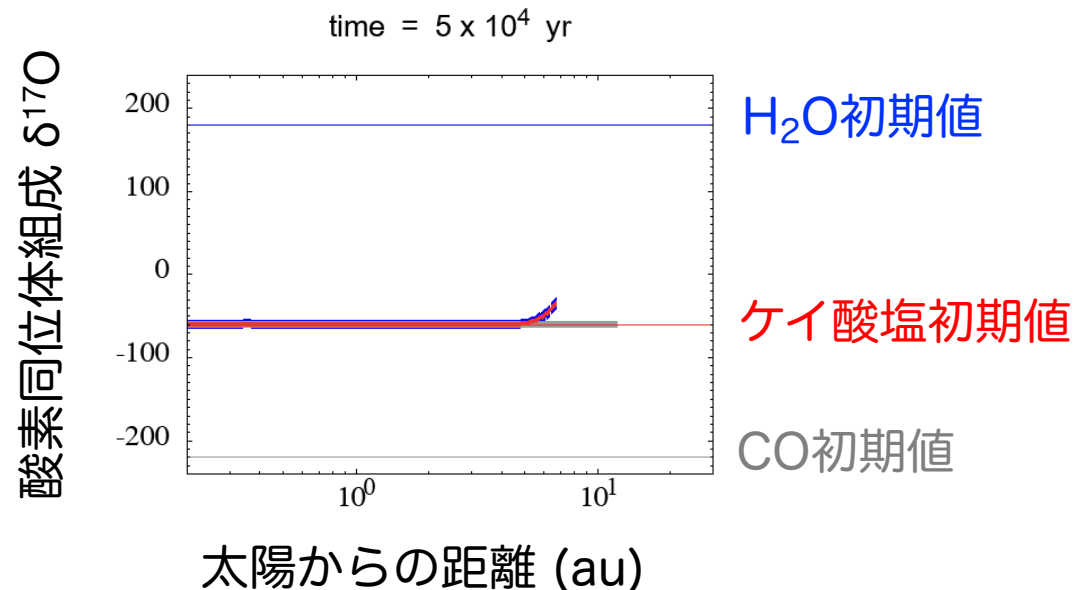
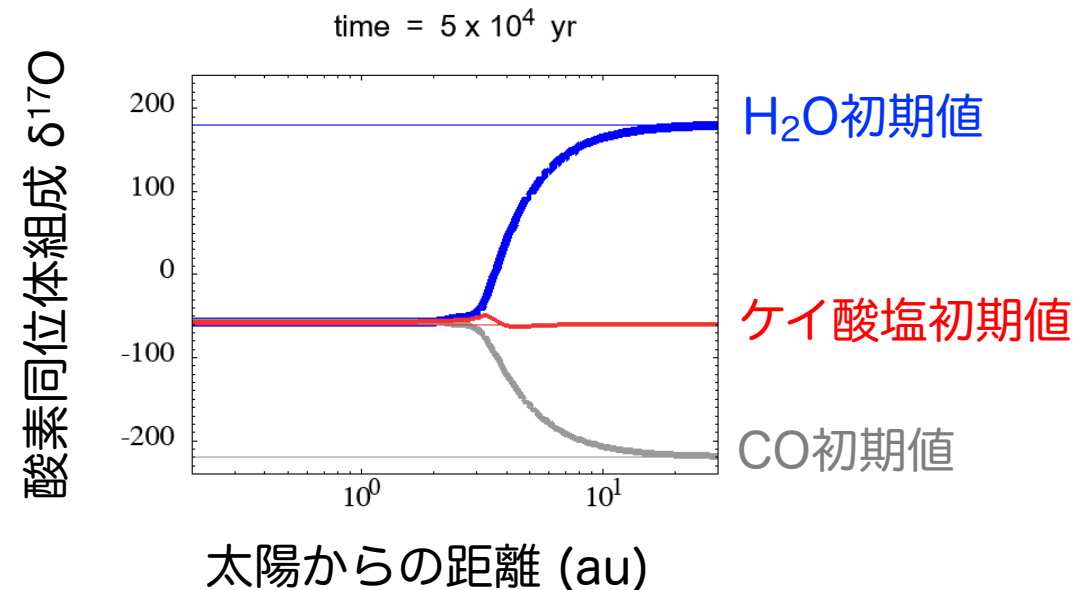


降着半径が小さい場合 ( $r_{c,fin} = 1 \text{ au}$ )



降着半径が大きい場合 ( $r_{c,fin} = 100 \text{ au}$ )



# 原始惑星系円盤における 酸素同位体組成の時空間進化

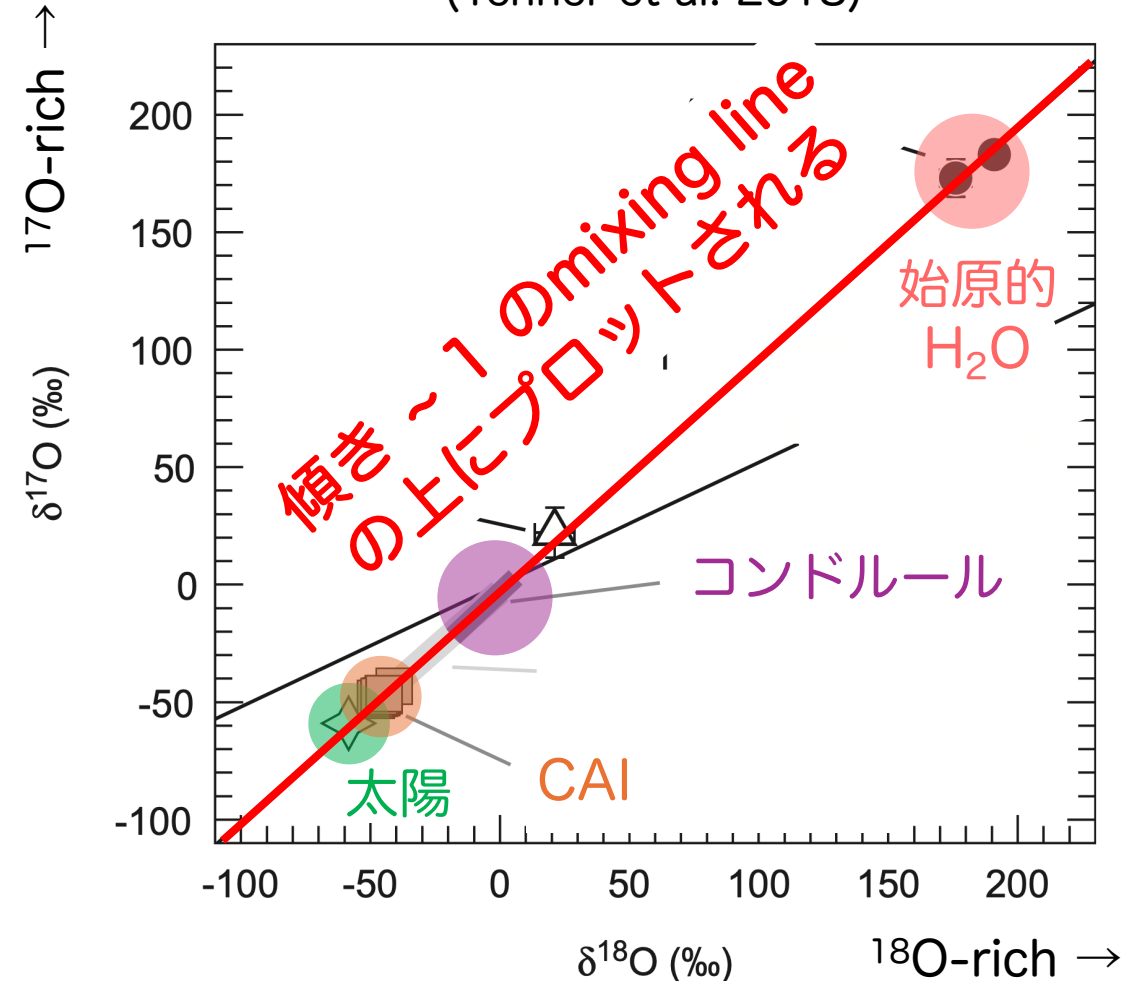
荒川創太<sup>1</sup>、牛久保孝行<sup>1</sup>、富永遼佑<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JAMSTEC、<sup>2</sup>東京科学大

