

# 宇宙内ダストの 非晶質シリケートの 低温結晶化モデル

田中 今日子、山本哲生(北大)、木村宏(神戸大)



# 非晶質シリケートの結晶化問題

- 彗星中の結晶シリケートの発見  
高い結晶化率 0.1-0.7  
(eg. Campins and Ryan 1989)
- 原始惑星系円盤  
(eg. Honda et al. 2003, Okamoto et al. 2004)
- 結晶質シリケートはLuminosity, disk mass accretion rate とは相関なし  
⇒ 中心星付近での結晶化+外側への輸送では説明できない  
(Watson et al. 2009)
- 晩期星(AGB星)の周りのダストシェル  
低温領域(<300K)で結晶質を発見 (Waters et al. 1996, Molster 1999)
- ULIRGs (ultraluminous infrared galaxies)でも低温領域で観測  
(Spoon et al. 2006)

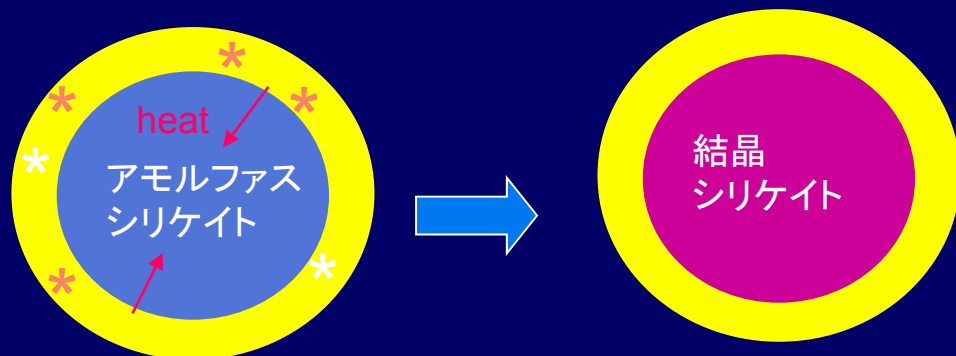
低温領域で結晶シリケートが  
何故存在？

低温結晶化プロセスの必要性

# 化学反応熱による低温結晶化

(Yamamoto & Chigai 2005, Yamamoto et al.)

- 紫外線、宇宙線照射  
⇒ラジカル分子が生成、凍結
- 温度上昇又は反応分子数の増加⇒反応が引き起こされる
- 温度上昇が加速
- シリケートの結晶化



# 化学反応熱による低温結晶化

(Yamamoto & Chigai 2005, Yamamoto et al.)

□ 紫外線 宇宙線

⇒ラジ

□ 温度

増加⇒

□ 温度

□ シリケ

星間分子雲



ケイト

CH<sub>3</sub>  
OH

これまでの研究の問題点:

- 結晶化時間  $\propto \exp(E/kT)$
  - T > 融点の場合でも結晶化
  - 活性化エネルギーE: 求めている
- ↓ 改良

本研究:

低温結晶化過程のモデル化  
⇒ 結晶化条件

結晶  
シリケート



# シリケートの結晶化実験

実験1: アモルファスフォルステライトの結晶化:  
~1000K

(Hollenbeck and Nuth 1999, Fabian et al. 2000, Kamitsuji et al. 2005)

実験2: アモルファスフォルステライト

+ アモルファスカーボンの結晶化: 873K

(Kaito et al. 2007a)

① 結晶化における活性化エネルギーを決定

実験3: アモルファスフォルステライト

+ アモルファスカーボン

(+メタンガス圧下)の結晶化: 常温

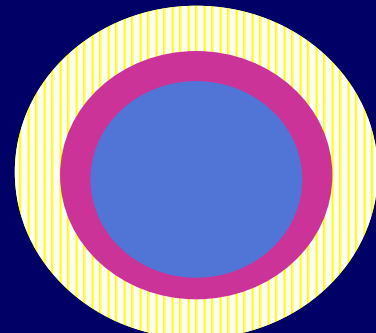
(Kaito et al. 2007b)



結晶質シリケート

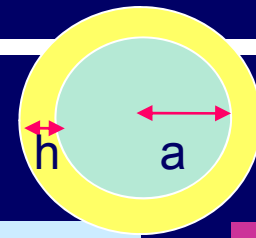


結晶質シリケート



② 実験の再現と統一的な理解、結晶化条件

# 結晶化モデル



## 粒子の熱進化

空気との熱交換

輻射

潜熱

$$\frac{4\pi}{3} (a+h)^3 \rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{4\pi}{3} \left[ (a+h)^3 - a^3 \right] \varepsilon - \Lambda_{air} - \Lambda_{rad} + H_c + H_{si}$$

$$\varepsilon = -\frac{dn_A}{dt} E_r = \frac{E_r n_{A0}}{\tau} \exp\left\{-\frac{t}{\tau}\right\}$$

