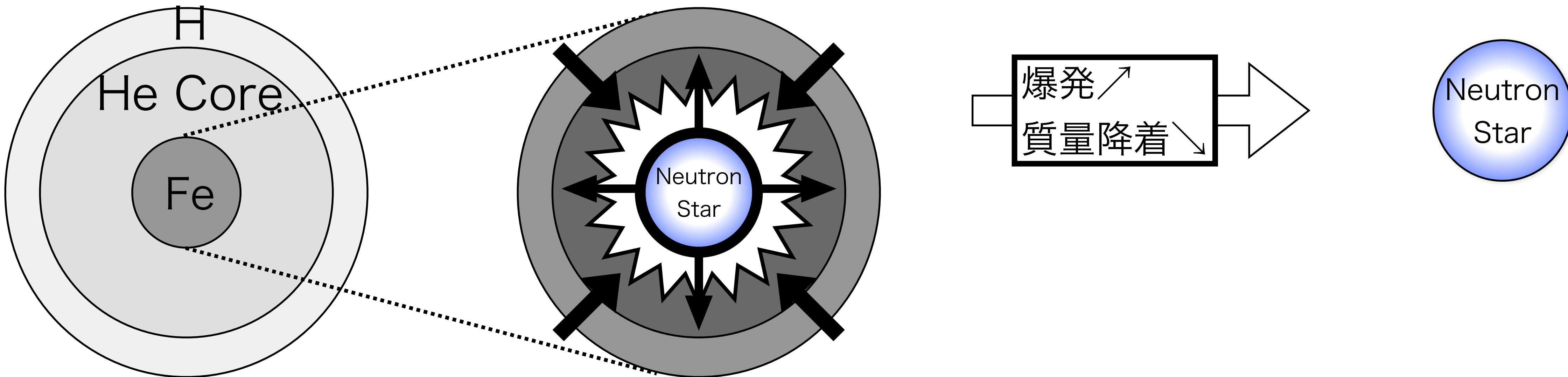
田崎 亮, 徳野 鷹人, 諏訪 雄大 (東京大学)

# Introduction: 超新星爆発と失敗型超新星



大質量星  $\geq 8M_{\odot}$

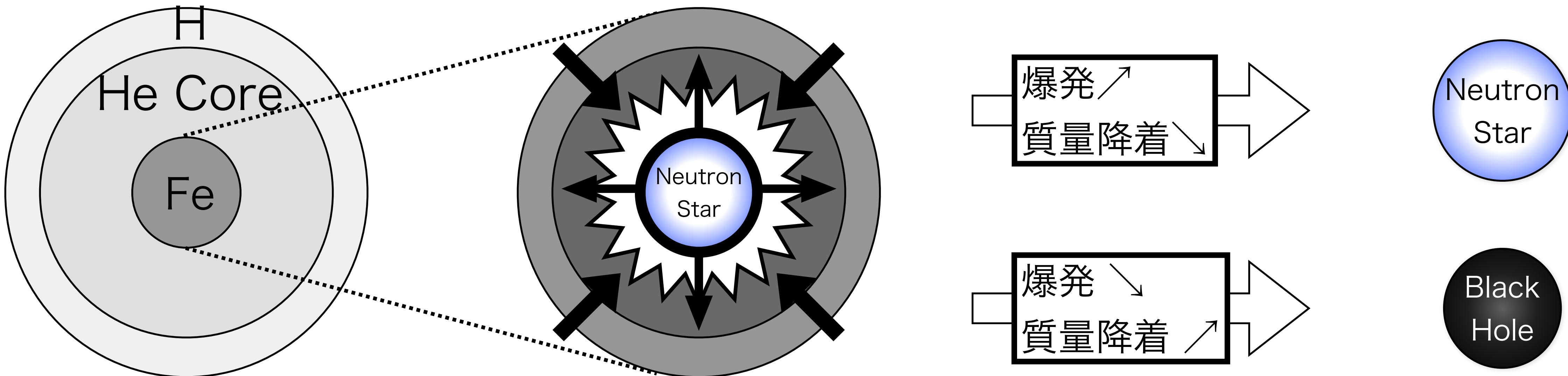
# Introduction: 超新星爆発と失敗型超新星



大質量星  $\geq 8M_{\odot}$

- 爆発エネルギー [大] : 中性子星 (NS)

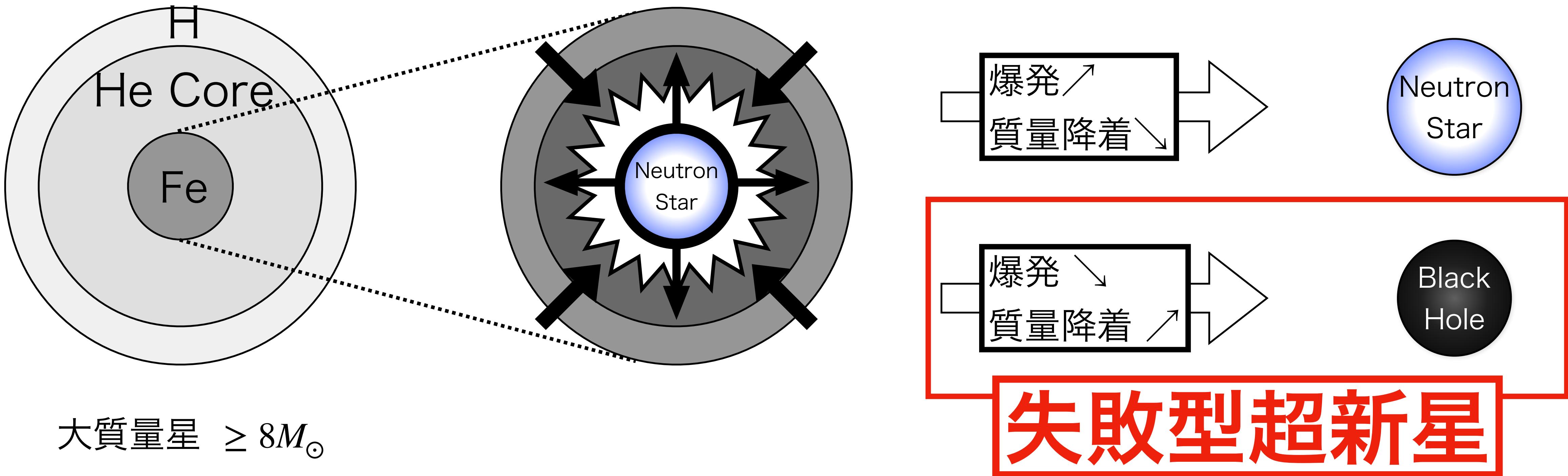
# Introduction: 超新星爆発と失敗型超新星



大質量星  $\geq 8M_{\odot}$

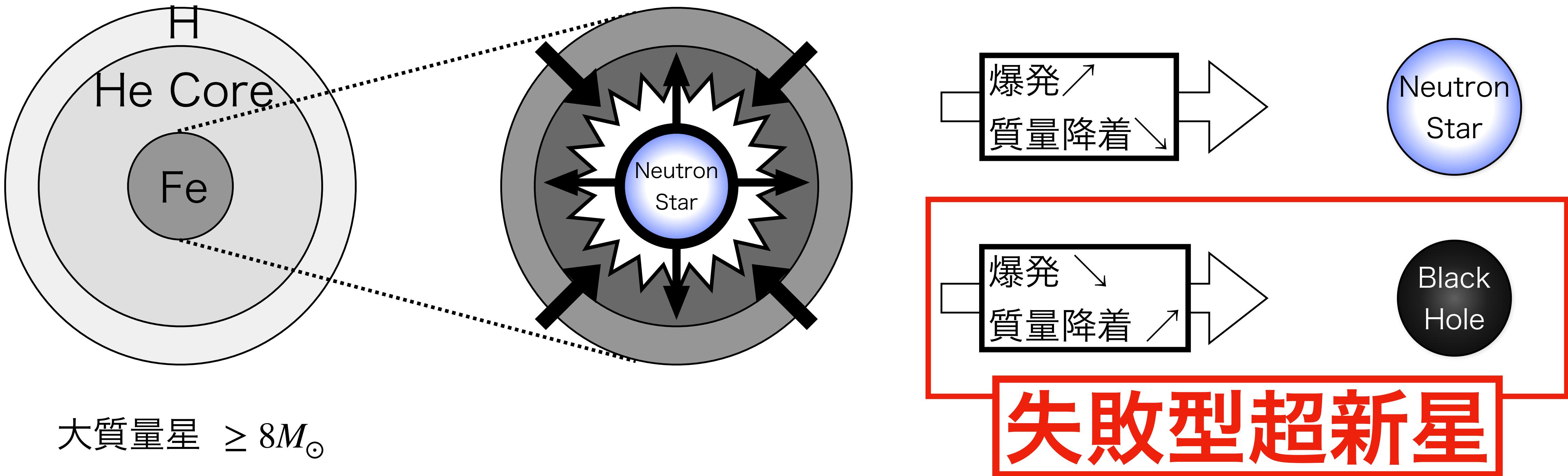
- 爆発エネルギー [大] : 中性子星 (NS), [小] : ブラックホール (BH)

# Introduction: 超新星爆発と失敗型超新星



- 爆発エネルギー [大] : 中性子星 (NS), [小] : ブラックホール (BH)
- 失敗型超新星 : BH 形成の瞬間を反映 しかし暗くて観測が困難

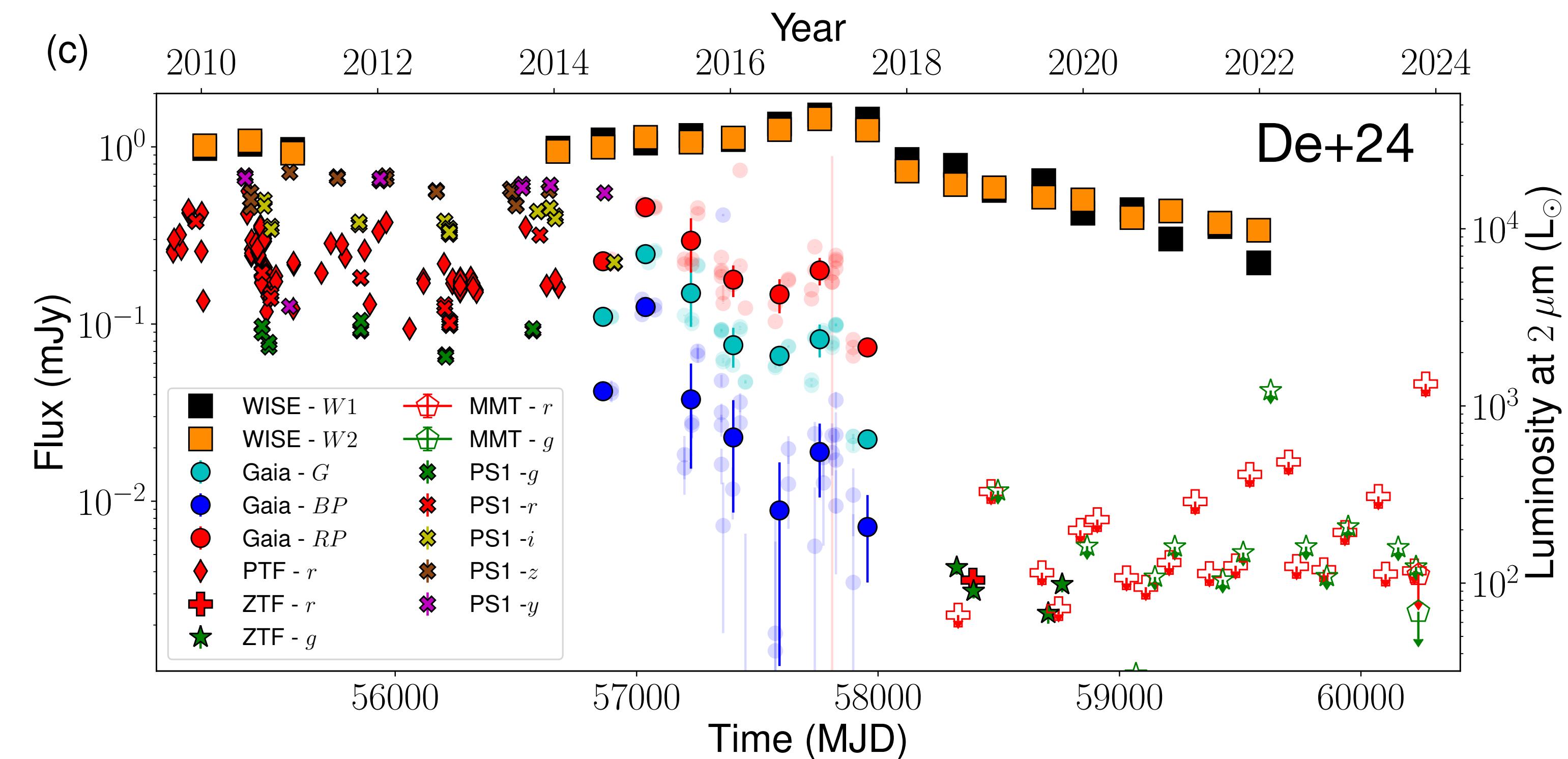
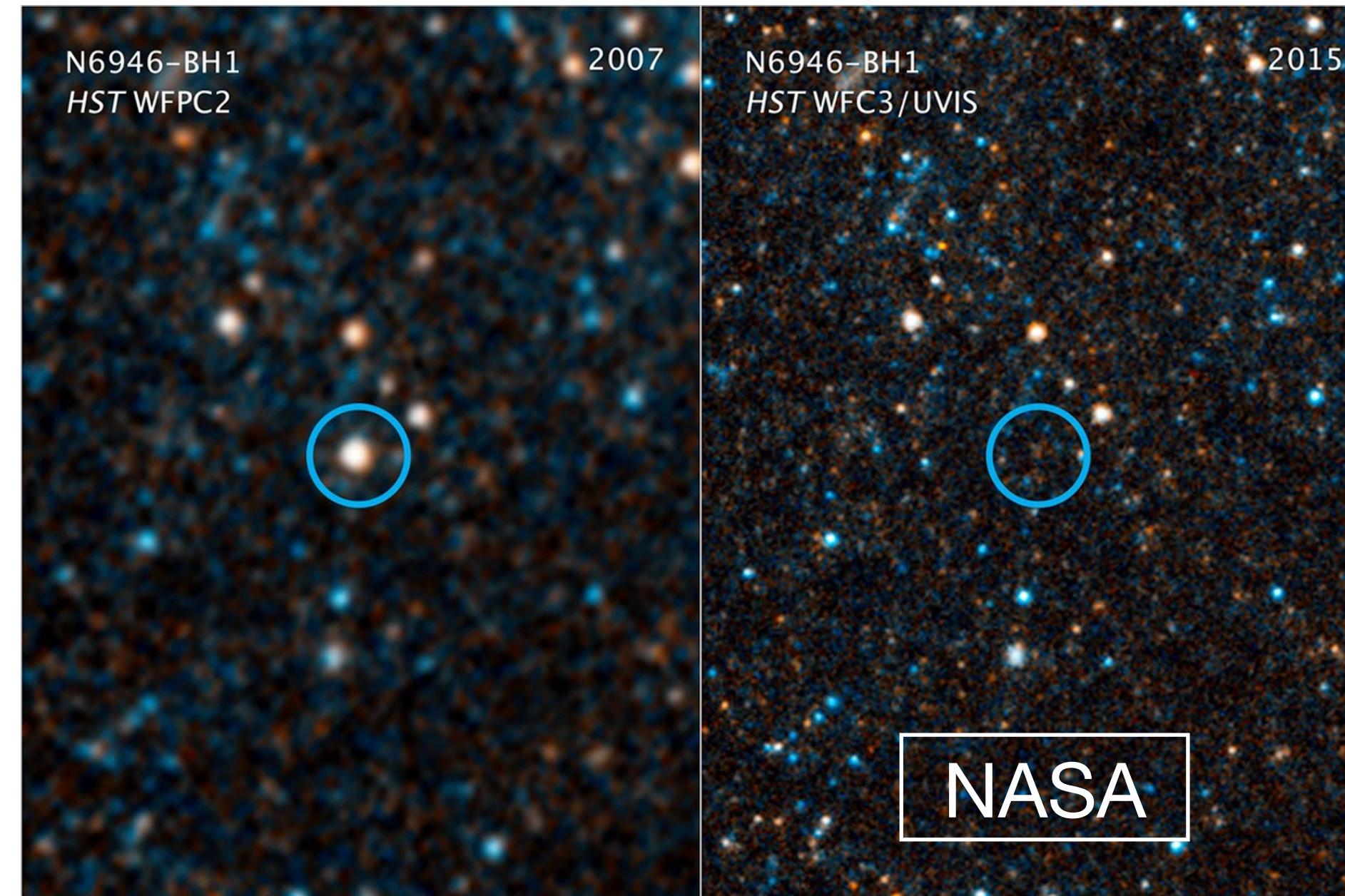
# Introduction: 超新星爆発と失敗型超新星