# 太陽系物質（隕石）の酸素同位体組成

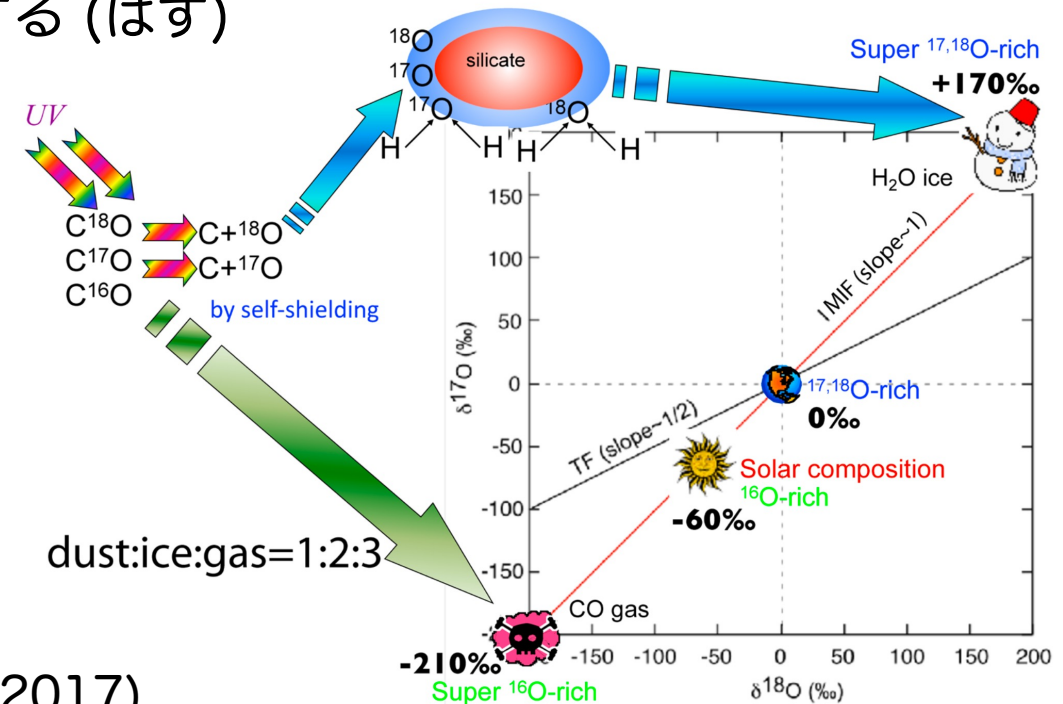
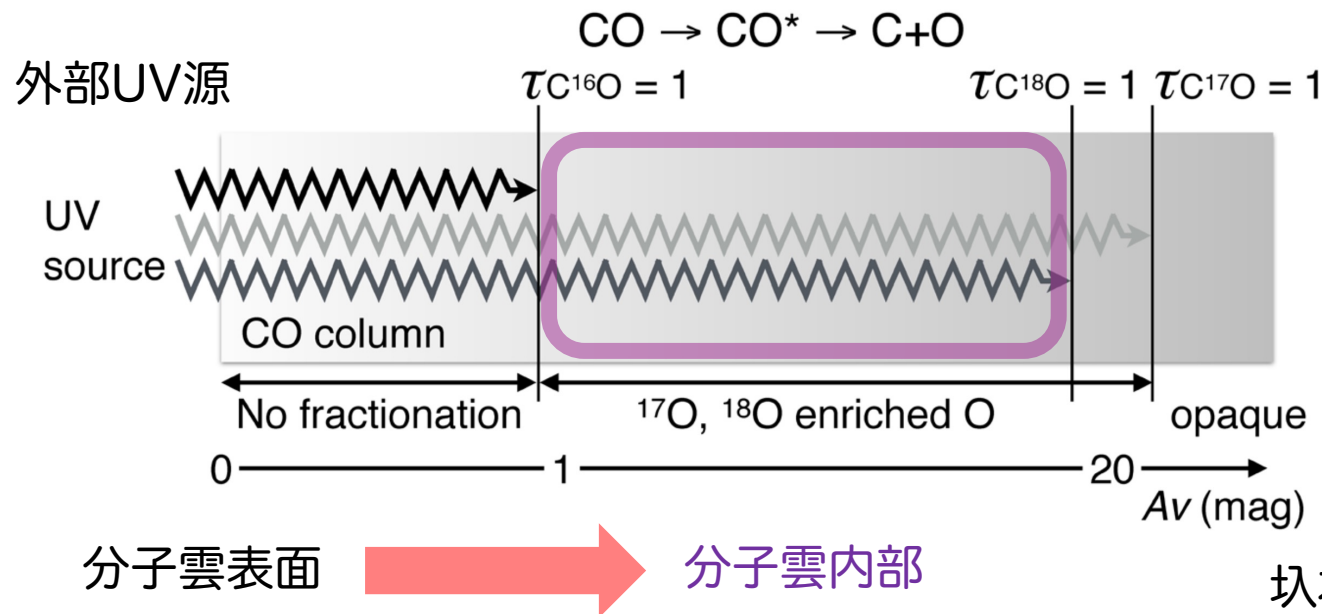
- **太陽系平均**:  $\delta^{17}\text{O} = \delta^{18}\text{O} = -60\text{‰}$
- **CAI** (~ 1500 Kで凝縮した珪酸塩ダスト) も太陽系平均に近い値 (-45‰程度)
- **コンドルール**:  $\delta^{17}\text{O} = \delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$ 
  - コンドルールは円盤中の固体物質が瞬間的に溶融・固化してできた粒子
  - コンドールの $\delta^{17}\text{O}$ は形成場所・時刻における固体物質の平均値を反映する
- **始原的な $\text{H}_2\text{O}$** :  $\delta^{17}\text{O} = \delta^{18}\text{O} = +180\text{‰}$   
(始原的隕石中のFe-O-S粒子のO同位体から)

太陽系物質の3酸素同位体プロット  
(Tenner et al. 2018)

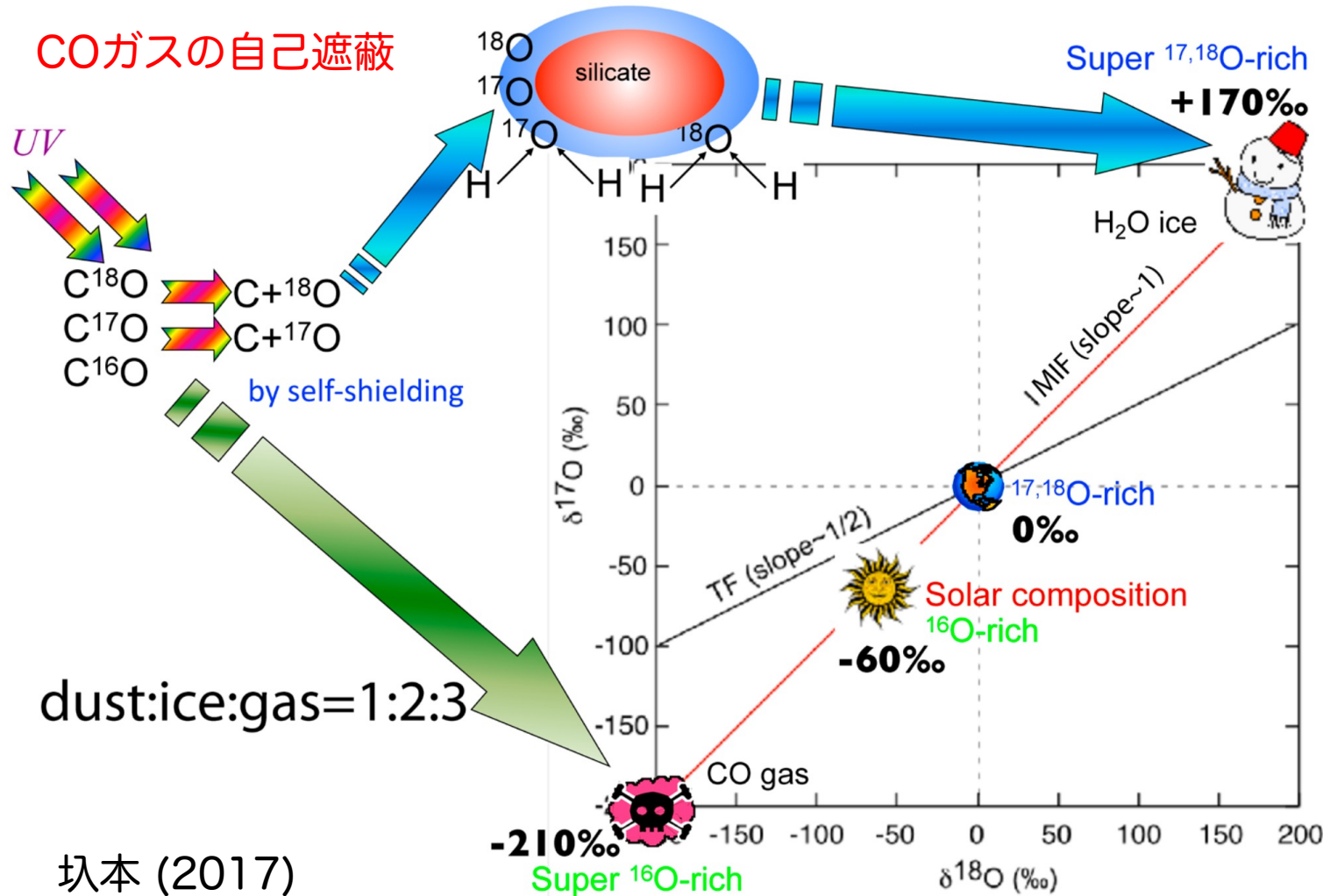


# 酸素同位体組成の多様性：分子雲起源説

- 隕石物質の酸素同位体組成は傾き1の直線上で大きくばらつく。多様性の起源は？
- **分子雲起源説** (Yurimoto & Kuramoto 2004): **分子雲におけるCOの自己遮蔽による分別**
  - 分子雲の $C^{16}O$ で光学的に厚く、 $C^{17}O$ および $C^{18}O$ で薄い領域において、 $C^{17}O$ 、 $C^{18}O$ が壊され、 $^{17}O$ と $^{18}O$ に富む $H_2O$ が形成される
  - カウンターパートとして $^{16}O$ に富む $CO$ が存在する (はず)