: マントル中の熱発生率

$\tau$  反応時間、 $E_r$  反応熱  
 $n_{A0}$  反応分子初期数密度

## 結晶成長

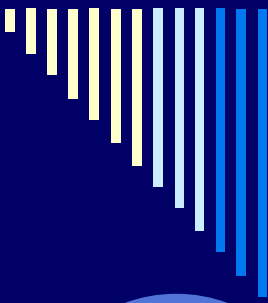
パラメータ

$$\frac{da_c}{dt} = a_0 v \exp\left\{-\frac{E_c}{kT}\right\} \left(1 - \exp\left\{-\frac{q_c \Delta T}{kT^2}\right\}\right)$$

$$\frac{da_{si}}{dt} = a_0 v \exp\left\{-\frac{E_{si}}{kT}\right\} \left(1 - \exp\left\{-\frac{q_{si} \Delta T}{kT^2}\right\}\right)$$

$E_c$ : アモルファスカーボンの活性化エネルギー  
 $E_{si}$ : アモルファスシリケートの活性化エネルギー

# 実験1: 活性化エネルギーEsiの導出

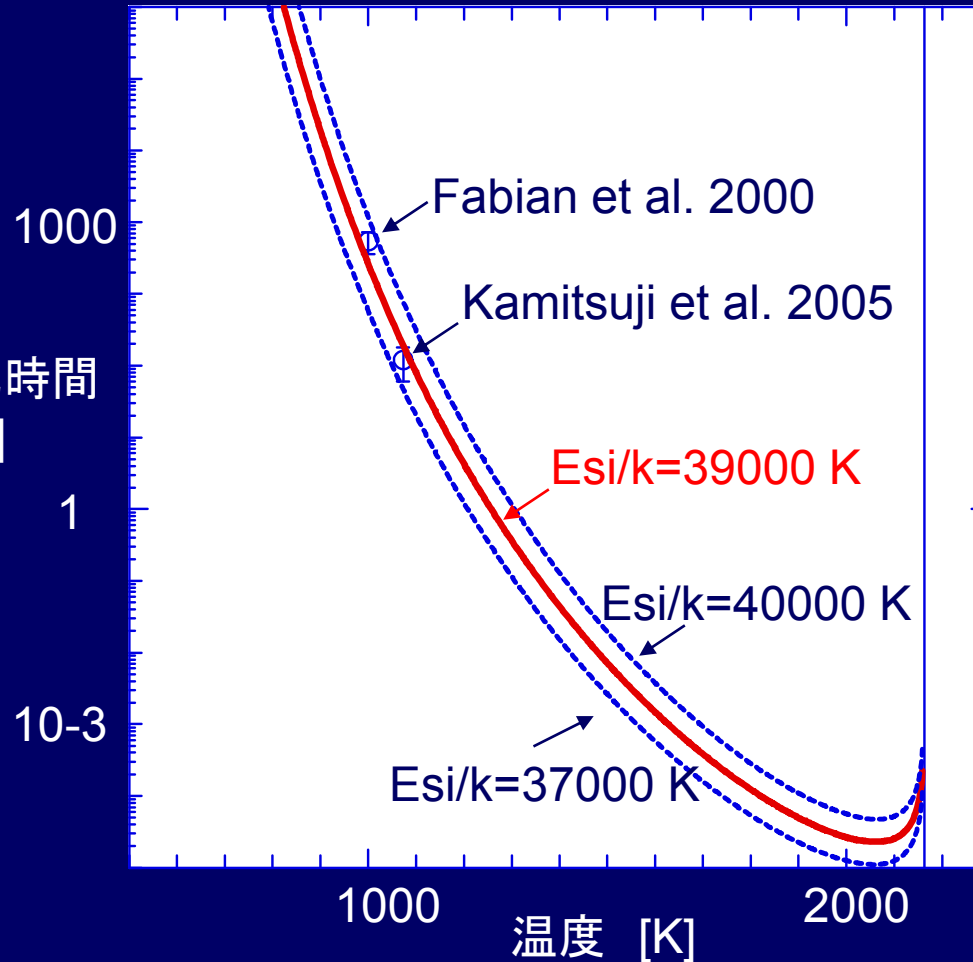


アモルファス  
シリケート



結晶化時間  
[s]