- 爆発エネルギー [大] : 中性子星 (NS), [小] : ブラックホール (BH)
- 失敗型超新星 : BH 形成の瞬間を反映 しかし暗くて観測が困難
- 問題 : 暗い失敗型超新星から BH 形成のシグナルをどう得る?

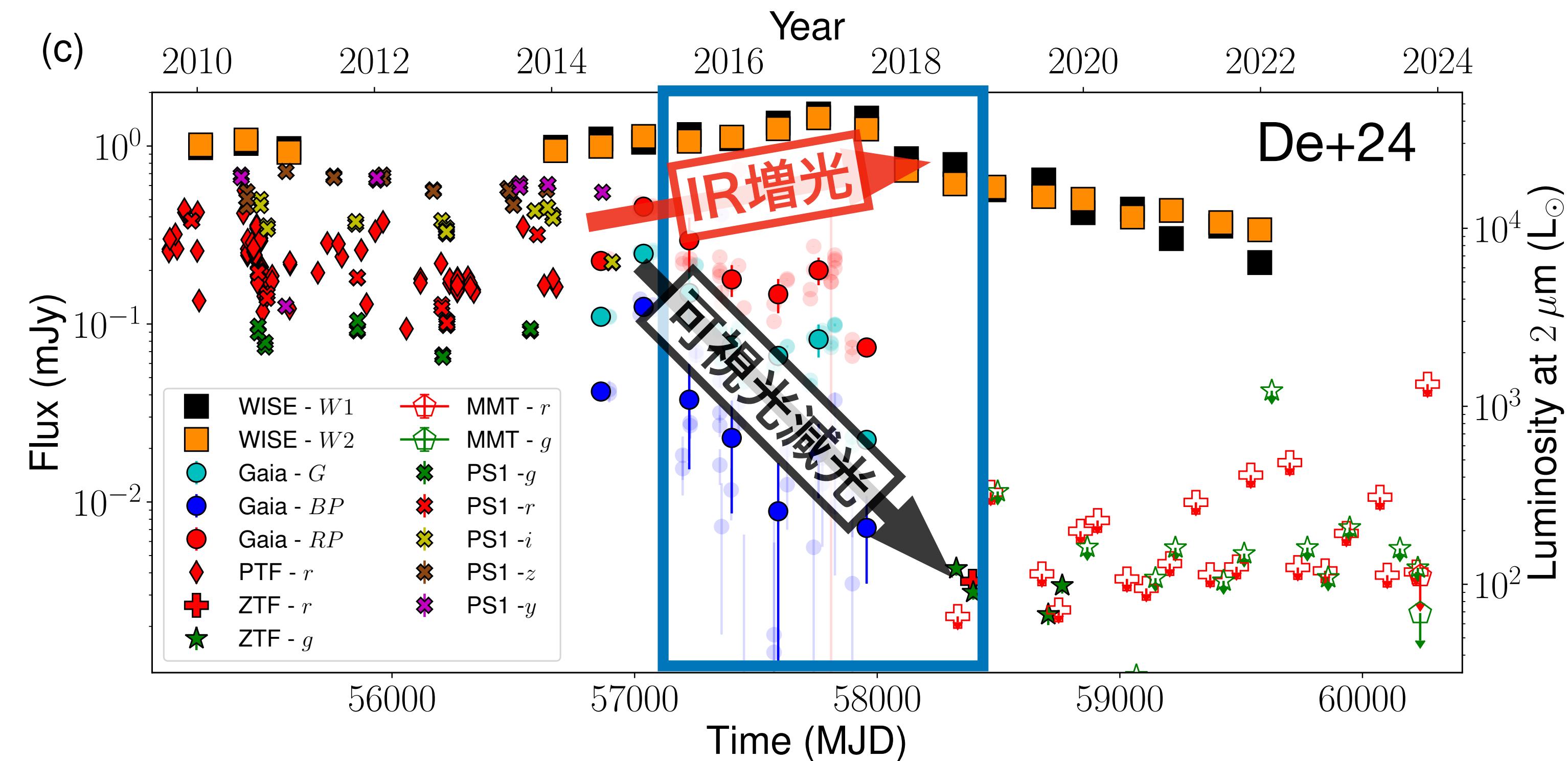
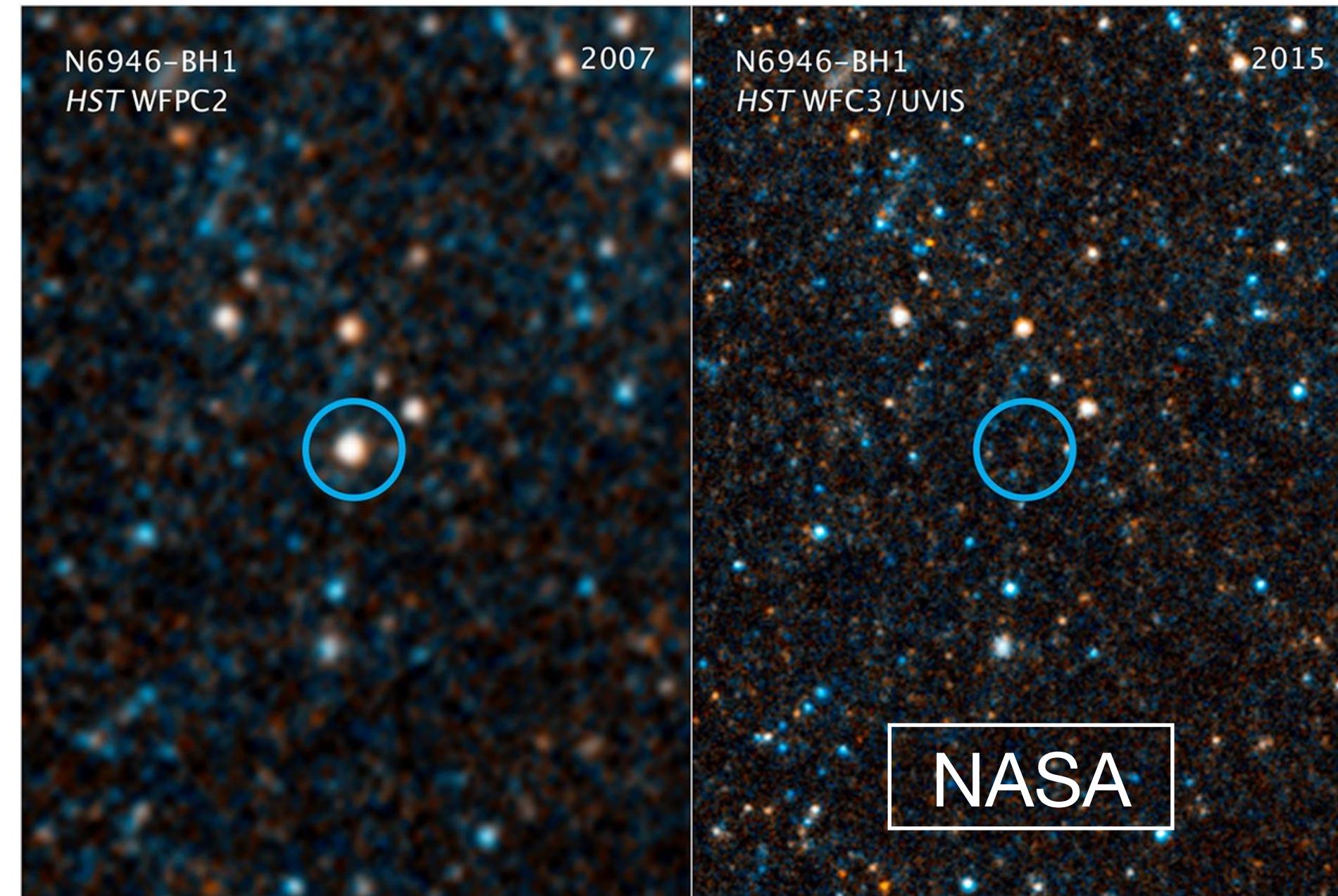
# Introduction: 失敗型超新星候補天体 (FSN Cand.)

- 候補天体 (M31-2014-DS1, N6946-BH1): 直接的証拠 (重力波・ニュートリノ検知)なし



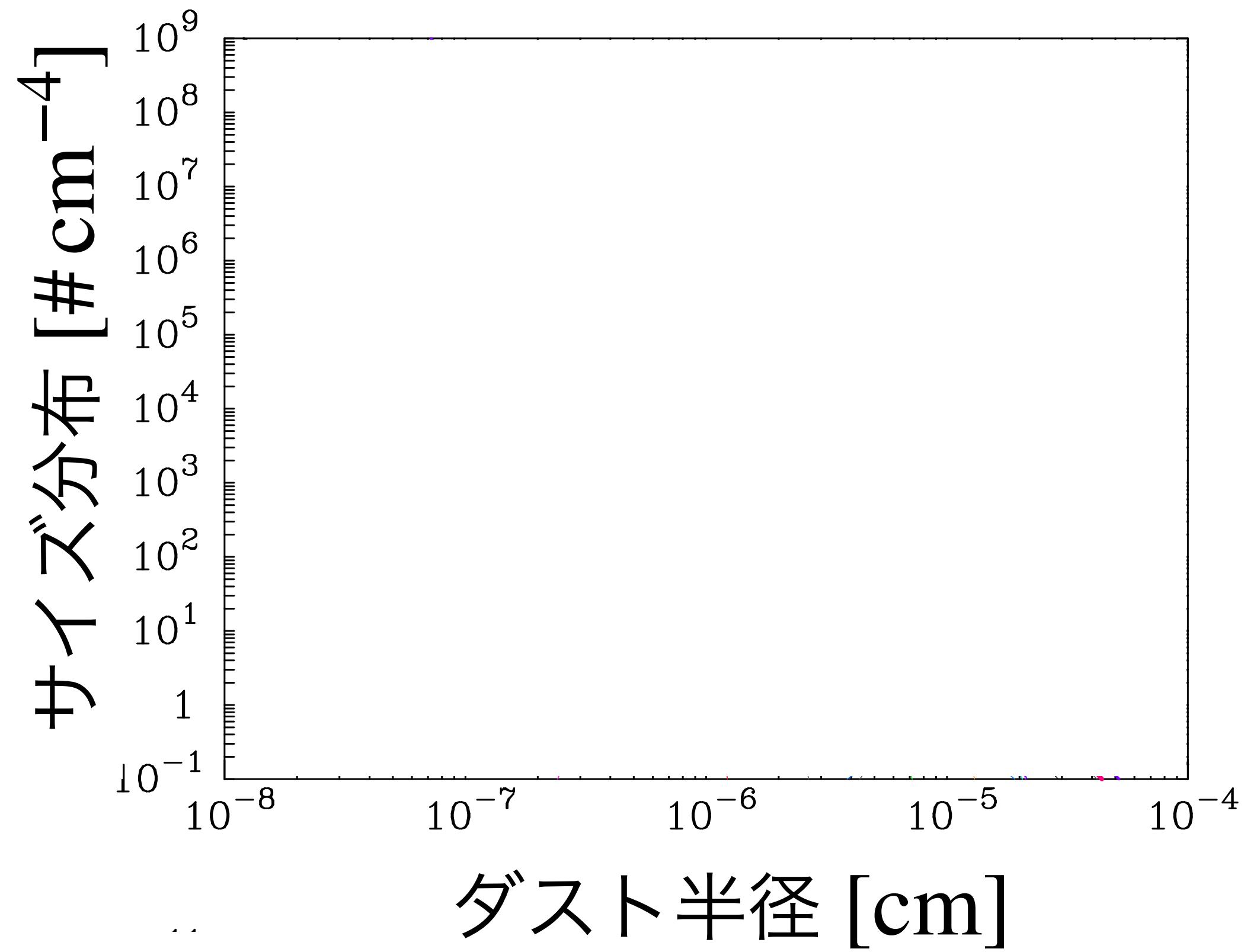
# Introduction: 失敗型超新星候補天体 (FSN Cand.)