# 酸素同位体組成の多様性：分子雲起源説



垓本 (2017)

分子雲で以下の初期条件が形成されたと仮定する

**H<sub>2</sub>O初期値**

$$\delta^{17}\text{O} = \delta^{18}\text{O} = +180\%$$

**ケイ酸塩初期値**

$$\delta^{17}\text{O} = \delta^{18}\text{O} = -60\%$$

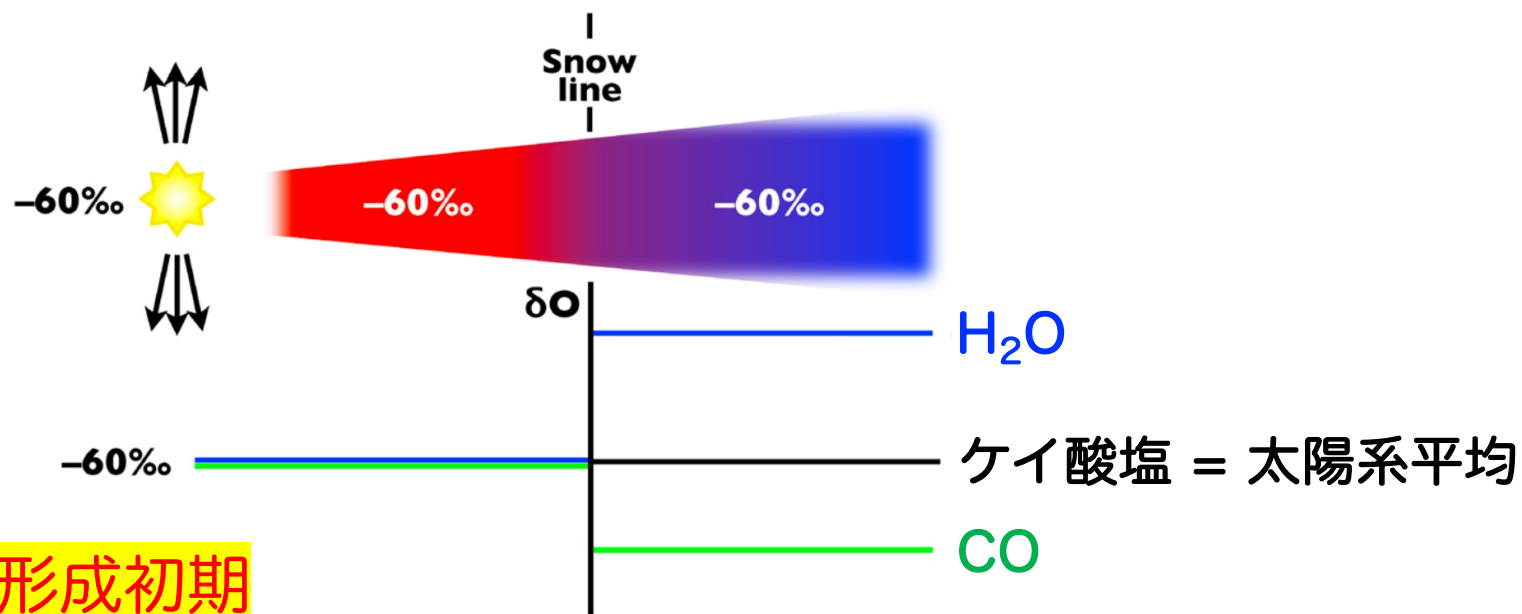
**CO初期値**

$$\delta^{17}\text{O} = \delta^{18}\text{O} = -220\%$$

円盤中でこれらが同位体交換して太陽系物質の同位体組成が進化

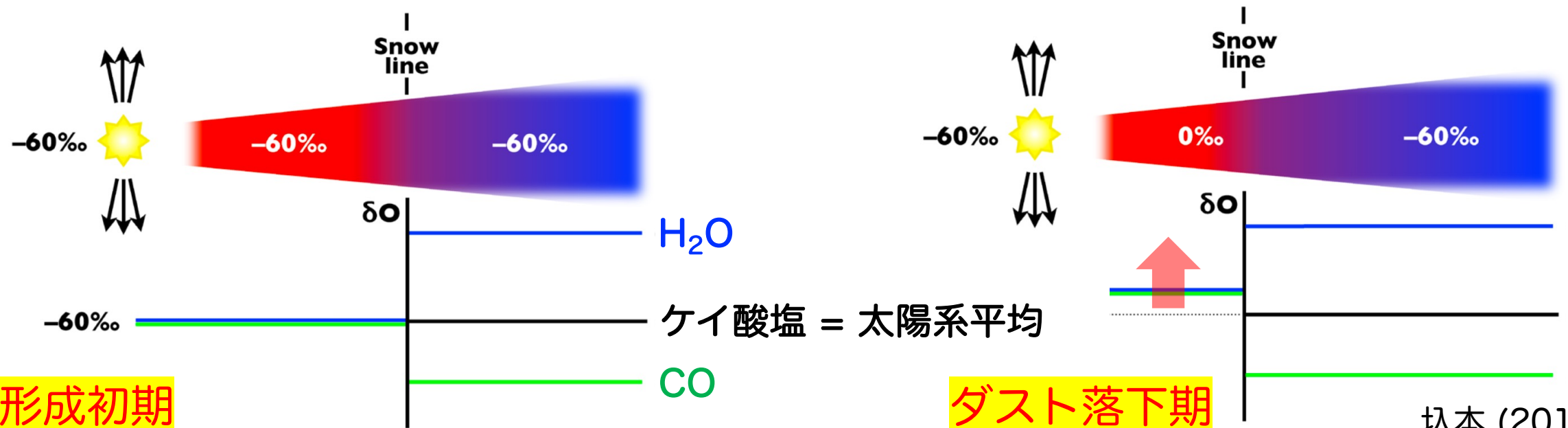
# 円盤内側での酸素同位体組成進化

- 分子雲コアに異なる酸素同位体組成をもつ $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、ケイ酸塩ダストが存在し、それらを材料として円盤が形成・進化する
- $\text{H}_2\text{O}$ スノーラインの外側では $\text{H}_2\text{O}$ とケイ酸塩は固相、 $\text{CO}$ は気相に存在