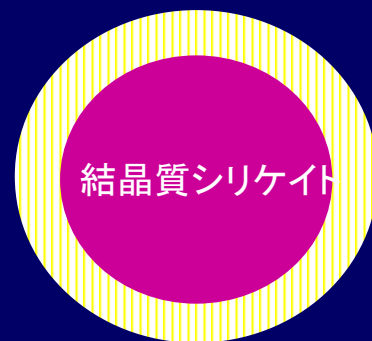
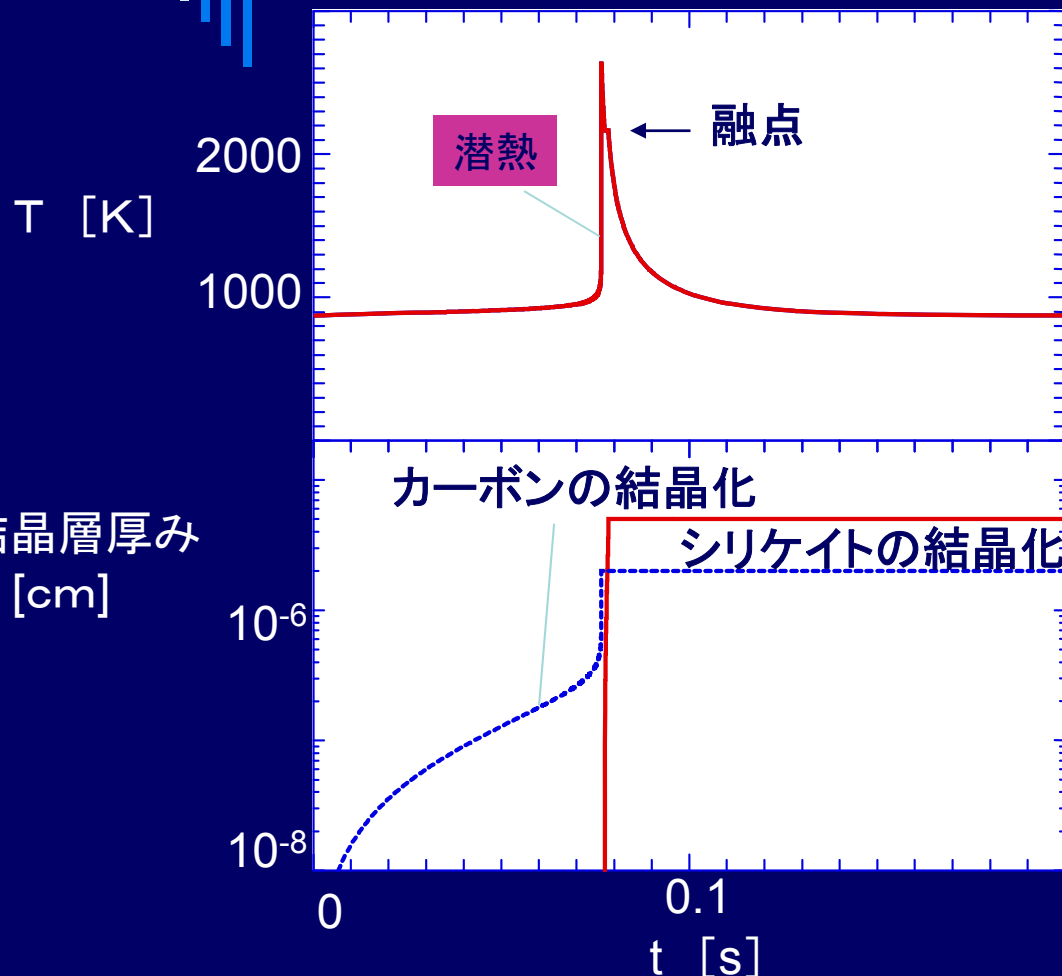
結晶質シリケート



$E_{si}/k=39000$  K  
for solid

$E_{si}/k=23000$  K  
for liquid  
(Tanaka et al. 2007)

# 実験2の再現 : 化学反応なし



Si全体が結晶化

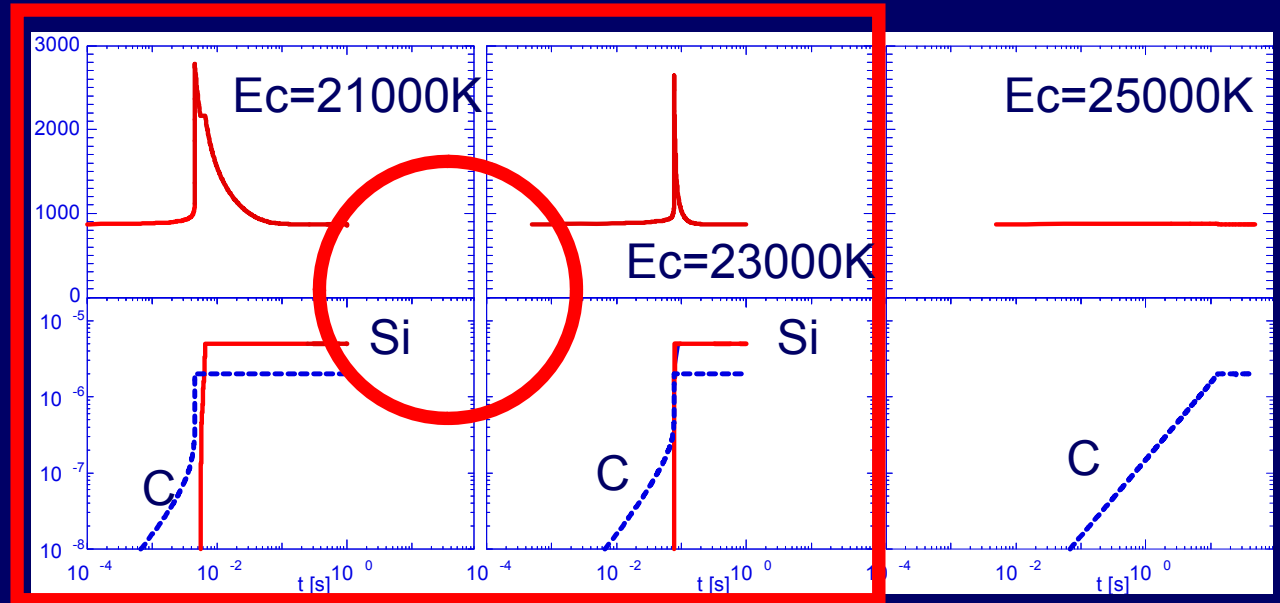
- 初期温度 873K
- ⇒アモルファスカーボンの結晶化
  - ⇒潜熱により温度上昇し融解
  - ⇒融点以下に冷却
  - ⇒アモルファスシリケイトの結晶化