- 候補天体 (M31-2014-DS1, N6946-BH1): 直接的証拠 (重力波・ニュートリノ検知)なし



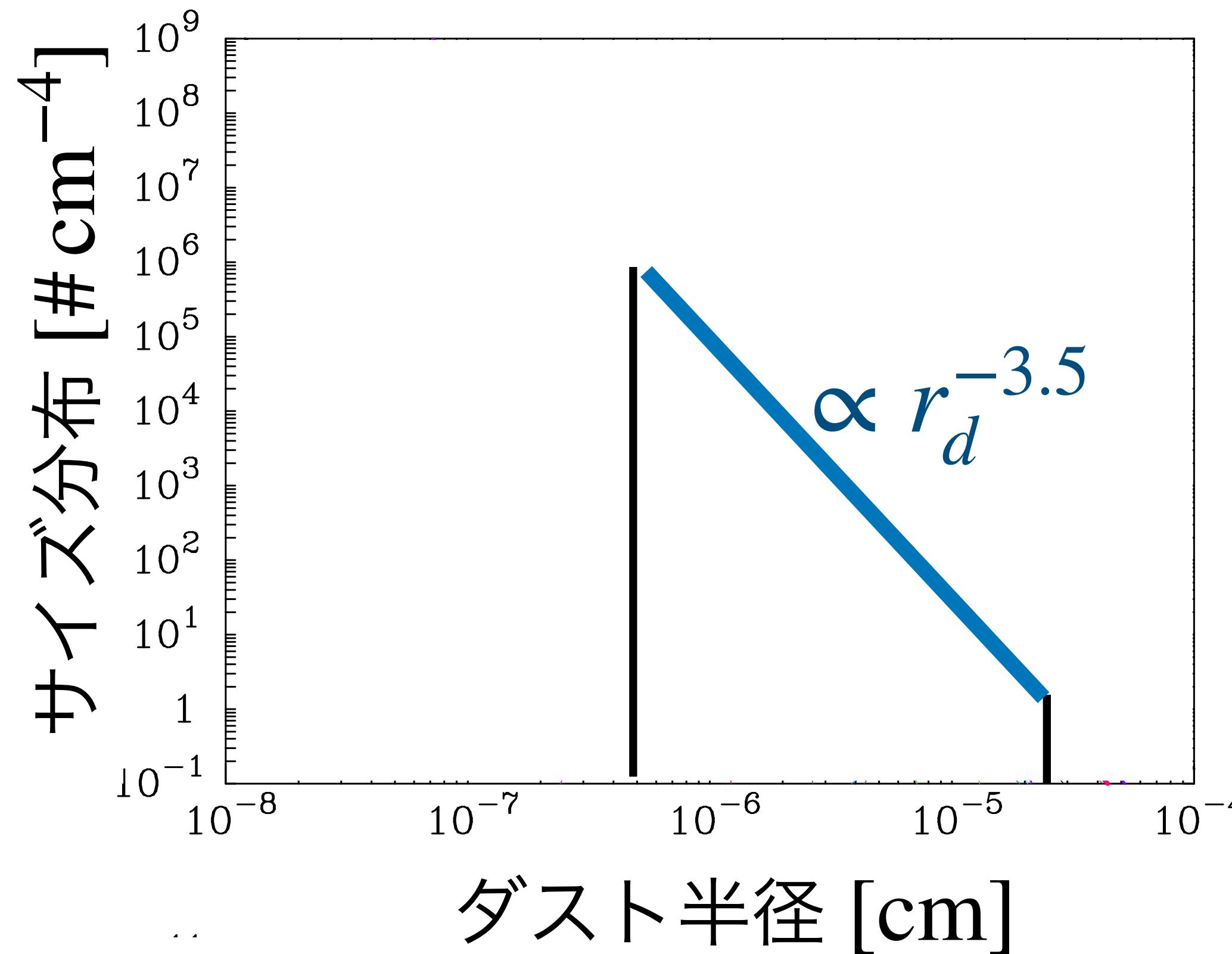
- 可視光消失 ↓, 赤外 (IR)増光 ↑ → ダストによる熱放射?
- 暗い失敗型超新星: IR 残光は BH 形成を観測する唯一の手がかり!

# Introduction: 観測での仮定・理論との齟齬



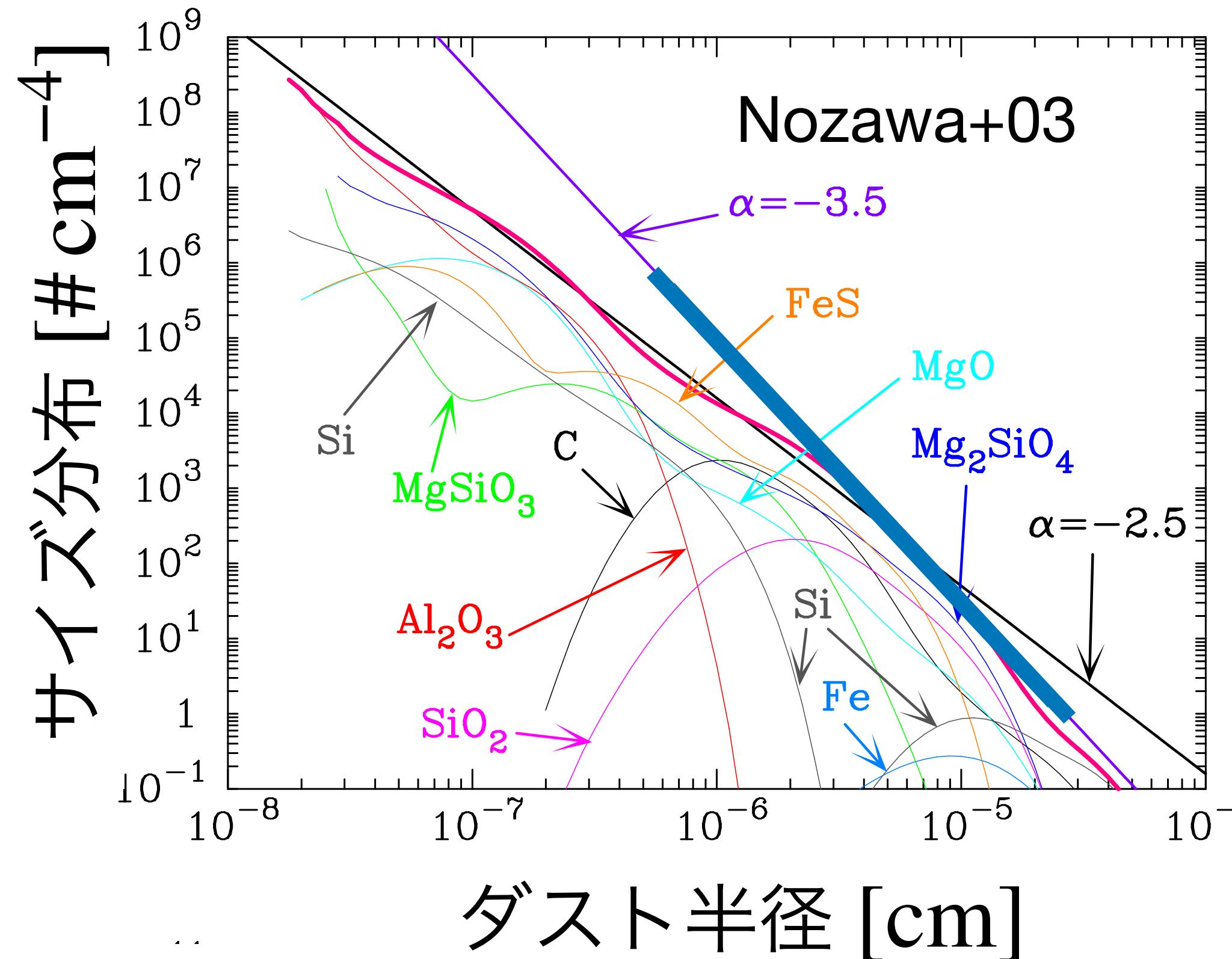
	FSN Cand.	通常SN (Rem. NS)	FSN (Rem. BH)
最大半径			
最小半径			
サイズ分布			
ダスト組成			

# Introduction: 観測での仮定・理論との齟齬



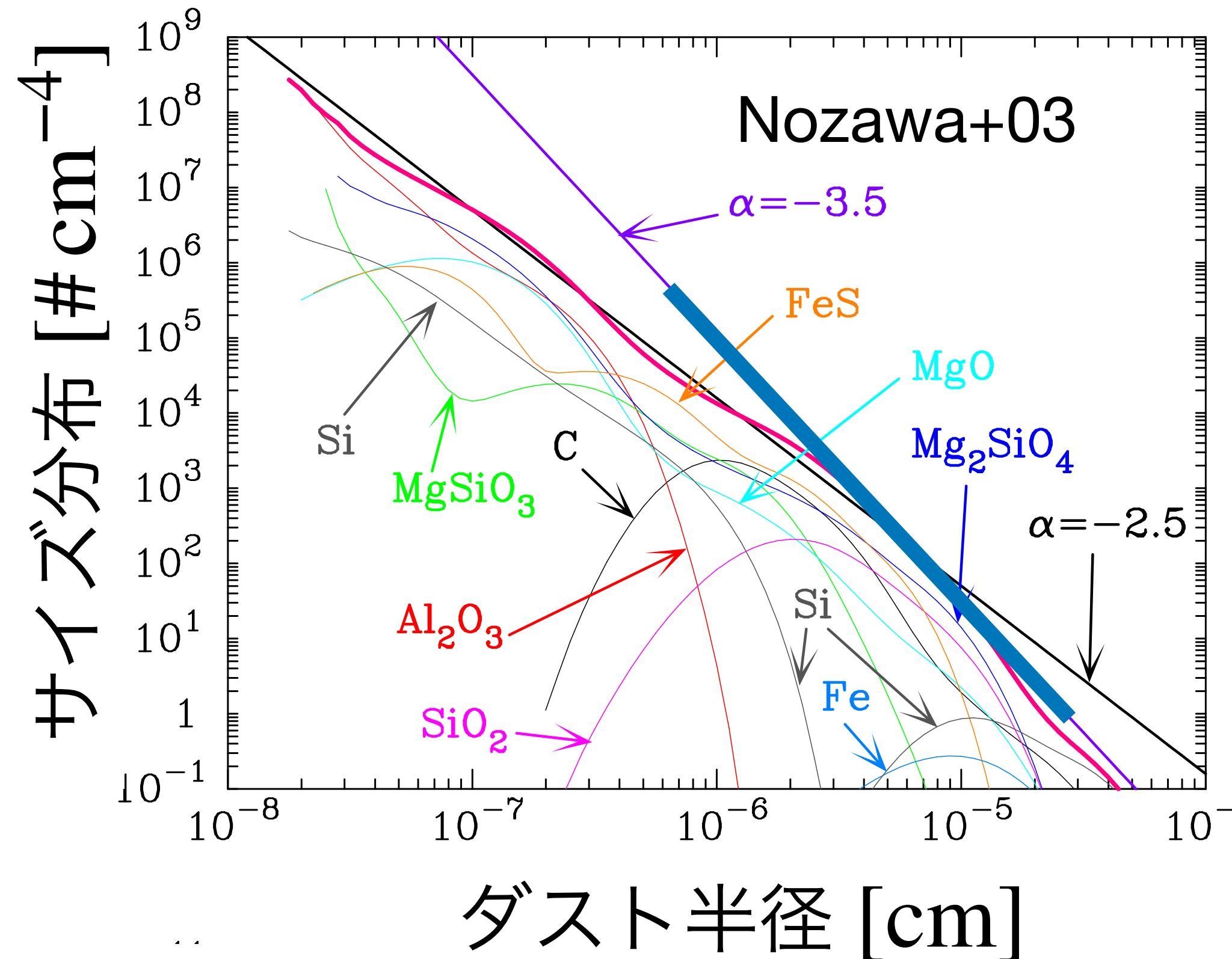
	FSN Cand.	通常SN (Rem. NS)	FSN (Rem. BH)
最大半径	$5 \times 10^{-7} \text{ cm}$		
最小半径	$2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}$		
サイズ分布	$\propto r_d^{-3.5}$		
ダスト組成	シリケイ ト		