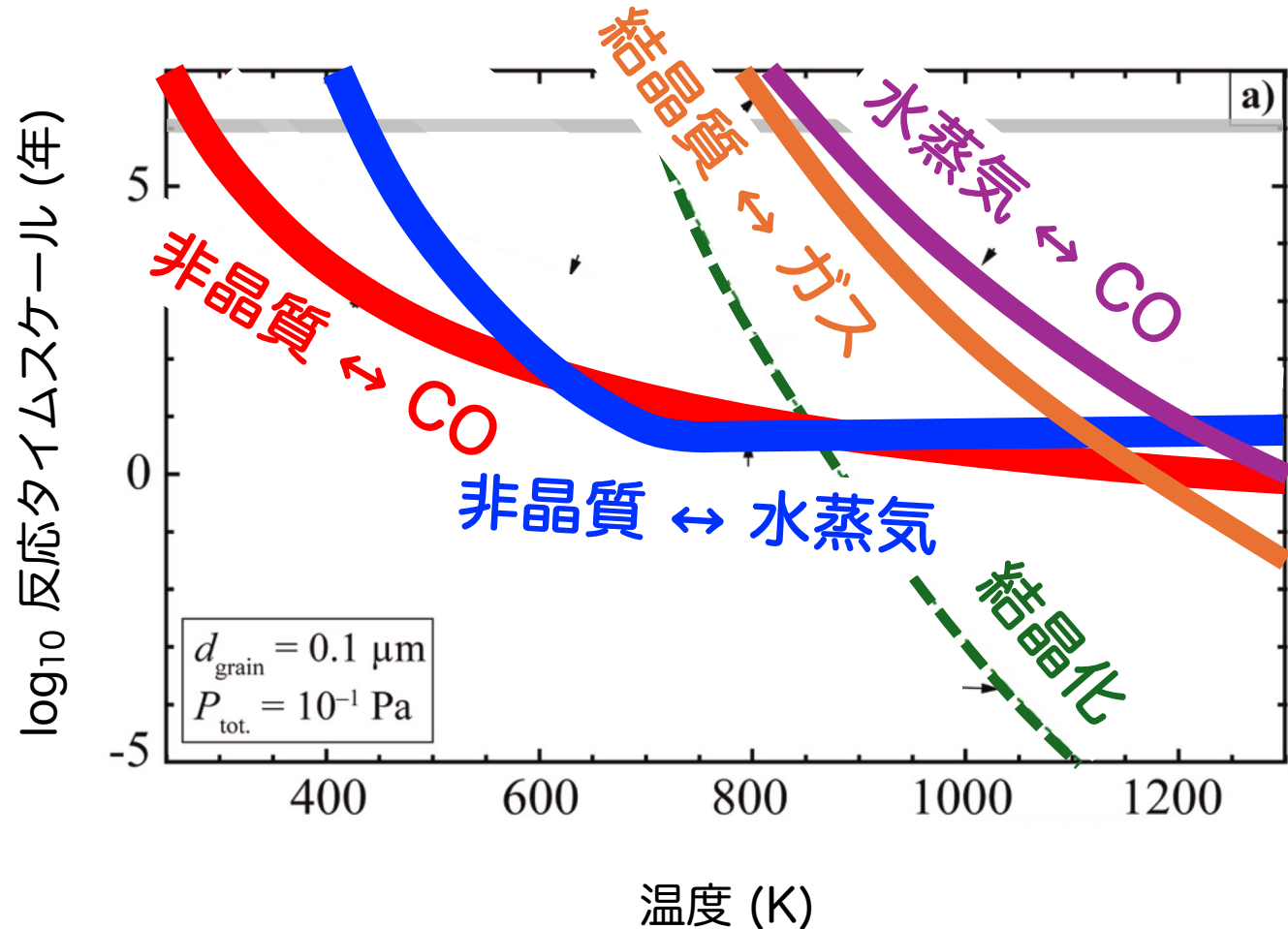
# 円盤内側での酸素同位体組成進化

- 分子雲コアに異なる酸素同位体組成をもつH<sub>2</sub>O、CO、ケイ酸塩ダストが存在し、それらを材料として円盤が形成・進化する
- H<sub>2</sub>Oスノーラインの外側ではH<sub>2</sub>Oとケイ酸塩は固相、COは気相に存在
  - 成長した氷ダストの落下によって、スノーラインより内側でH<sub>2</sub>O/CO比が上昇
  - 内側で $\delta^{17,18}\text{O}$ の平均値が上昇、さらに加熱されれば3成分間で同位体交換が進行



# 同位体交換反応タイムスケール

- 非晶質ケイ酸塩の場合、 $\sim 300$  K以上の領域においてCOと、 $\sim 500$  K以上の領域で水蒸気と同位体交換する
- 水蒸気とCOガスは非晶質ケイ酸塩を介して同位体交換する  
(直接交換は遅いため)
- 結晶質ケイ酸塩の場合は $\sim 900$  K以上でのみ同位体交換が進行
- 反応速度が実験的に求まったことで、円盤中での酸素同位体組成進化を数値計算できるようになった

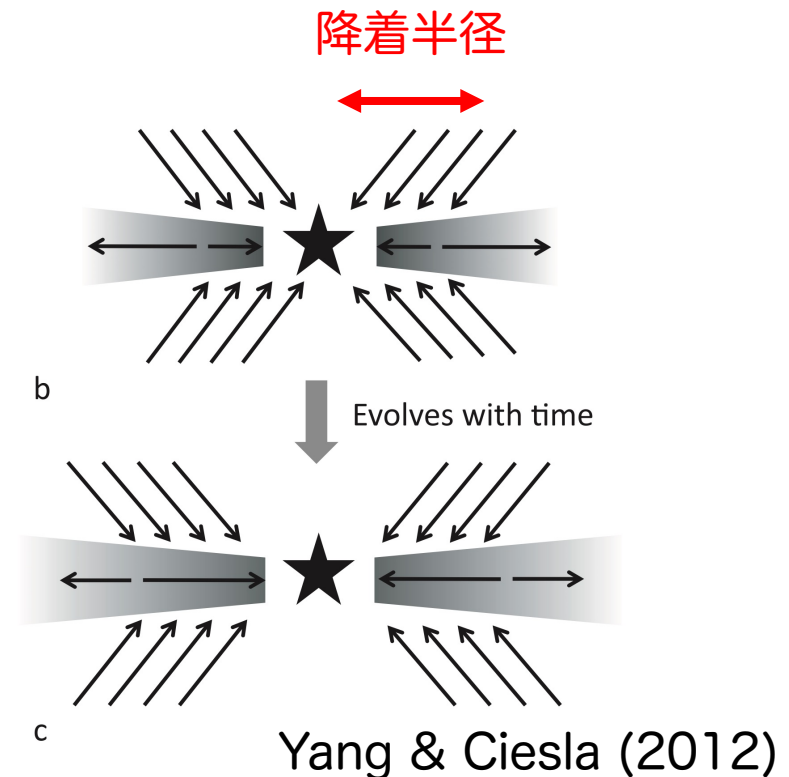
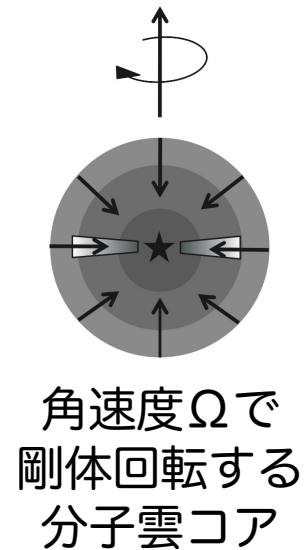
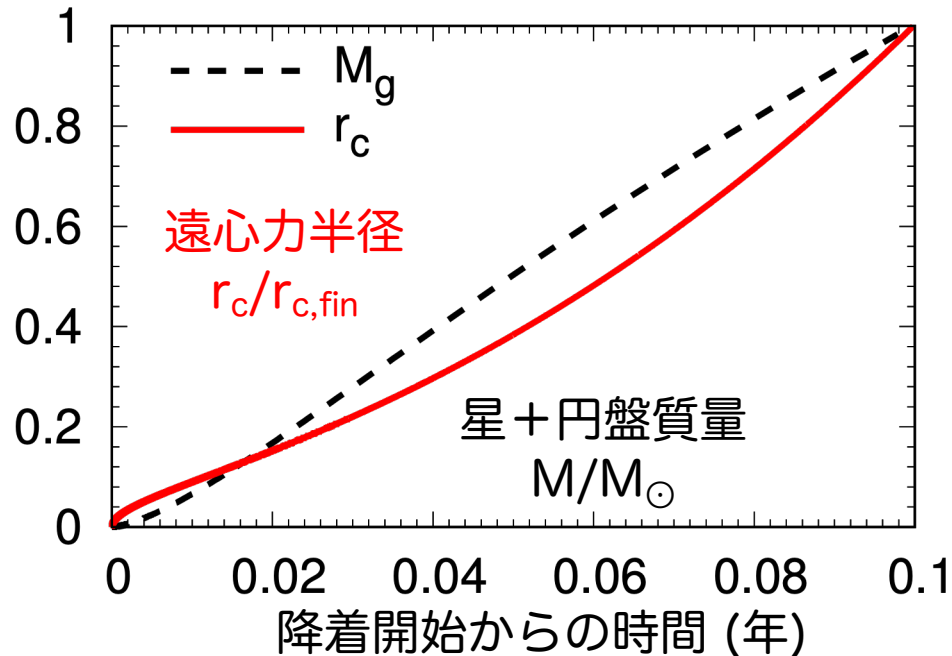


# 本研究の目的

- $^{16}\text{O}$ -poorな $\text{H}_2\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}$ -richな $\text{CO}$ 、太陽系平均のケイ酸塩、の3成分が、円盤中で同位体交換することで、太陽系物質の酸素同位体組成が変動
  - 500 K程度以上の領域で交換反応が進行し、各成分の同位体組成が変化
  - ダスト落下によって3成分の混合比が時空間的に変動
- 物質分布および熱履歴は、分子雲コアの重力崩壊による円盤形成過程を反映  
(次ページ)
- **円盤の形成・進化と酸素同位体組成進化を同時に解き、太陽系の特徴を再現できる分子雲コア・円盤の条件を探す**
  - 今回の発表では分子雲コアの角速度との関係に注目

# 分子雲コアからの質量降着

- 角速度  $\Omega$  で剛体回転する分子雲コアからの質量降着で円盤が形成される状況を考える
  - 密度分布: Bonner-Ebert球  $\times 1.4$  (Takahashi+13), 中心密度  $10^{-18}$  g/cc,  $T = 10$  K
- 円盤のある半径  $R_c = R_c(\Omega, t)$  より内側にダストやガスが降着する
  - 降着終了時の降着半径  $r_{c,fin} = 10 \times (\Omega/10^{-14} \text{ s}^{-1})^2 \text{ au}$