# 実験2: 活性化エネルギー $E_c$ の導出

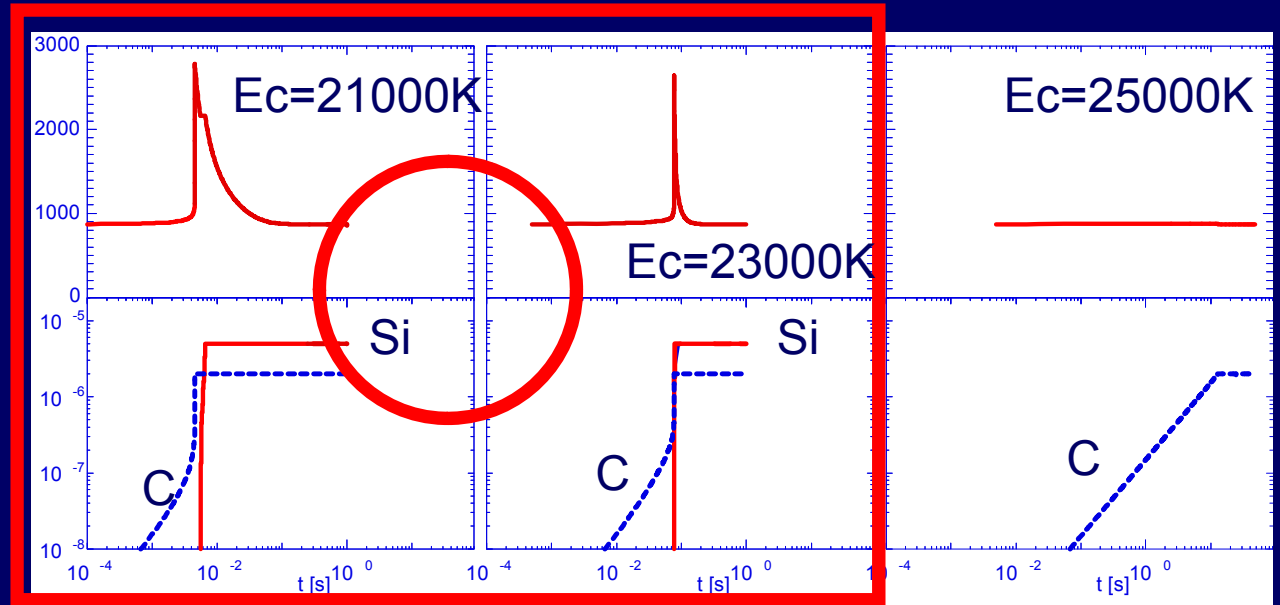
873Kでアモルファス  
CとSiの両方結晶化

773Kでアモルファス  
Si結晶化しない

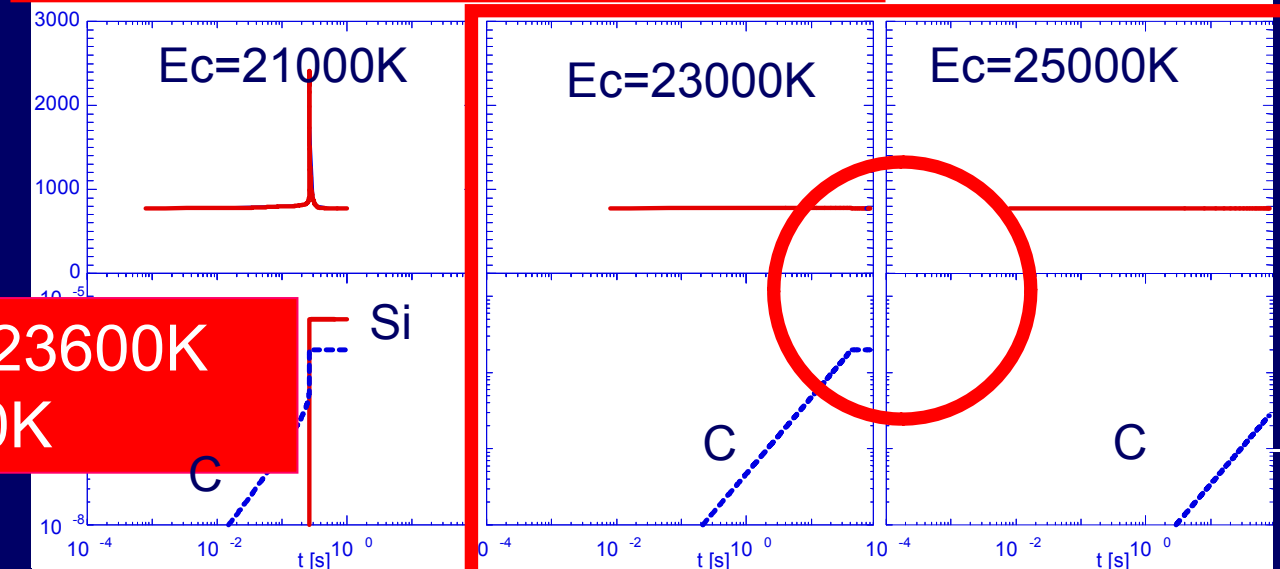


# 実験2: 活性化エネルギー $E_c$ の導出

873Kでアモルファス  