# Introduction: 観測での仮定・理論との齟齬



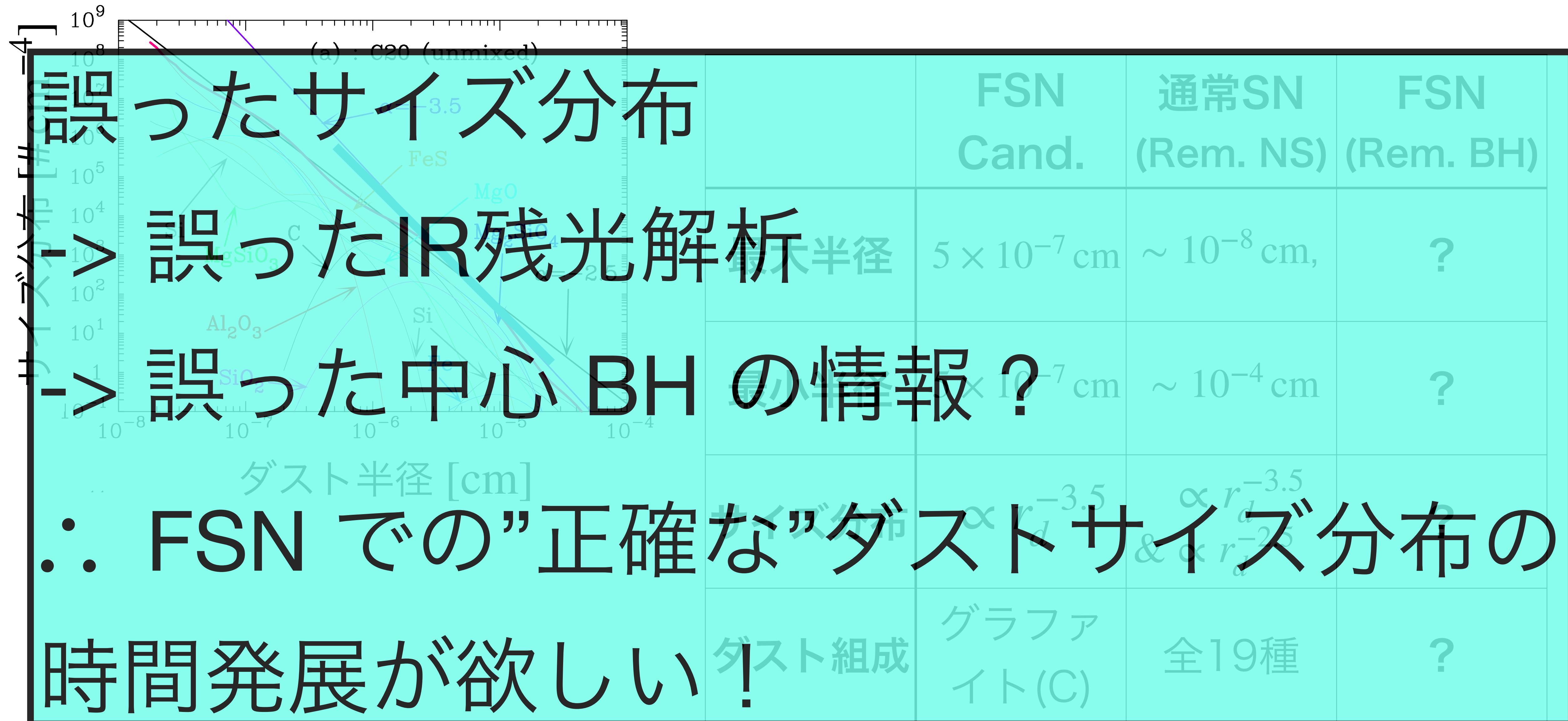
	FSN Cand.	通常SN (Rem. NS)	FSN (Rem. BH)
最大半径	$5 \times 10^{-7} \text{ cm}$	$\sim 10^{-8} \text{ cm}$	
最小半径	$2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}$	$\sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm}$	
サイズ分布	$\propto r_d^{-3.5}$	$\propto r_d^{-3.5} \text{ or } r_d^{-2.5}$	
ダスト組成	シリケイ ト	8種	

# Introduction: 観測での仮定・理論との齟齬



	FSN Cand.	通常SN (Rem. NS)	FSN (Rem. BH)
最大半径	$5 \times 10^{-7} \text{ cm}$	$\sim 10^{-8} \text{ cm}$	?
最小半径	$2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}$	$\sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm}$	?
サイズ分布	$\propto r_d^{-3.5}$	$\propto r_d^{-3.5} \text{ or } r_d^{-2.5}$	?
ダスト組成	シリケイ ト	8種	?

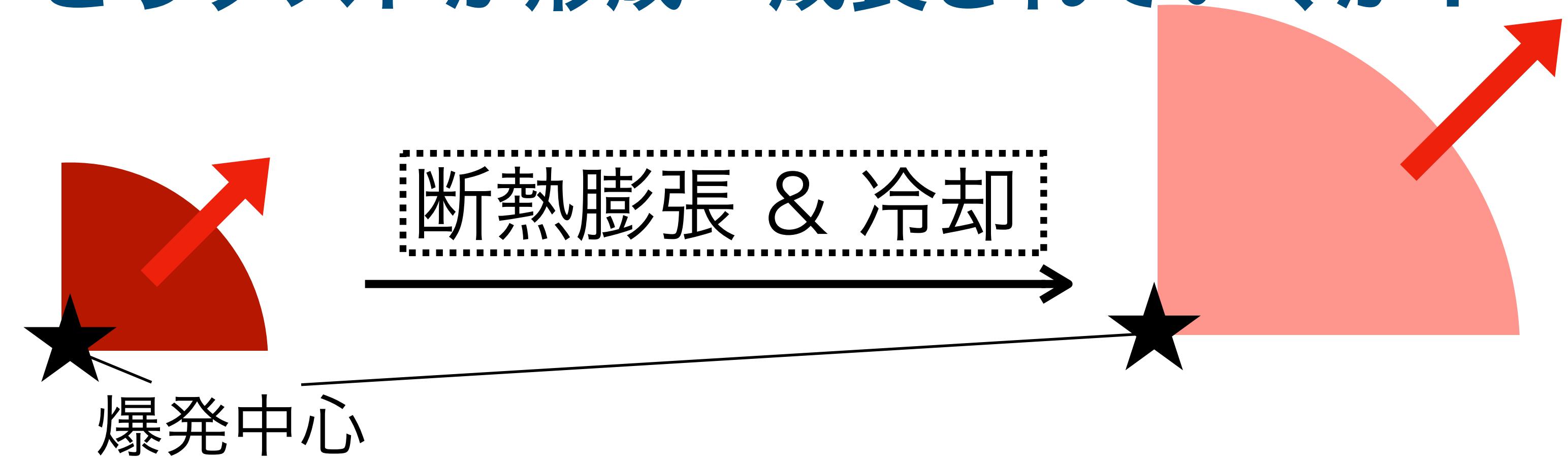
# Introduction: 理論・観測の齟齬



## Simulation

FSNからのエジェクタは、膨張していく際にどう冷却して、どうダストが形成・成長していくか？<sup>14</sup>

### Setup



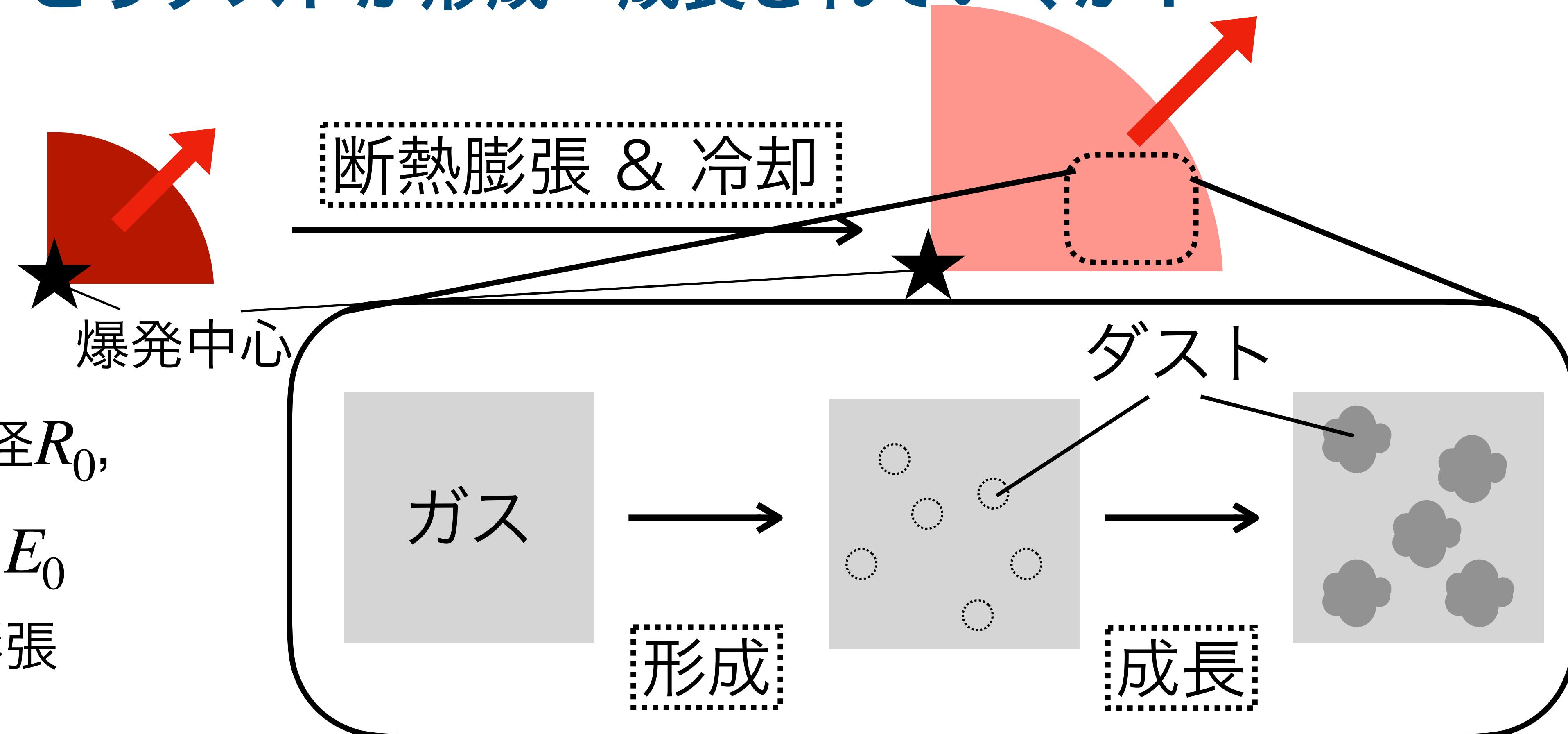
冷却進化:

- 質量 $M$ , 初期半径 $R_0$ ,
- 爆発エネルギー $E_0$
- 一様球の断熱膨張

## Simulation

# FSNからのエジェクタは、膨張していく際にどう冷却して、どうダストが形成・成長していくか？<sup>15</sup>

## Setup

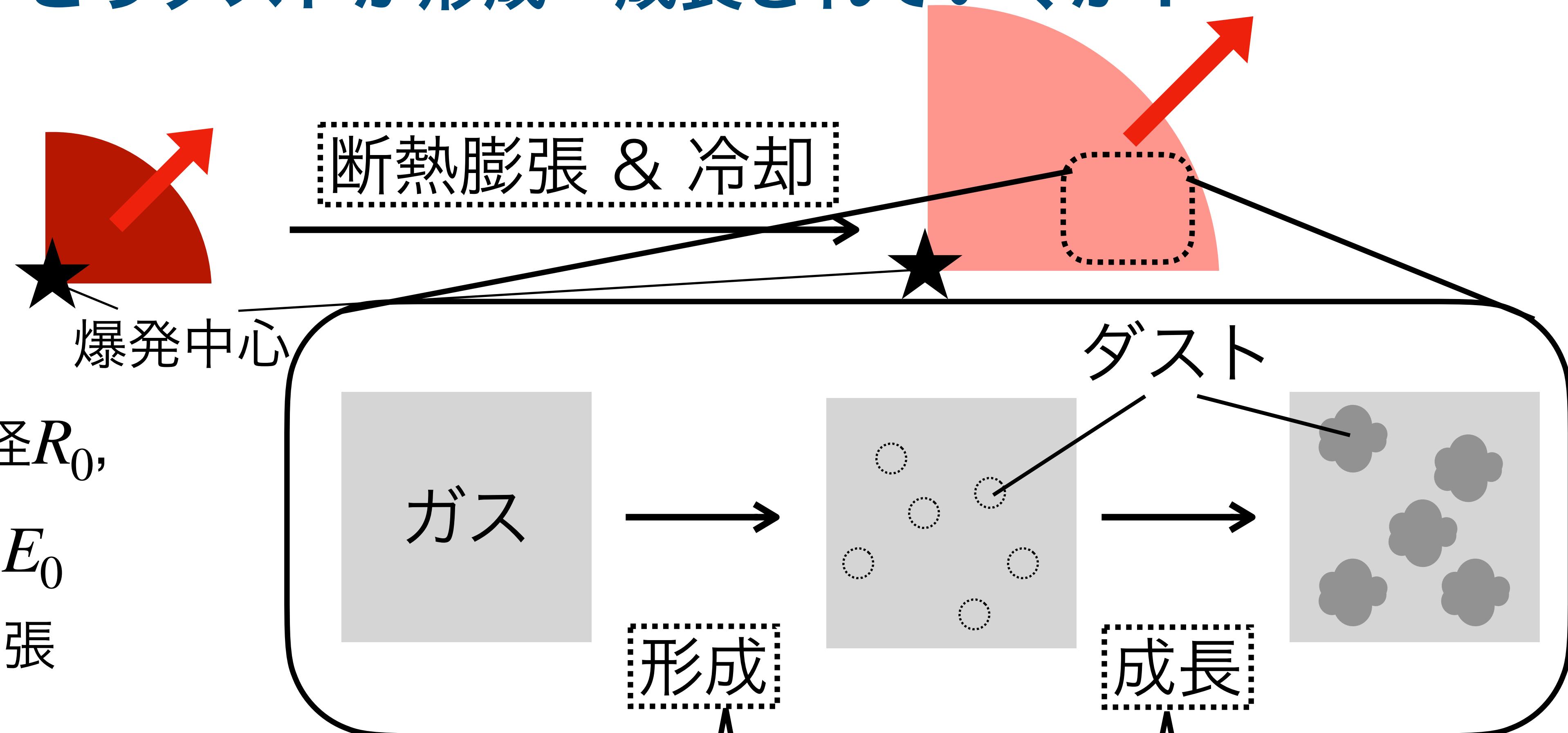


(Yamamoto & Hasegawa77,  
Nozawa+03)