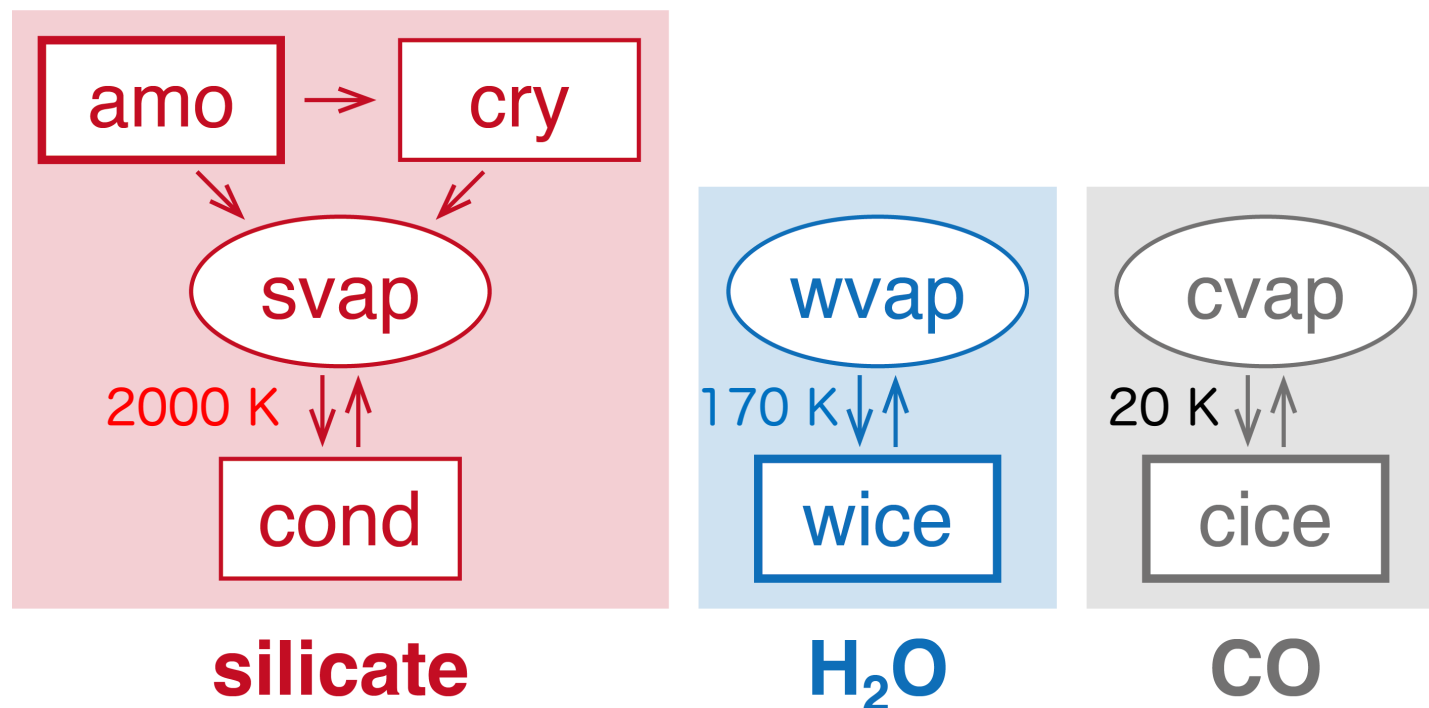


# 円盤中での各成分の相変化

- ケイ酸塩、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$  について、蒸発・再凝縮などの状態変化を考慮する
  - 固相にいる成分は円盤 $\text{H}_2$ ガスと異なる運動をする
  - 結晶質ケイ酸塩は非晶質ケイ酸塩よりも同位体交換反応が遅いことを考慮

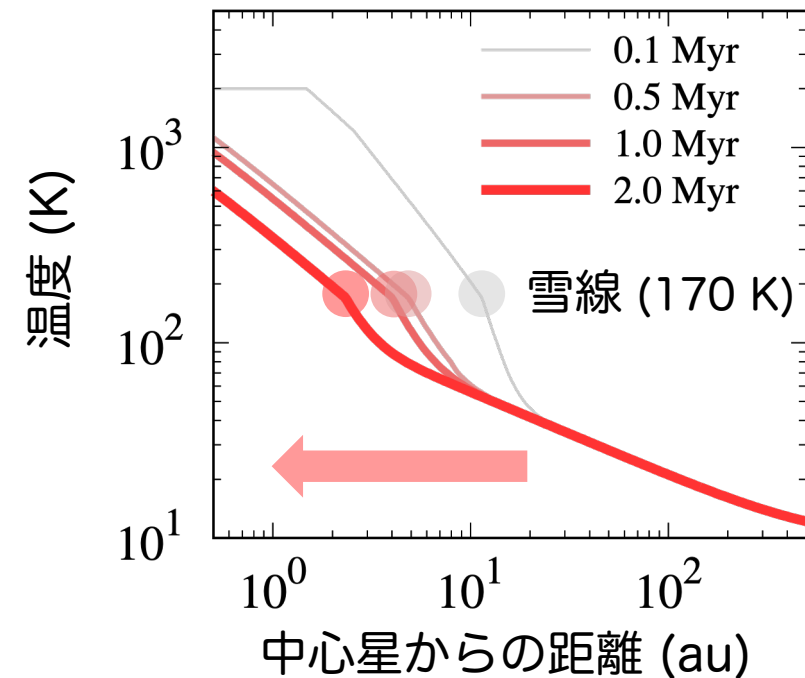
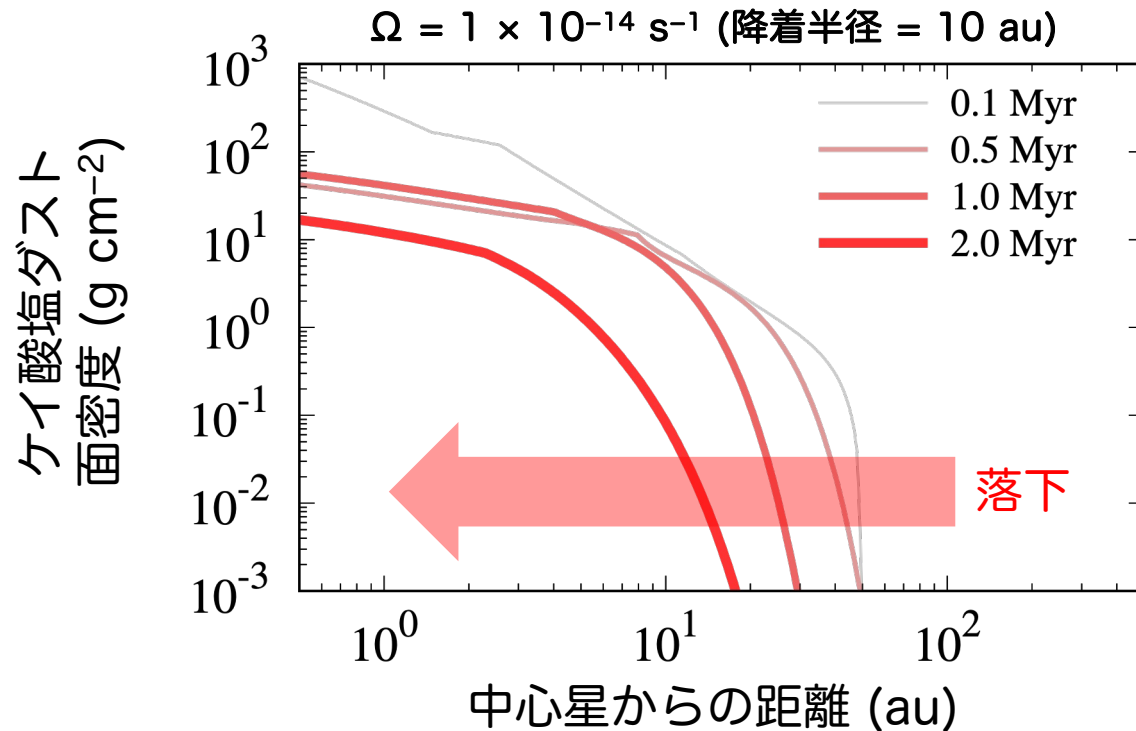
- 成分ごとに面密度と同位体組成を計算する

- 再凝縮ケイ酸塩 (CAI, AOA) の O 同位体組成も追跡



# 円盤の面密度・温度

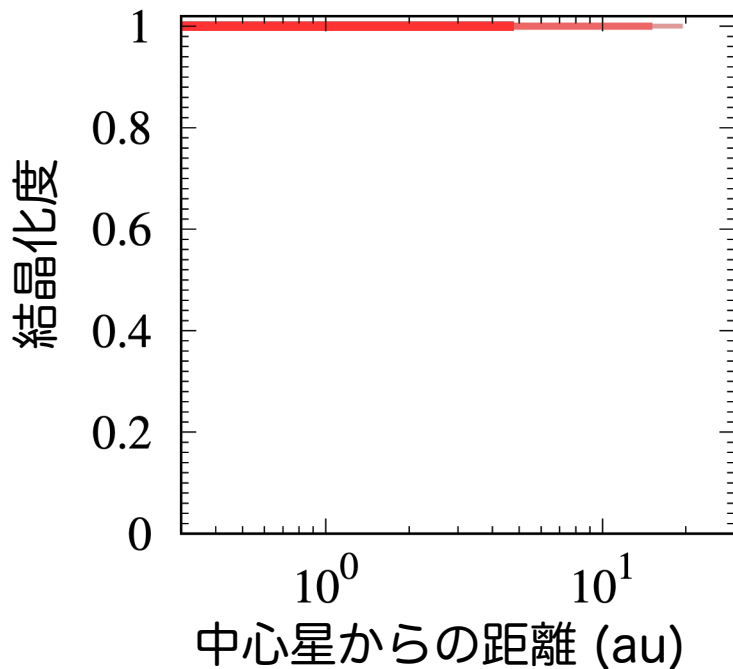
- 動径方向1次元の移流拡散を解く (ガス&ダスト)
  - 赤道面での粘性加熱 ( $\alpha = 10^{-3}$ ) および太陽からの輻射によって温度を決める
  - ダスト落下を考慮 今回は $\text{H}_2\text{O}$ スノーライン内側でダスト半径0.1 mm, 外側で1 cmと設定
  - 分子雲コアからの降着期 ( $t < 0.1$  Myr) は  $r < 1$  au において  $T > 1000$  K