CとSiの両方結晶化

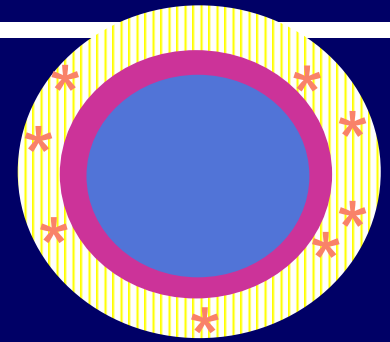


773Kでアモルファス  
Si結晶化しない

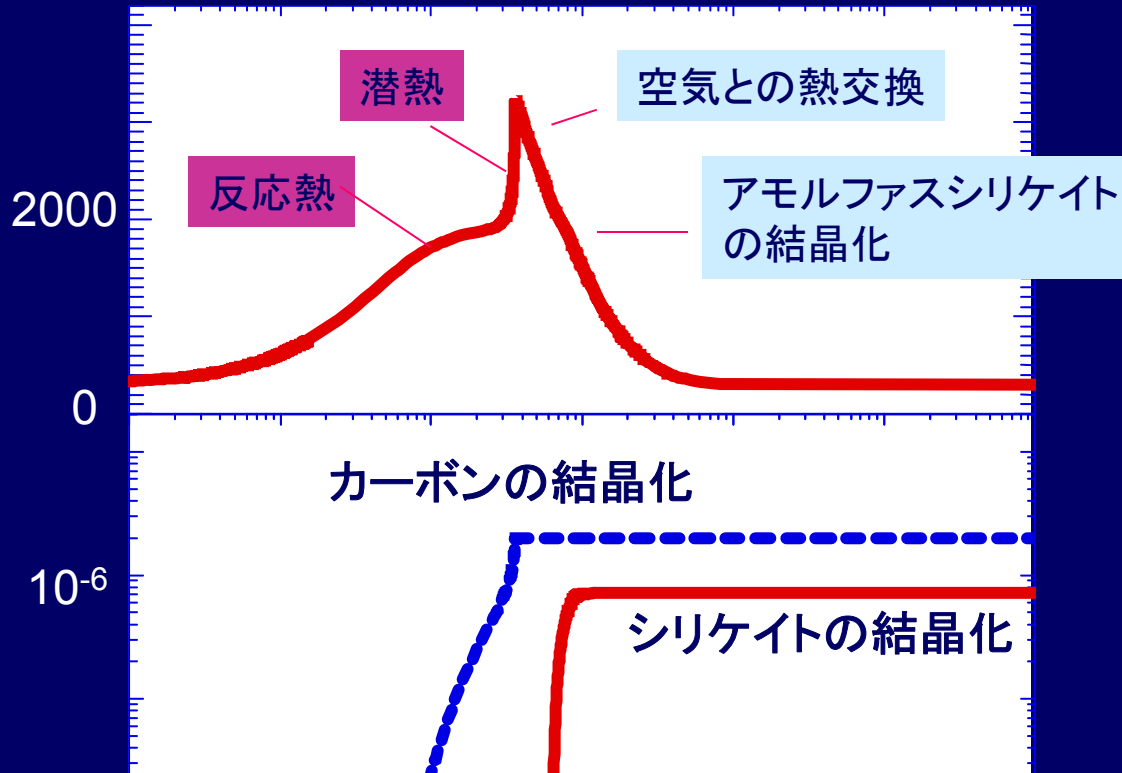


$21300K < E_c < 23600K$   
 $\Rightarrow E_c = 23000K$

# 実験3の再現： 化学反応がある場合



T [K]