## Simulation

FSNからのエジェクタは、膨張していく際にどう冷却して、どうダストが形成・成長していくか？<sup>16</sup>

### Setup



冷却進化:

- ・質量 $M$ , 初期半径 $R_0$ ,
- 爆発エネルギー $E_0$
- ・一様球の断熱膨張

形成 & 成長:

- ・核形成成長モデル  
(Yamamoto & Hasegawa77,  
Nozawa+03)

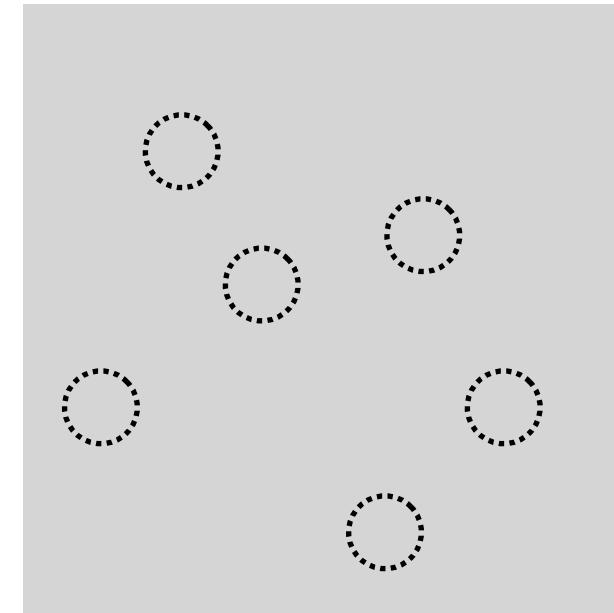
ダストの核が  
いくつできるか

ダストの核が  
どれくらい成長するか

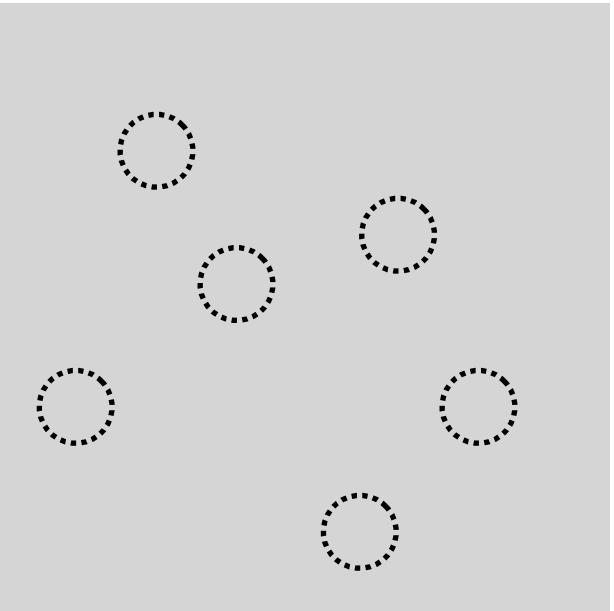
# Method: 核形成成長モデル



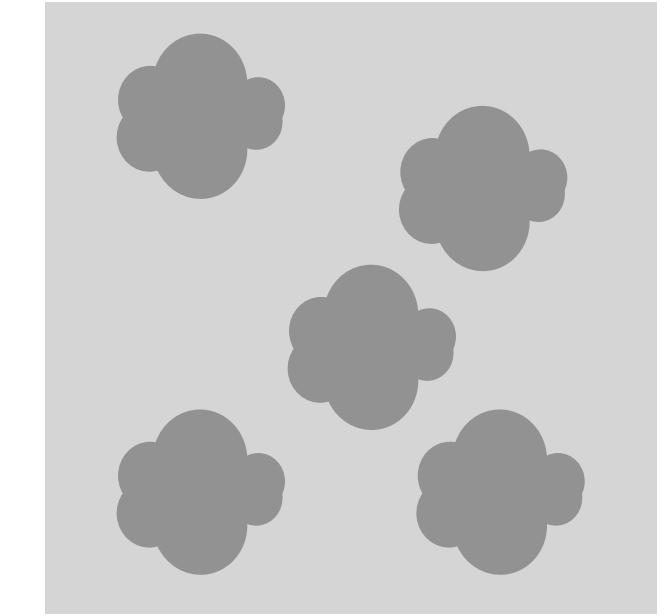
形成



⋮



成長



$$\text{核生成率 } J_s = J_s(\rho, T, \dots) [\# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}]$$

→ 何個安定な核ができるか？

$$\text{ダスト成長率 } dr_d/dt [\text{cm s}^{-1}] \propto \rho v_{\text{th}}(T)$$

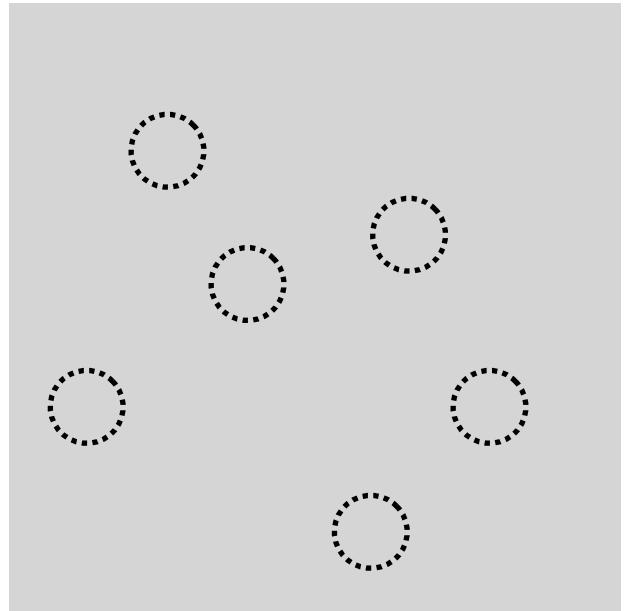
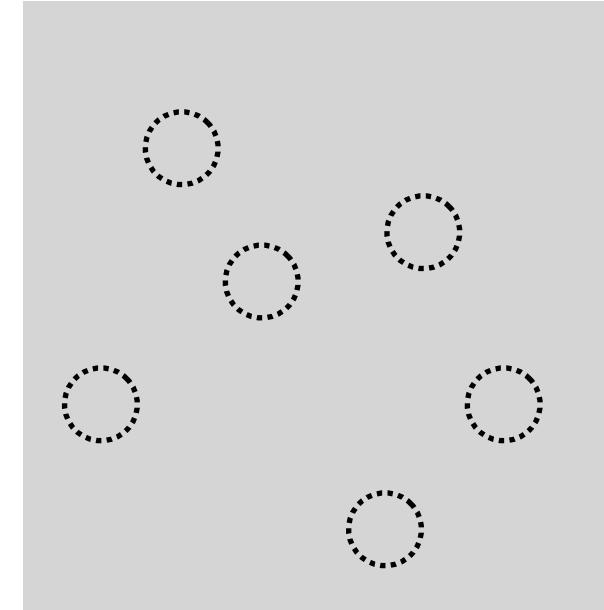
→ 核がどれくらい成長するか？

- 核生成率は温度・密度で決まる & 周囲にたくさん原子 (数密度) → ダスト形成!
- サイズ分布: ガス相の原子が どのサイズで、どれくらいダストになったか？

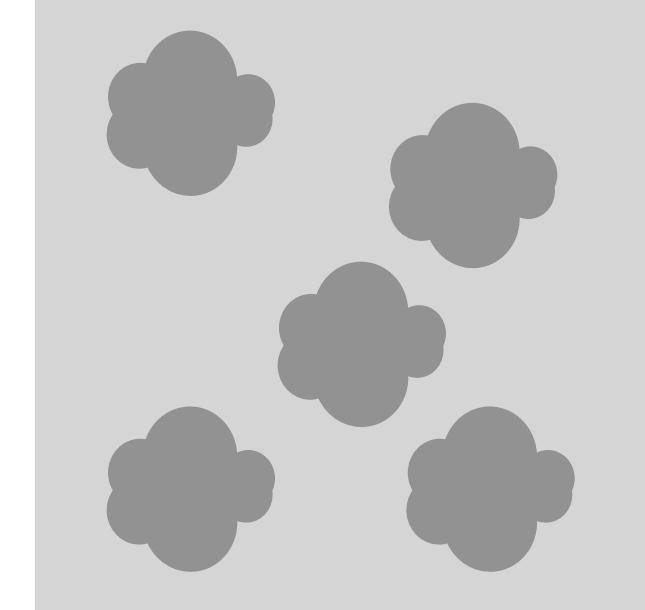
# Method: 核形成成長モデル



形成  
→



成長  
→



$$\text{核生成率 } J_s = J_s(\rho, T, \dots) [\# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}]$$

→ 何個安定な核ができるか？

$$\text{ダスト成長率 } dr_d/dt [\text{cm s}^{-1}] \propto \rho v_{\text{th}}(T)$$

→ 核がどれくらい成長するか？

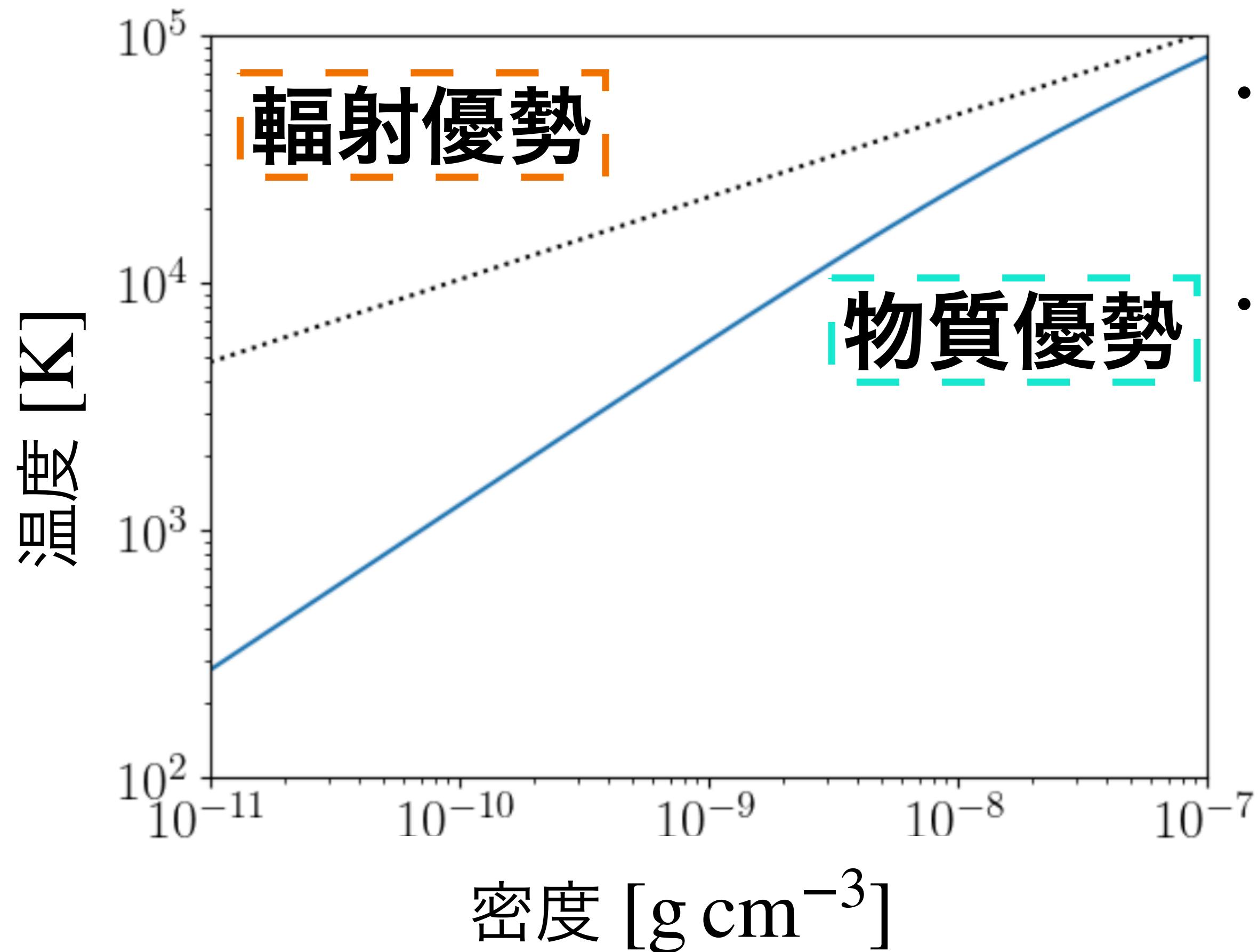
- 核生成率は温度・密度で決まる & 周囲にたくさん原子 (数密度) → ダスト形成!
- サイズ分布: ガス相の原子が どのサイズで、どれくらいダストになったか？