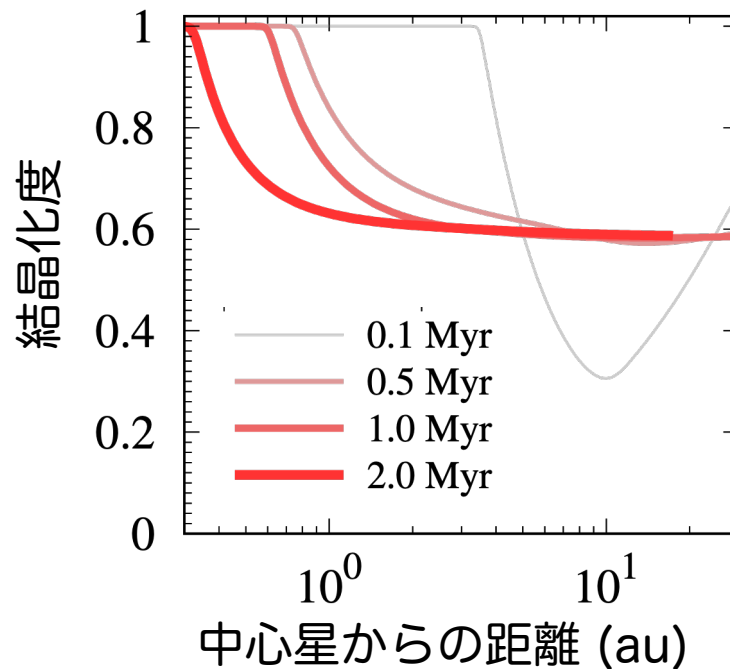
# ケイ酸塩ダストの結晶化度

- 分子雲コア（初期条件）ではケイ酸塩ダストはすべて非晶質であると仮定
  - 円盤内側の高温領域 ( $> 800$  K) で結晶化し、外側へと輸送され、その後落下する

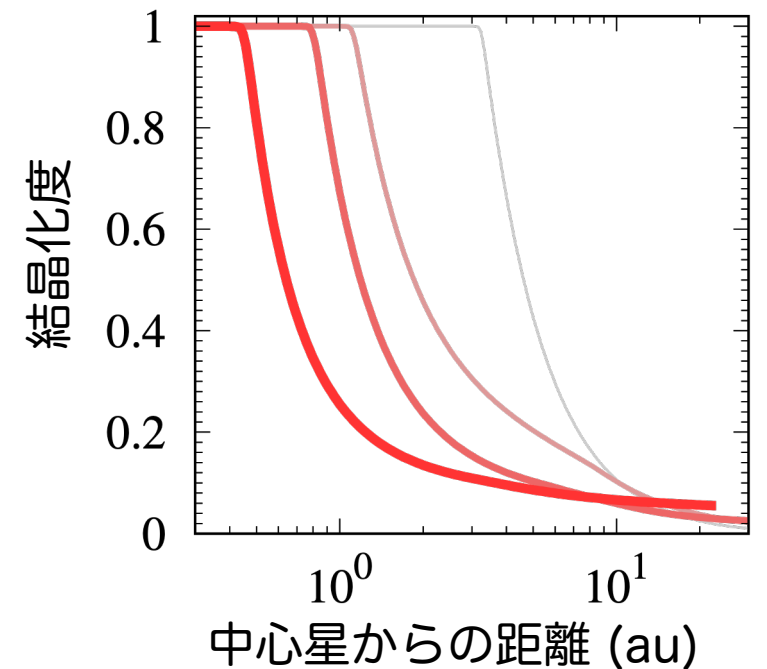
分子雲コアの回転が遅い場合  
( $\Omega = 3 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ , 降着半径 = 1 au)



$\Omega = 1 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$  の場合  
(降着半径 = 10 au)

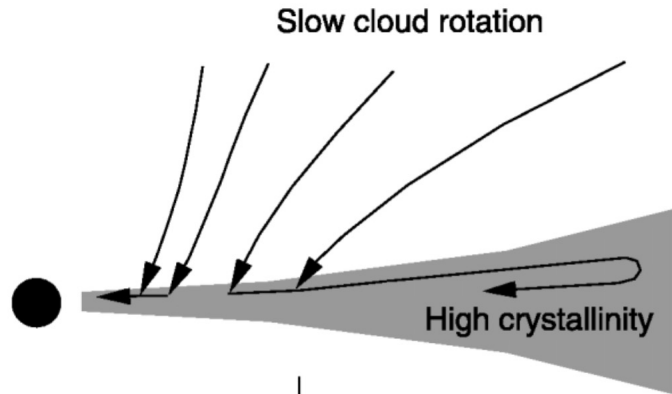


分子雲コアの回転が速い場合  
( $\Omega = 3 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ , 降着半径 = 100 au)

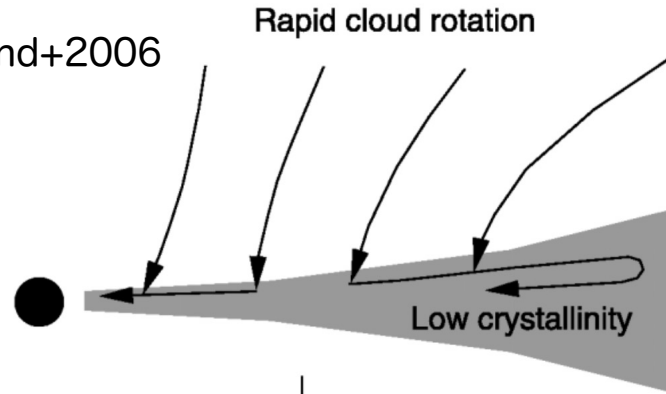


# ケイ酸塩ダストの結晶化度

Dullemond+2006



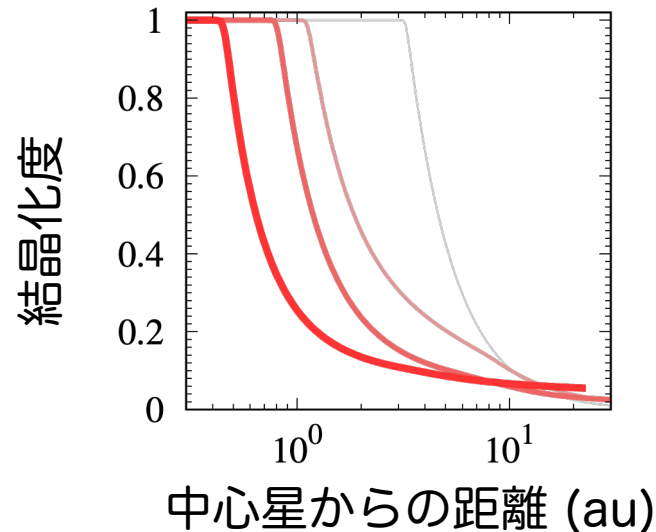
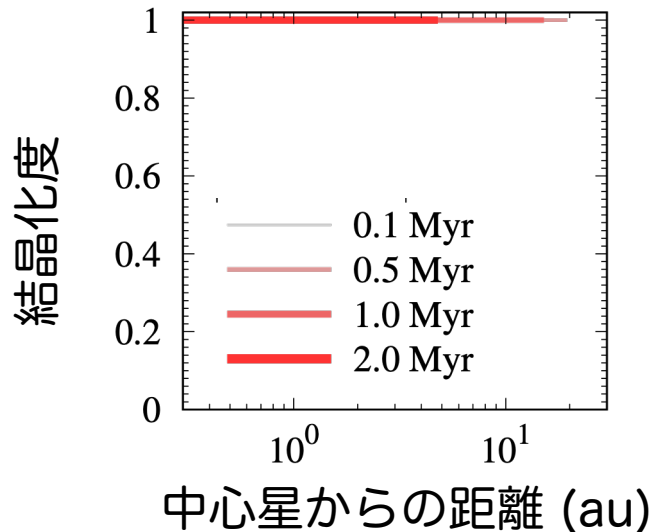
分子雲コアの回転が遅い場合  
( $\Omega = 3 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ , 降着半径 = 1 au)