$$n_{A0}Er = 10^{27} \text{ Kcm}^{-3}$$

$$\tau = 5 \times 10^{-8} \text{ s}$$

一部のみの結晶化

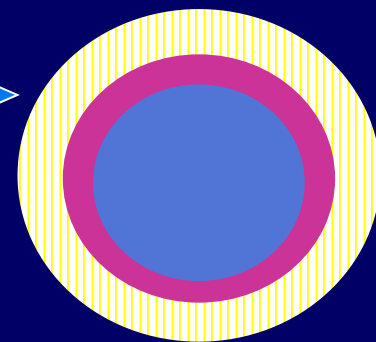
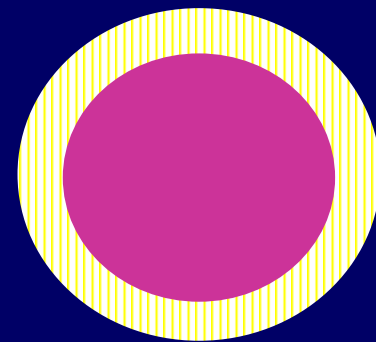
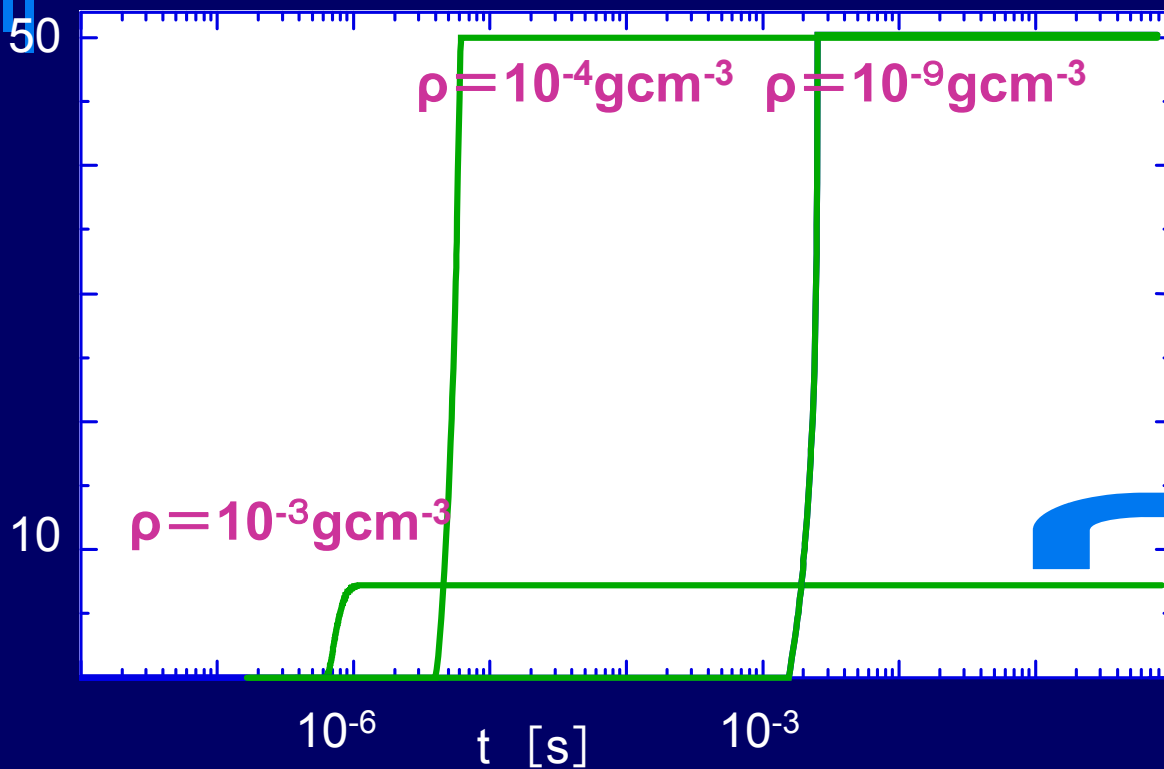
実験で見られる  
結晶層の厚みが  
説明できる！

結晶層の  
厚み[cm]

制約条件： $Q = n_{A0}Er/k > 10^{27} \text{ Kcm}^{-3} \Rightarrow 5\% \text{ 以上の反応分子が必要}$   
 $\tau < 10^{-7} \text{ s}$