ダストに使える原子の数  
は限られている！

→ 原子数保存の式

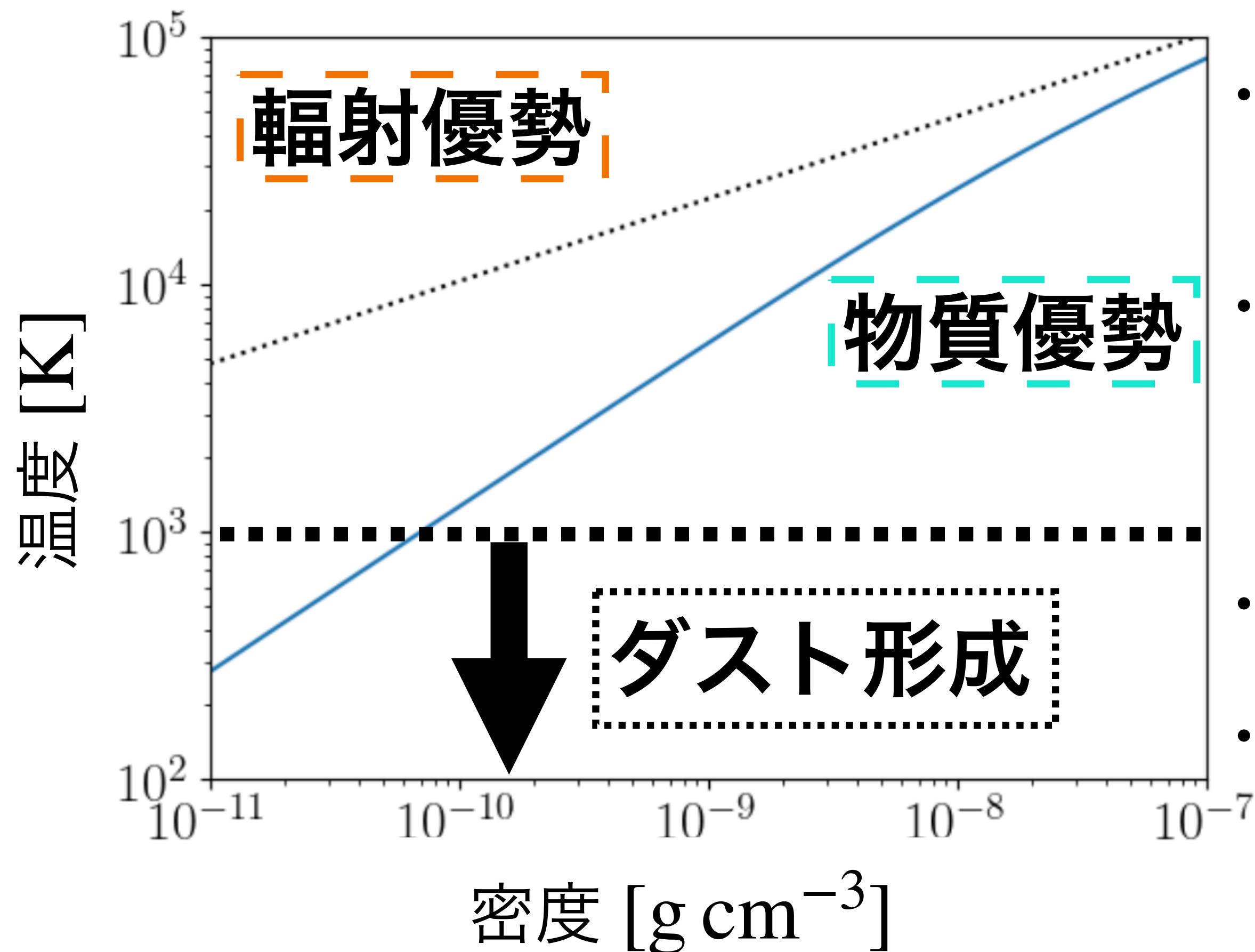
$$1 - \frac{c_{1j}(t)}{\tilde{c}_{1j}(t)} = 1 - Y_{1j} = \int_{t_e}^t \frac{J_j(t')}{\tilde{c}_{1j}(t')} \frac{4\pi}{3\Omega_j} r_j^3(t, t') dt',$$

# Result: エジェクタ熱進化



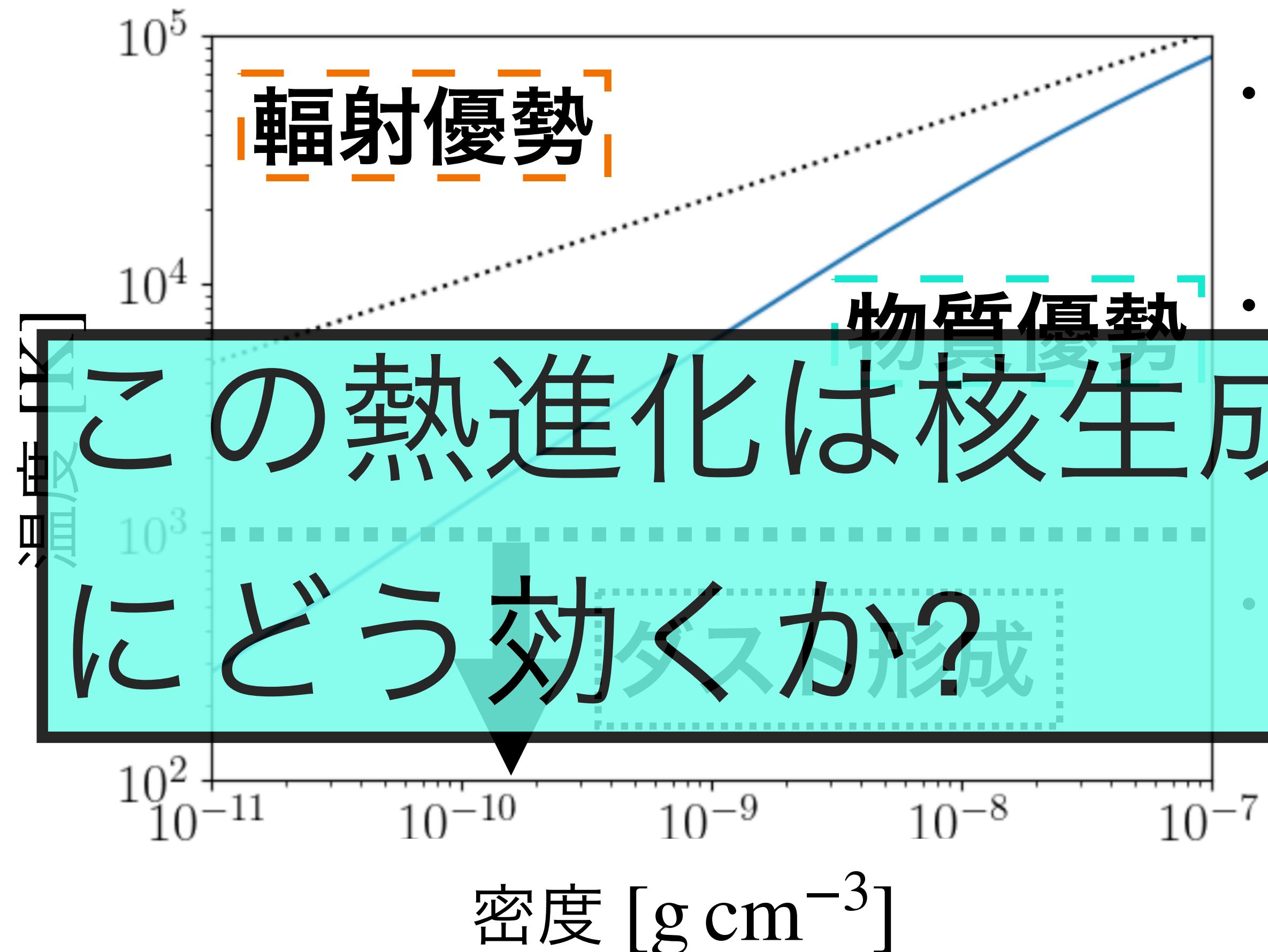
- パラメータ:  $E_0 = 10^{48} \text{ erg}$ ,  $M = 0.03M_\odot$  (FSN Cand. De+24)
- 低エネルギー爆発  $\rightarrow$  物質優勢

# Result: エジェクタ熱進化



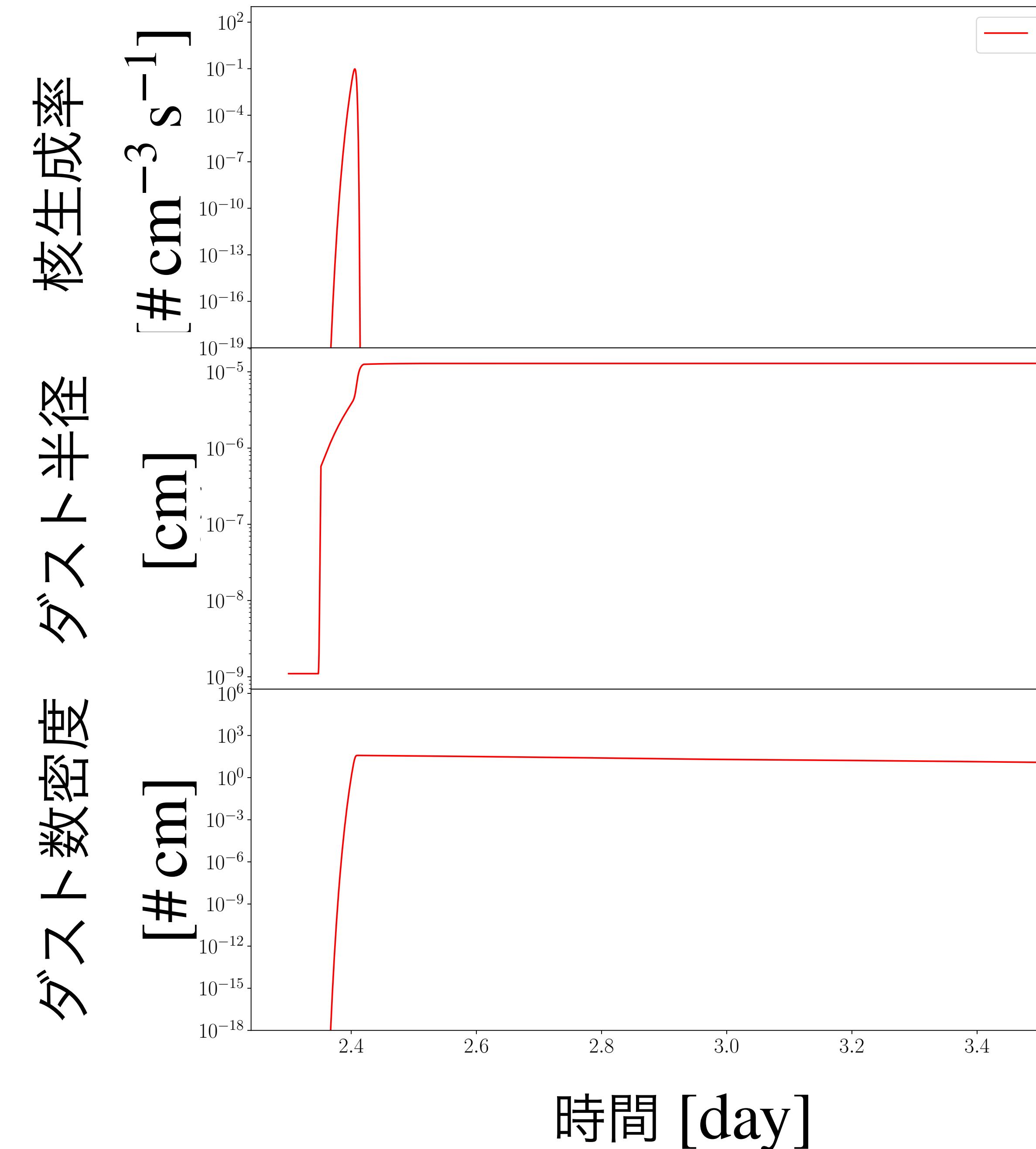
- パラメータ:  $E_0 = 10^{48}$  erg,  $M = 0.03M_\odot$  (FSN Cand. De+24)
- 低エネルギー爆発  $\rightarrow$  物質優勢  
 $\rightarrow$  ダスト形成温度 ( $\sim 1000$  K) 密度  $\uparrow$   
 $\rightarrow$  ダスト形成に有利!
- 通常SN: 輻射優勢
- 水素外層のような metal-poor なエジェクタでもダストが作れるか?