分子雲コアの回転が速い場合  
( $\Omega = 3 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ , 降着半径 = 100 au)

円盤形成期は降着したガス・  
ダストが外側に輸送される

分子雲コアの角速度が小さいと  
高温領域に降着するダストの割合  
が大きく、結晶化度も高くなる

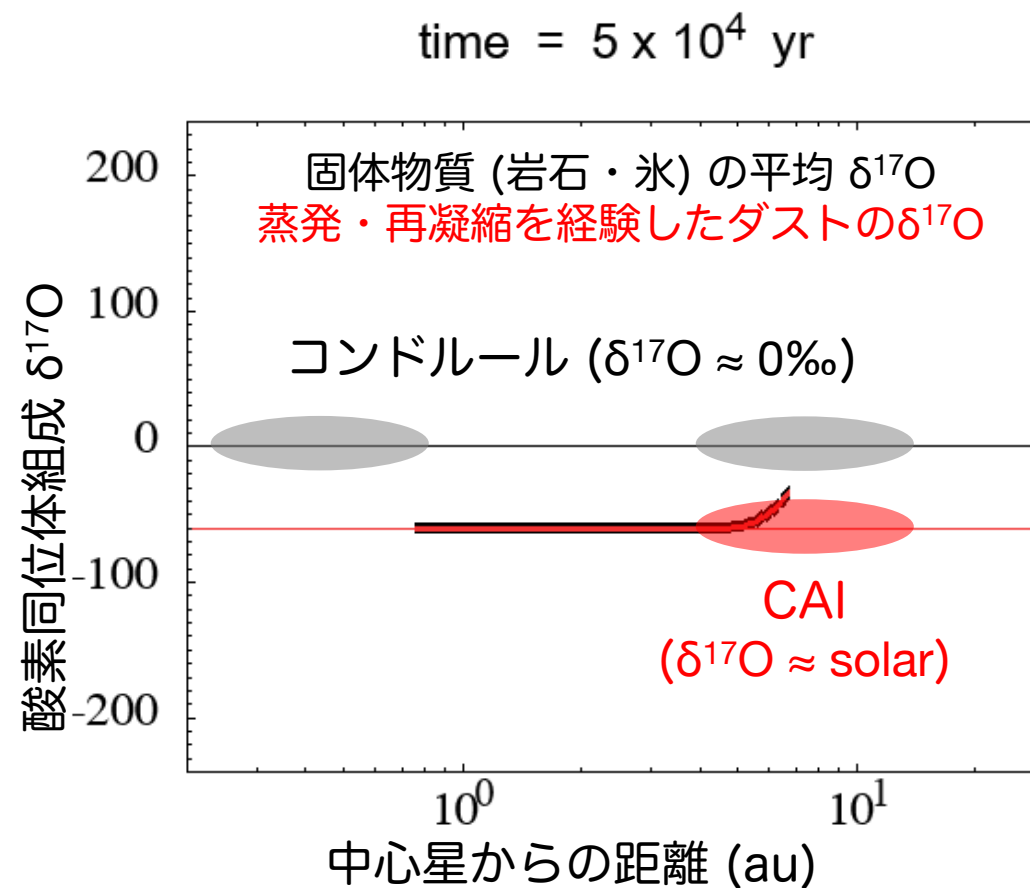
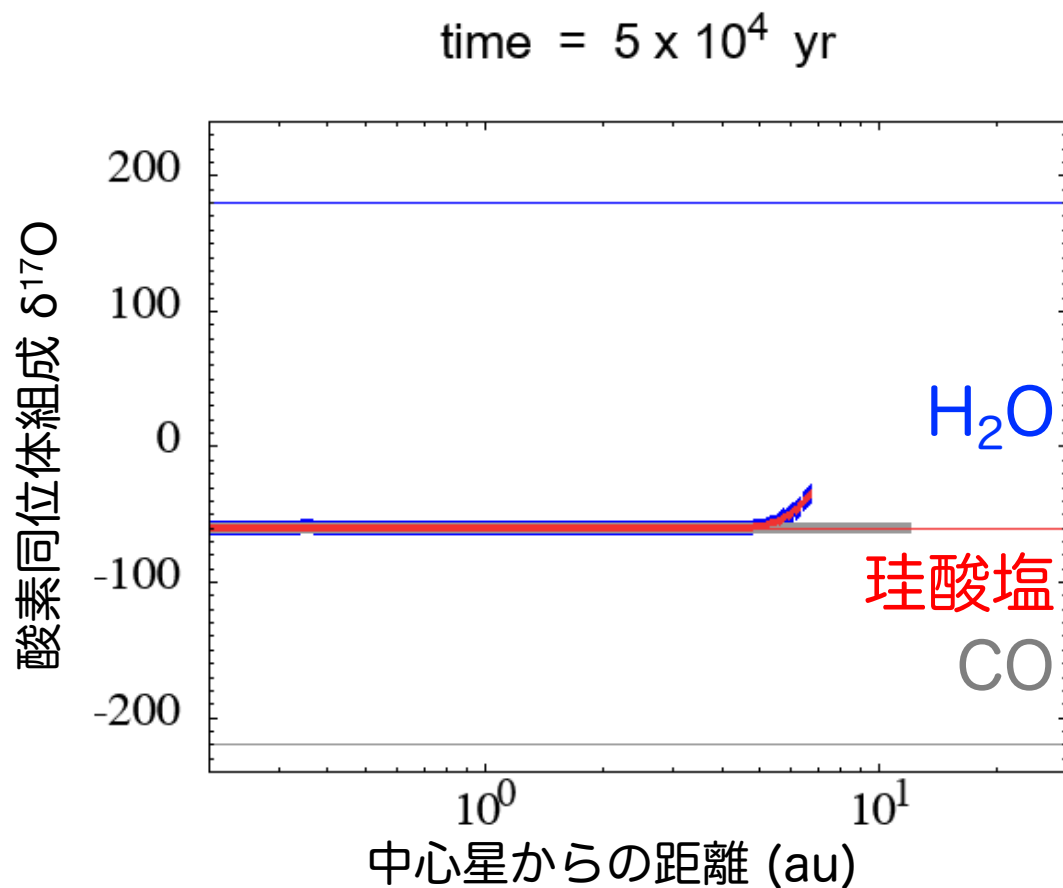


結晶化も同位体交換も  
高温で進む反応プロセス

分子雲コアの角速度が小さいと  
円盤外側に輸送される前に  
ケイ酸塩・水蒸気・COガス間で  
同位体交換が進むことが期待される  
(次ページ以降)