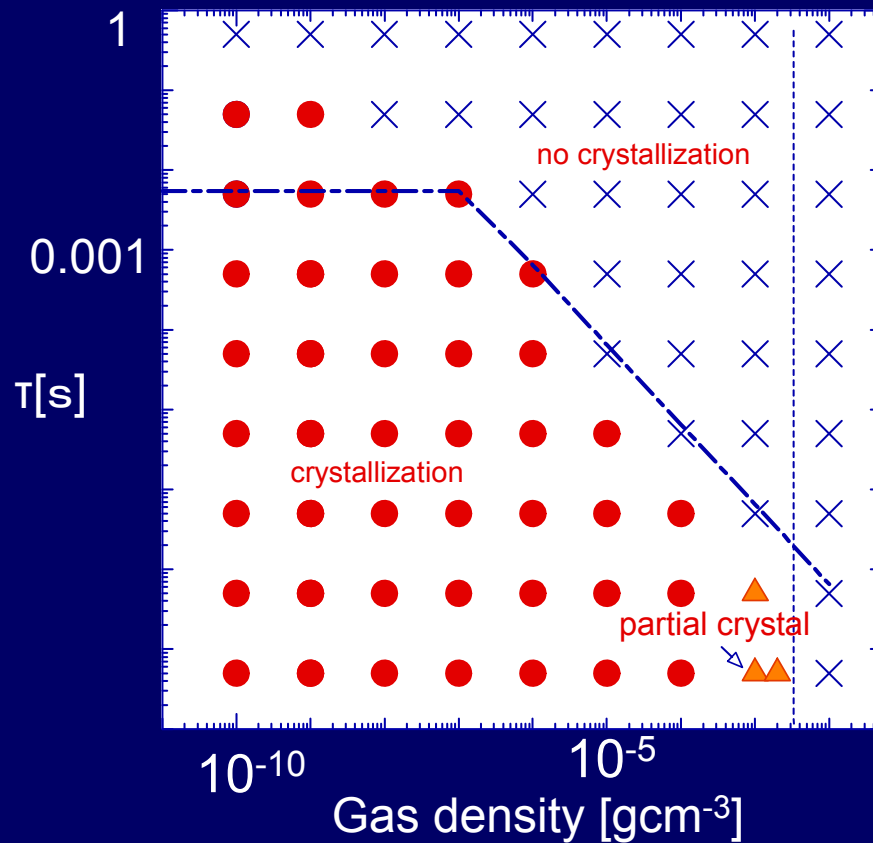
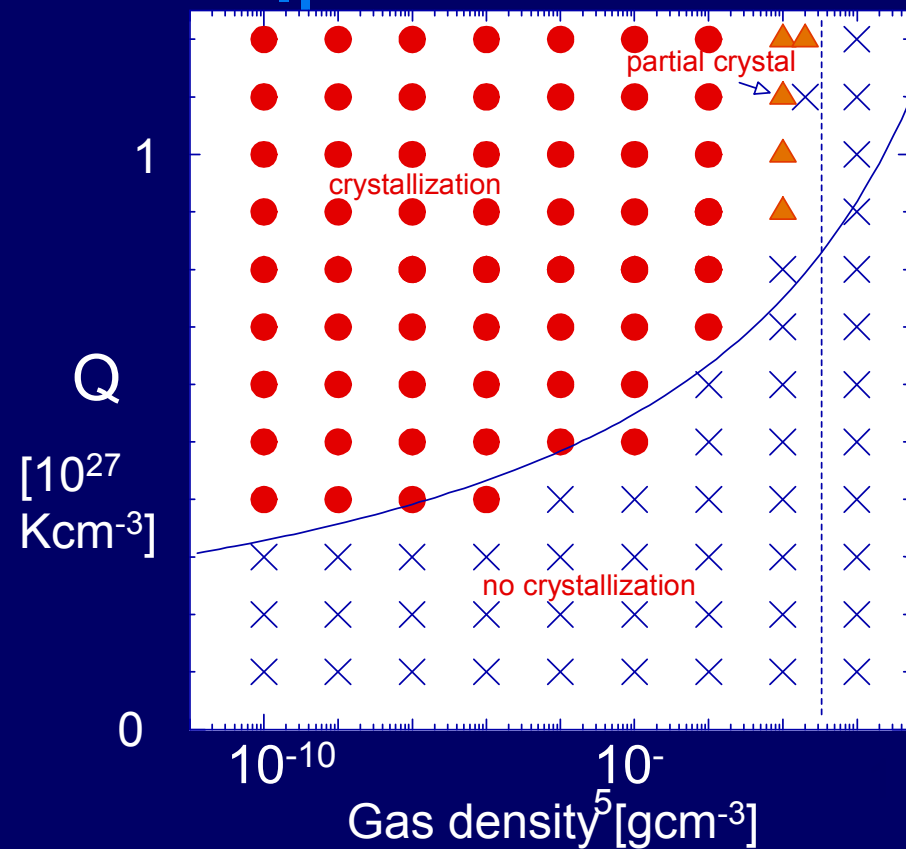
# 空気密度の依存性

結晶層  
の厚み  
[nm]