# Result: エジェクタ熱進化



- パラメータ:  $E_0 = 10^{48}$  erg,  $M = 0.03M_\odot$  (FSN Cand. De+24)
- 低エネルギー爆発  $\rightarrow$  物質優勢
- 通常SN: 輻射優勢

# Result: 核形成成長モデル

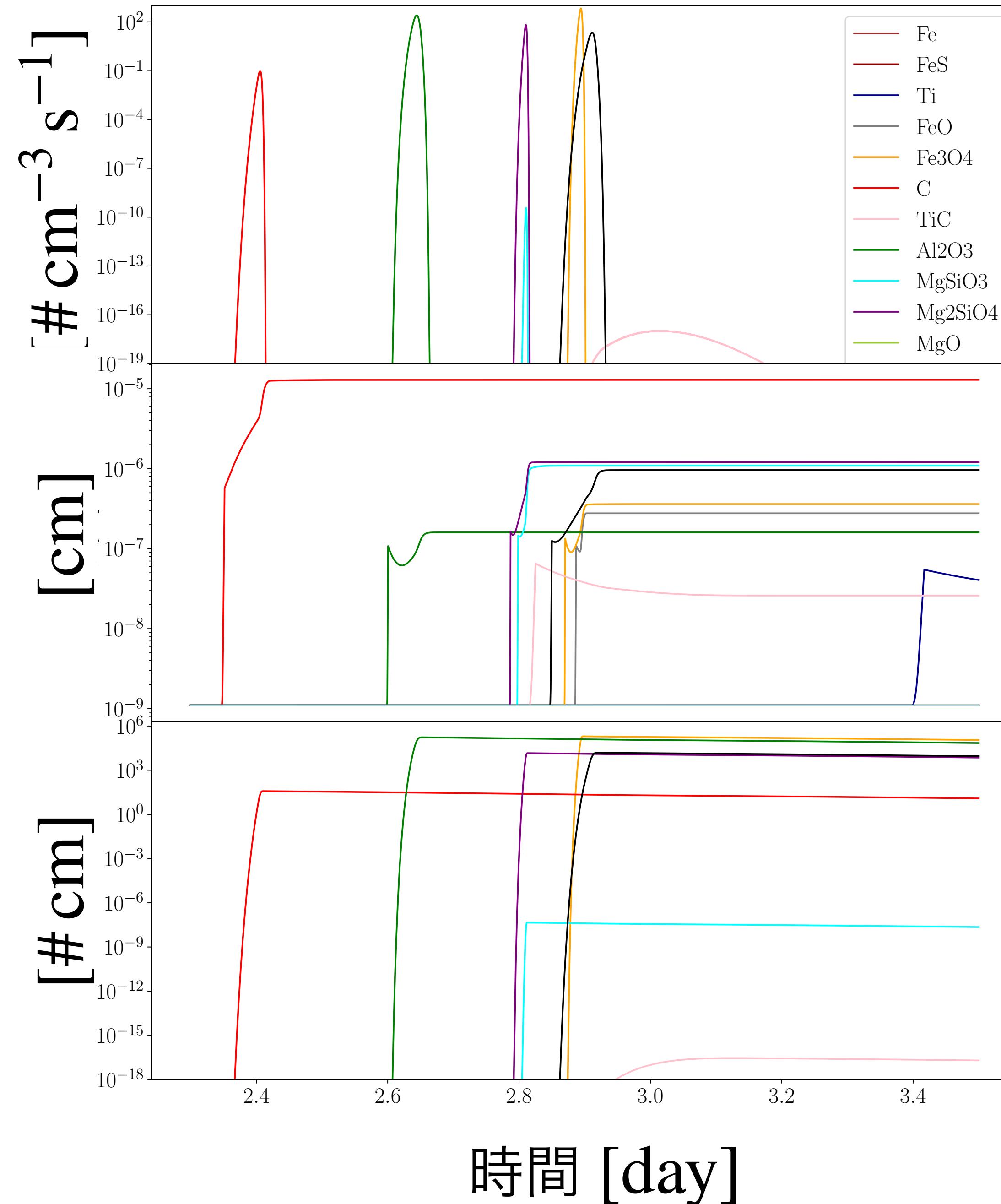


C

- 2.4 day で核形成
- 即座にダスト形成・成長終了
- 最終ダスト半径  $\sim 10^{-5} \text{ cm}$
- 最終ダスト数密度  $\sim 12 [\# \text{cm}^{-3}]$

# Result: 核形成成長モデル

核生成率  
ダスト半径  
ダスト数密度

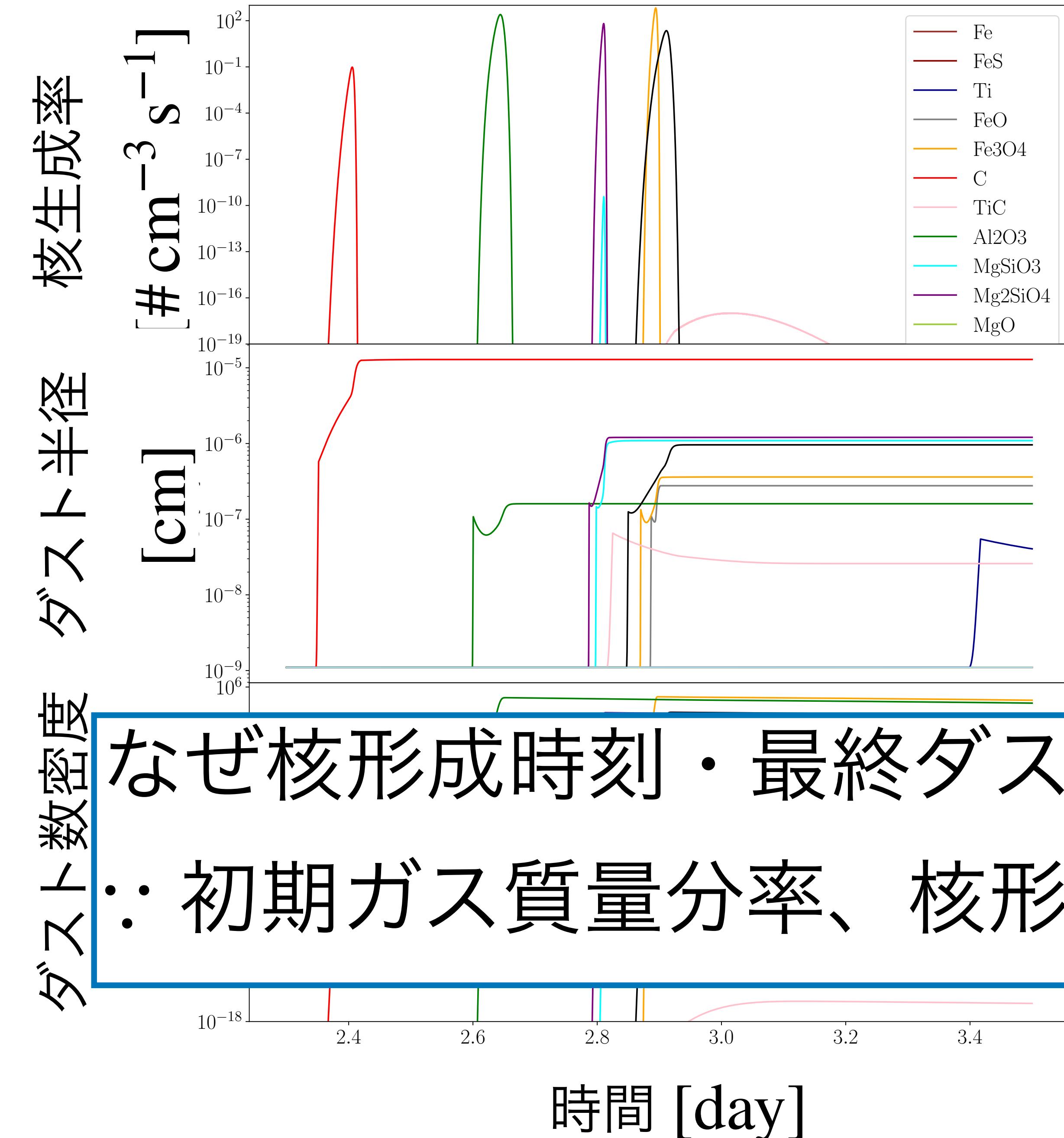


- C
- 2.4 day で核形成
  - 即座にダスト形成・成長終了
  - 最終ダスト半径  $\sim 10^{-5}$  cm
  - 最終ダスト数密度  $\sim 12$  [ $\# \text{cm}^{-3}$ ]

—	Fe	—	TiC
—	FeS	—	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
—	Ti	—	MgSiO <sub>3</sub>
—	FeO	—	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
—	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	MgO
—	C	—	

- C  $\rightarrow$  Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\rightarrow$  MgSiO<sub>3</sub> & MgSiO<sub>2</sub>  
 $\rightarrow$  Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>  $\rightarrow$  SiO<sub>2</sub>  $\rightarrow$  TiC

# Result: 核形成成長モデル



- C
- 2.4 day で核形成
  - 即座にダスト形成・成長終了
  - 最終ダスト半径  $\sim 10^{-5} \text{ cm}$
  - 最終ダスト数密度  $\sim 12 [\# \text{cm}^{-3}]$

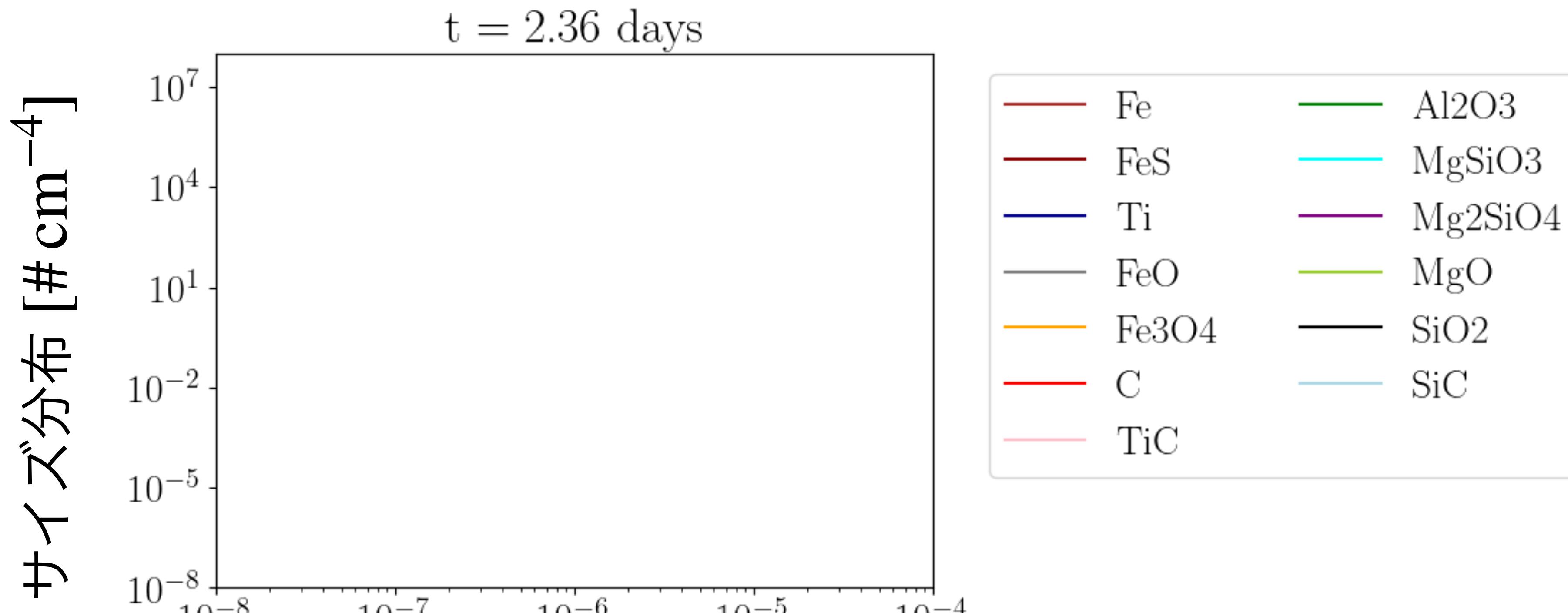
— Fe — TiC  
 — FeS — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 — Ti — MgSiO<sub>3</sub>

なぜ核形成時刻・最終ダスト半径&数密度がバラバラ？

∴ 初期ガス質量分率、核形成のしやすさ (物性値)

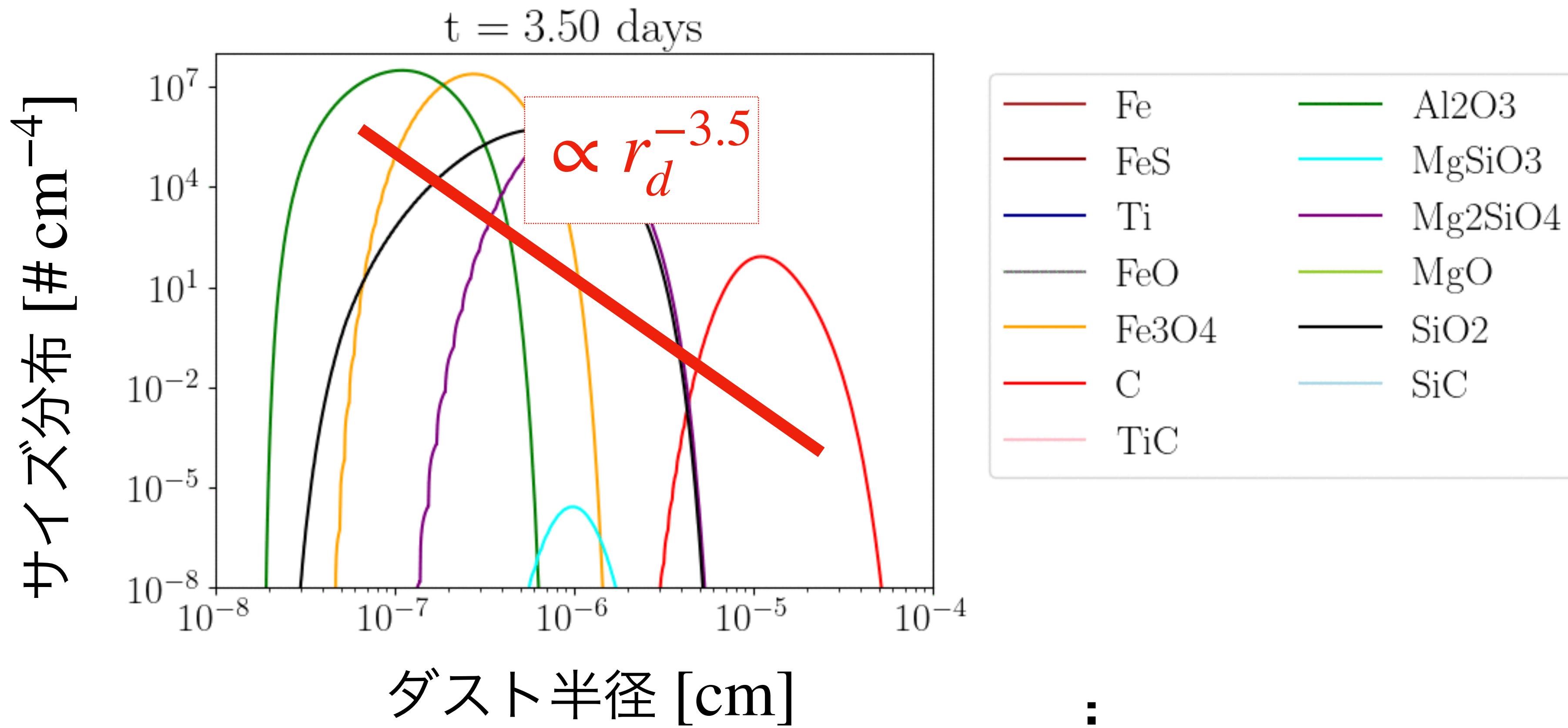
$\rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2 \rightarrow \text{TiC}$