空気密度が低い  
⇒冷却がゆっくりになり、結晶化しやすくなる

# 結晶化条件

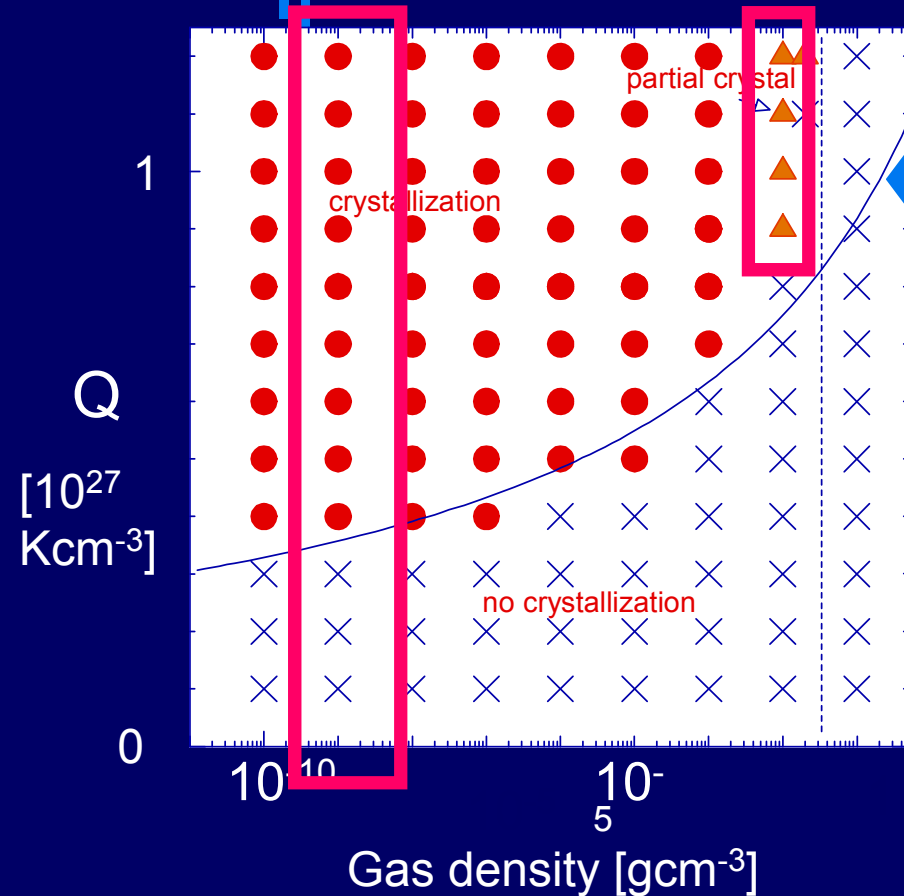


大きいエネルギー密度 $Q$ 、短い反応時間 $\tau$ 、低密度環境  
⇒ アモルファスシリケートが結晶化しやすい

# 議論：エネルギー密度Q

原始惑星系円盤

実験3



ガス密度が大きくなると冷却率が增大  
⇒ 結晶化起こりにくい  
Qmin: 断熱的な温度上昇で説明可能

円盤内で結晶化に必要な加熱条件

$$Q > 3 \times 10^{26} \text{Kcm}^{-3}$$

反応熱=数eV

数%程度ラジカル分子があれば  
結晶化可能

UV照射によりラジカル分子は常に  
生成: 1-10% (Greenberg 1976)

# 議論：反応時間 $\tau$

ガス密度が大  
⇒ 反応時間が小さい必要あり

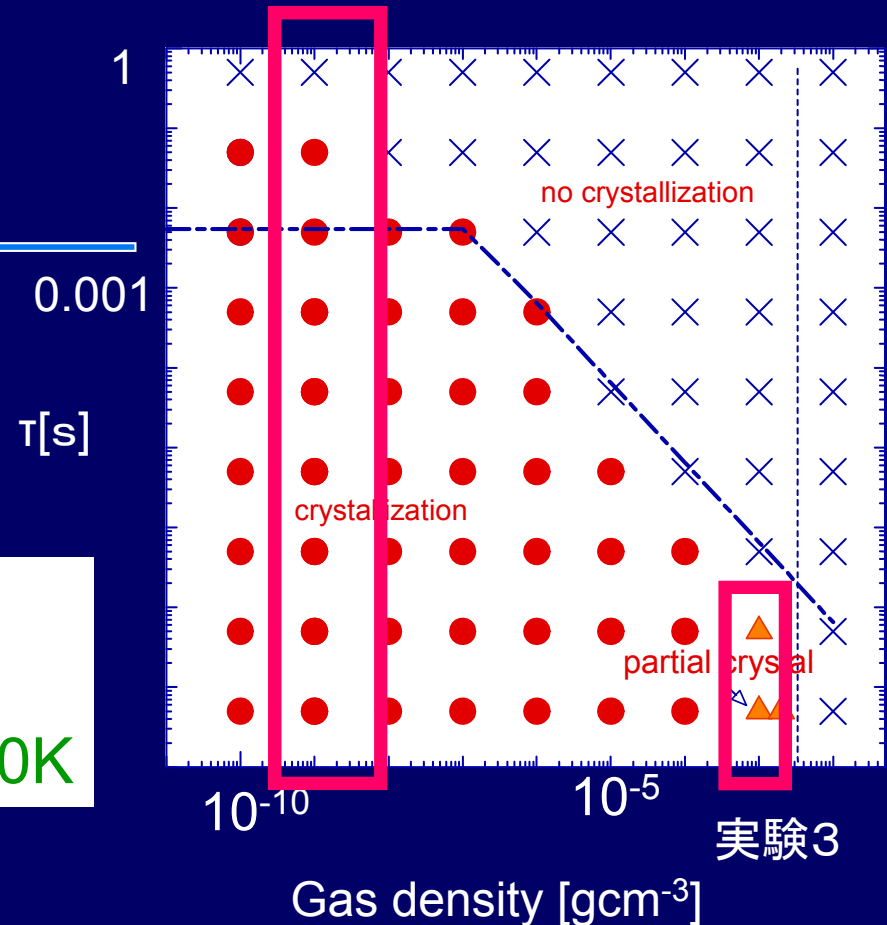
反応時間  $\tau < \tau_{cool}$  : 冷却時間  
のとき結晶化が起こる

円盤内で結晶化に必要な条件:

$$\begin{aligned} \tau &< \tau_{cool} \sim 10^{-1} \text{ s} \\ \tau &= \tau_0 \exp(E_r/kT) \\ \Rightarrow T &\sim 200 \text{ K for } E_r = 5000 \text{ K} \end{aligned}$$

数百K以上で結晶化可能

原始惑星系円盤





## まとめ

- 低温結晶化モデルの構築

  - 過去の結晶化実験を再現

- 結晶化条件: 2つの量で決定

  - 反応分子量と反応熱の積  $Q > Q_{min}$

  - 反応時間  $\tau <$  系の冷却時間

  - ⇒ 反応分子を数%程度含めば結晶化が可能

- 低密度環境では結晶化効率が増大

  - 宇宙のより広い温度環境でシリケート結晶化が可能