# Result: ダストサイズ分布の時間発展



- 核形成:  $\sim 10^{-8}$ cm のダストが出現
- ダストが成長  $\rightarrow$  サイズ分布が右に移動
- 周りのガス相原子が枯渇  $\rightarrow$  ダスト成長停止

# Result: ダストサイズ分布の時間発展



- ・核形成:  $\sim 10^{-8}$ cm のダストが出現
- ・ダストが成長  $\rightarrow$  サイズ分布が右に移動
- ・周りのガス相原子が枯渇  $\rightarrow$  ダスト成長停止
- ・単一 power-law  $\times$
- ・単一ダスト種  $\times$

# Summary

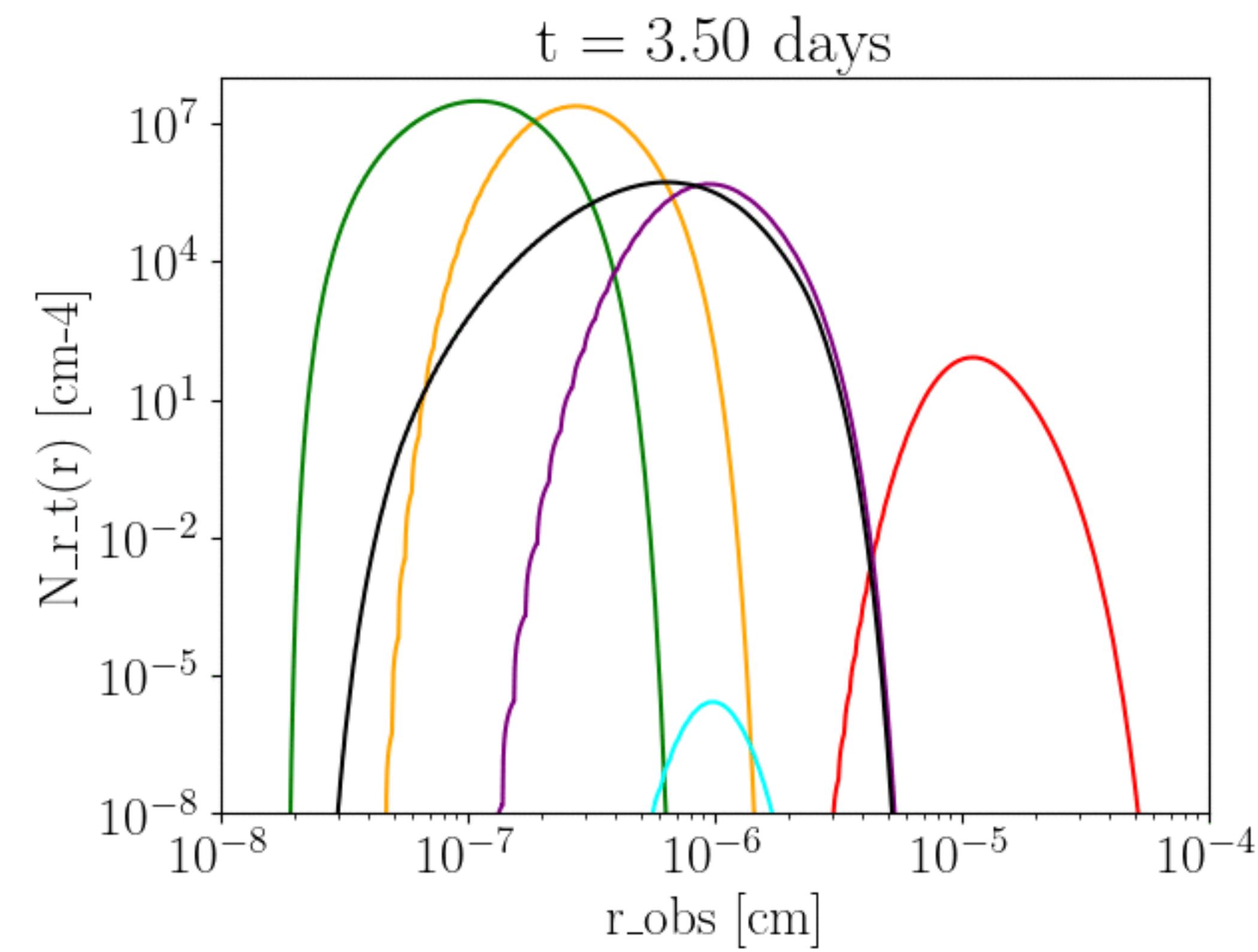
Motivation,  
Simulation

Result

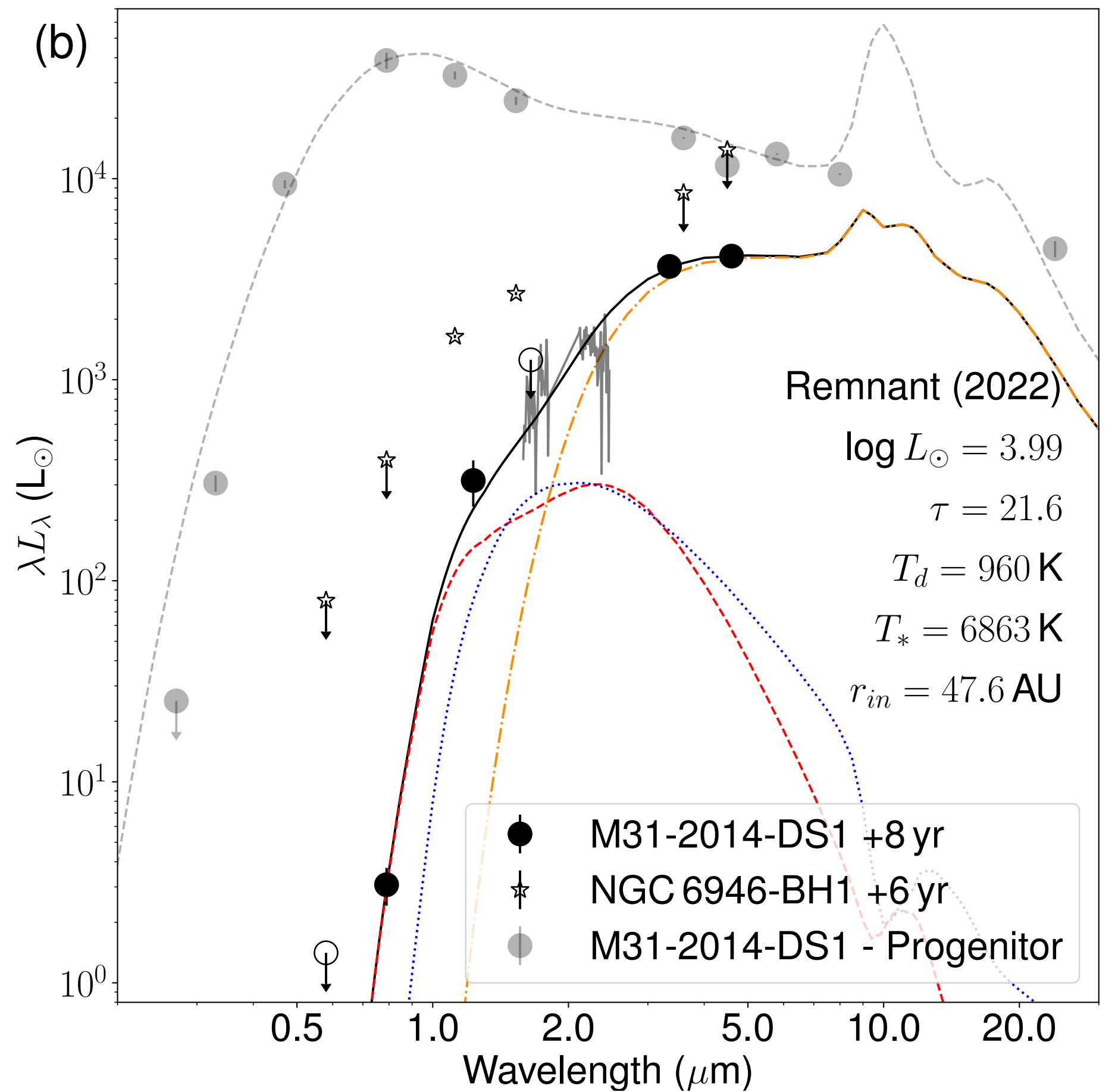
Future Task

FSN のダストによる IR 光度曲線: BH 形成のトレーサー  
現状: FSN での時間依存ダスト形成理論モデルの要求  
FSNを再現したワンゾーンエジェクタ熱進化 & 核形成モデル

1. 複数種 (C, Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, ...) の  
ダスト形成
  2. power-law  $\times$
- one-zone  $\rightarrow$  multi-zone
  - サイズ分布 & ダスト組成  $\rightarrow$   
opacity 計算
  - opacity  $\rightarrow$  IR 光度曲線, SED 作
  - 計算コードのオープンソース化

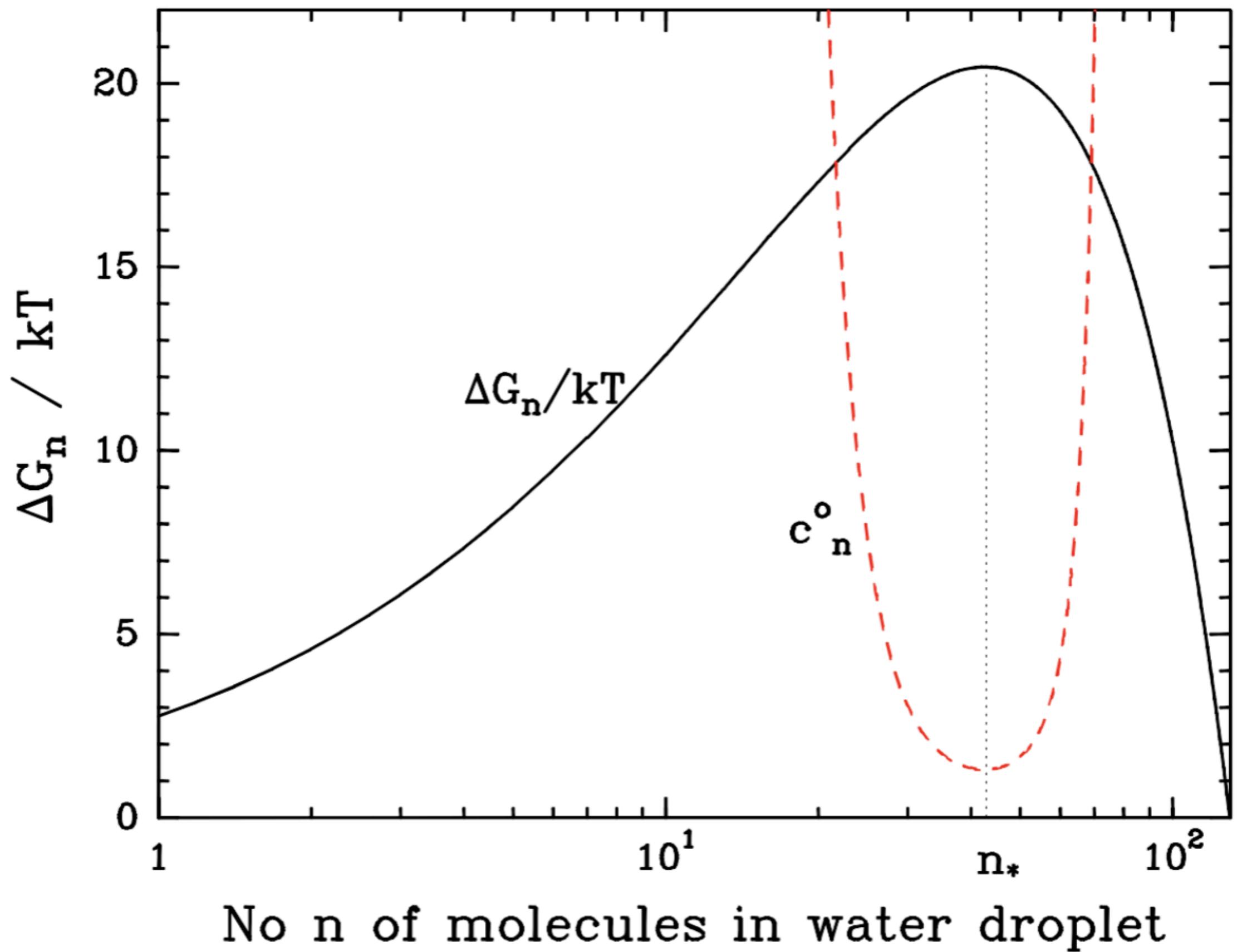


# Backup: 失敗型超新星 SED



- 消失後の M31-2014-DS1 SED

# Backup: 核生成率



- $J_s \propto \exp(-\Delta G/k_B T)$
- ポテンシャルの壁が低いほどいっぱい核ができる