# 分子雲コアの回転が遅い場合

降着半径 = 1 au のとき、3成分とも太陽系平均組成 ( $\delta^{17}\text{O} = -60\%$ ) になる

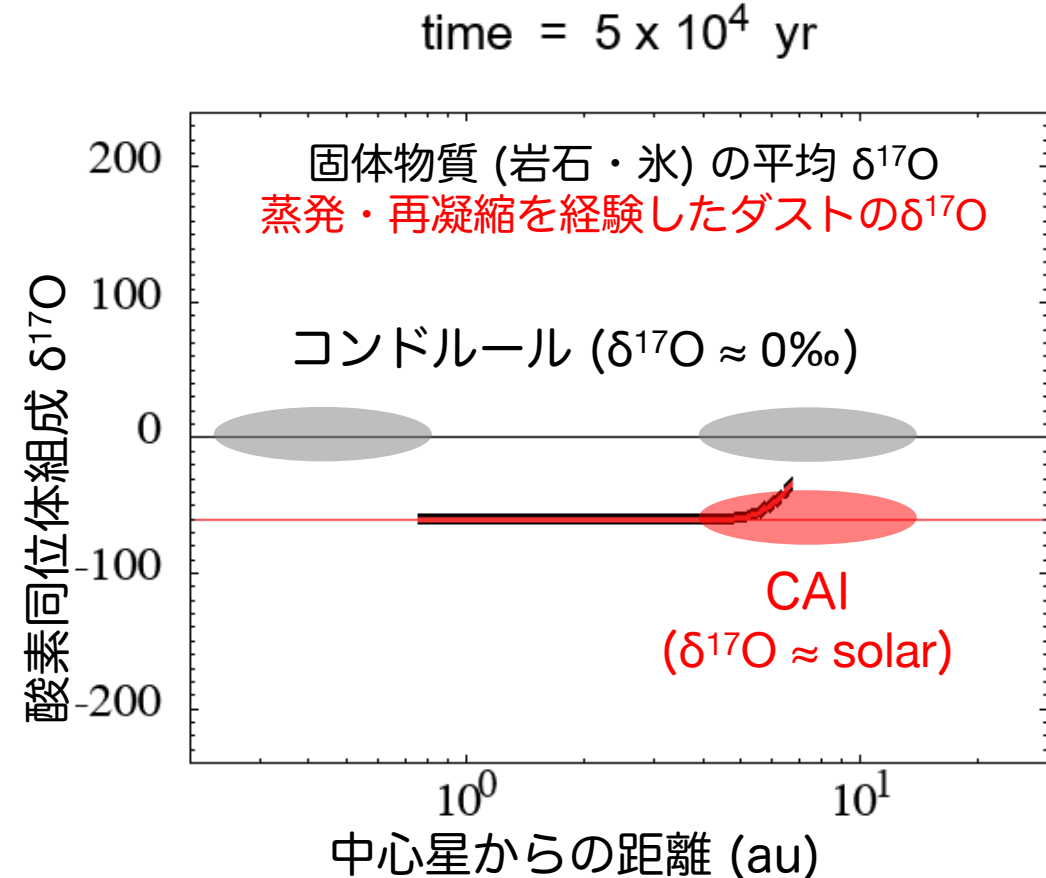


# 分子雲コアの回転が遅い場合

降着半径 = 1 au のとき、3成分とも太陽系平均組成 ( $\delta^{17}\text{O} = -60\%$ ) になる

コンドルールの酸素同位体組成  
( $\delta^{17}\text{O} = 0\%$ ) を再現できない

太陽系物質の多様性も説明できない

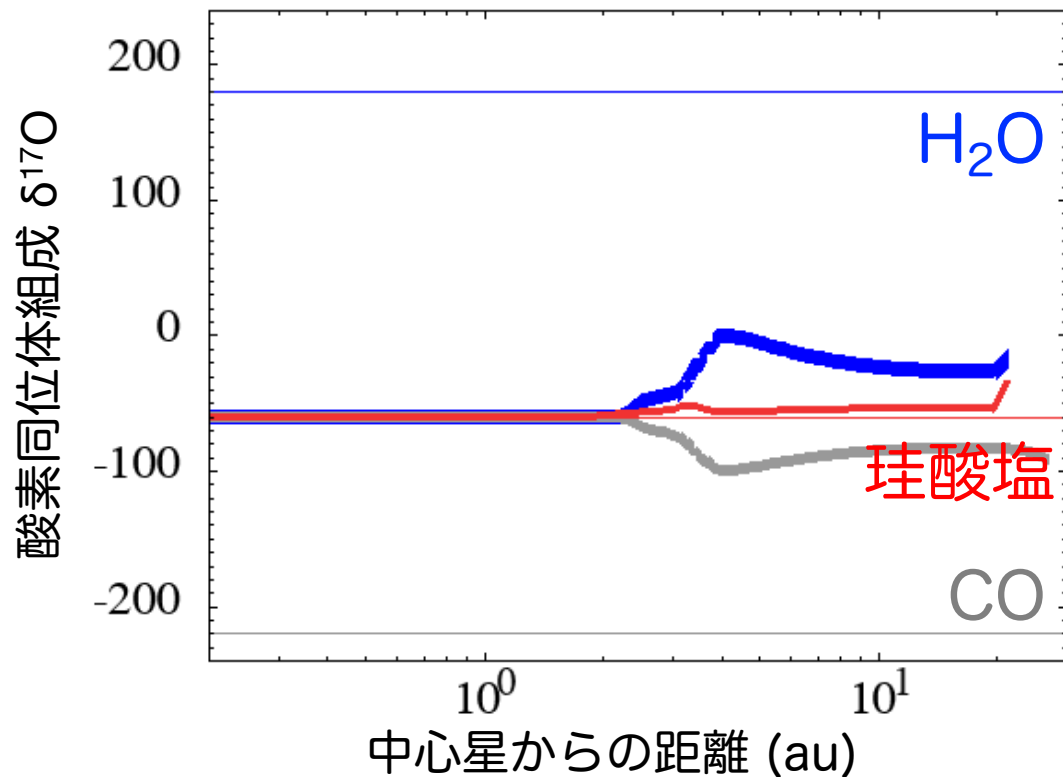


# ちょうどよい角速度の場合

中途半端に同位体交換、その後円盤外側へ輸送

time =  $5 \times 10^4$  yr

$\Omega = 1 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$   
( $r_{c,fin} = 10 \text{ au}$ )



# ちょうどよい角速度の場合

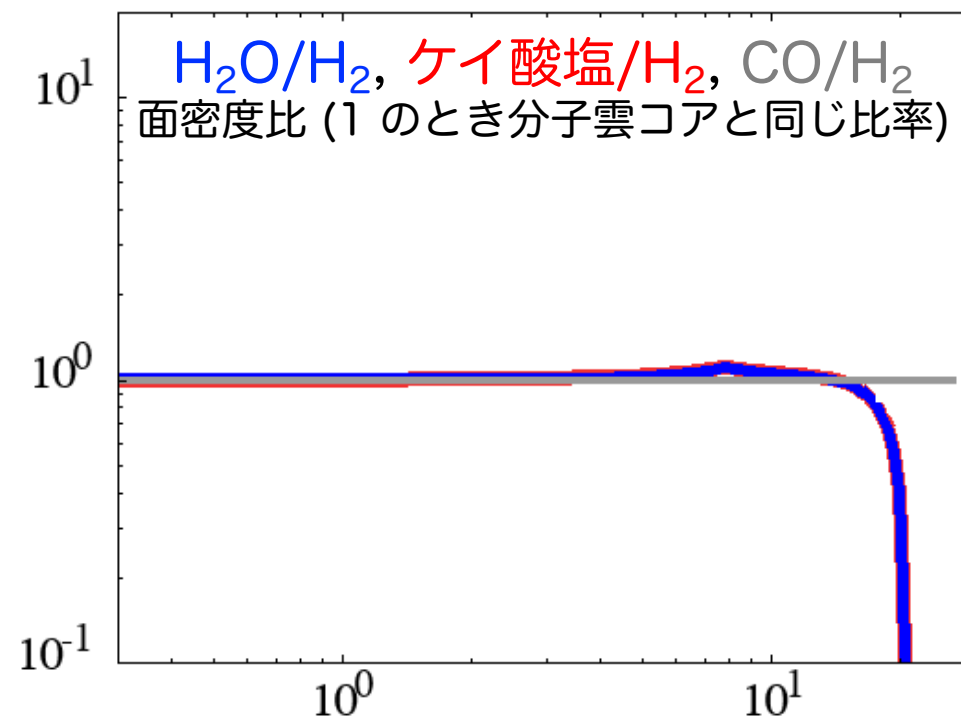
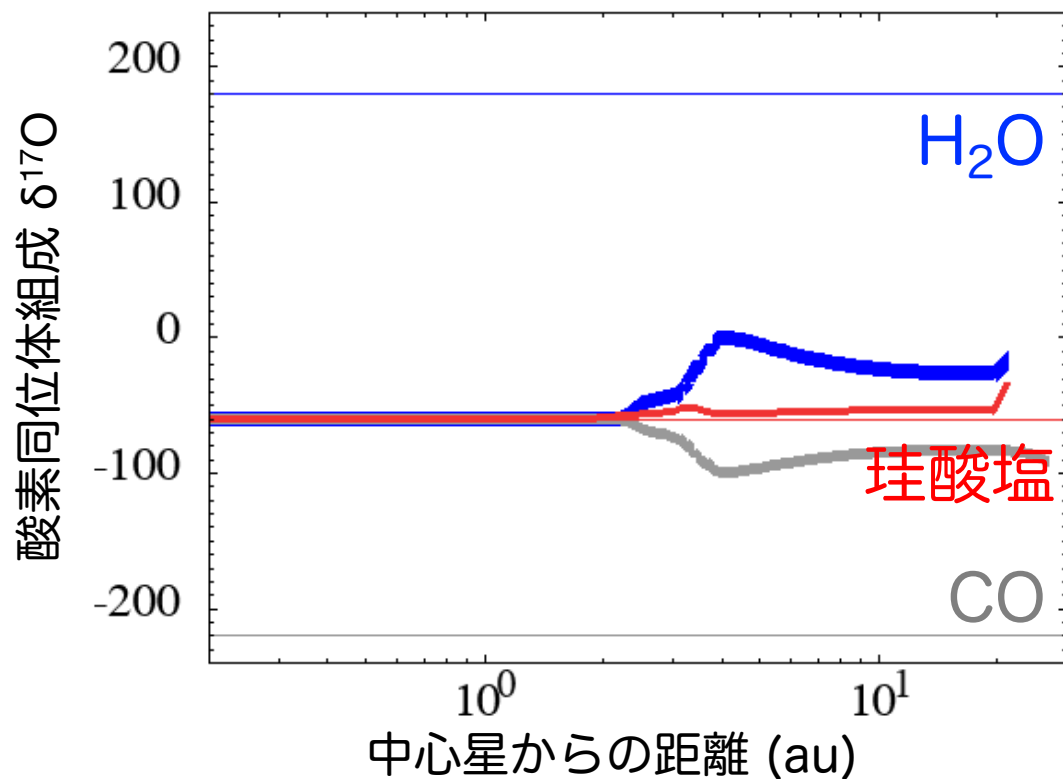
$\text{H}_2\text{O}$ 氷の落下 (右図) により、円盤内側でケイ酸塩ダストの $\delta^{17}\text{O}$ が上昇 (左図)

$$\Omega = 1 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$$

$$(r_{c, \text{fin}} = 10 \text{ au})$$

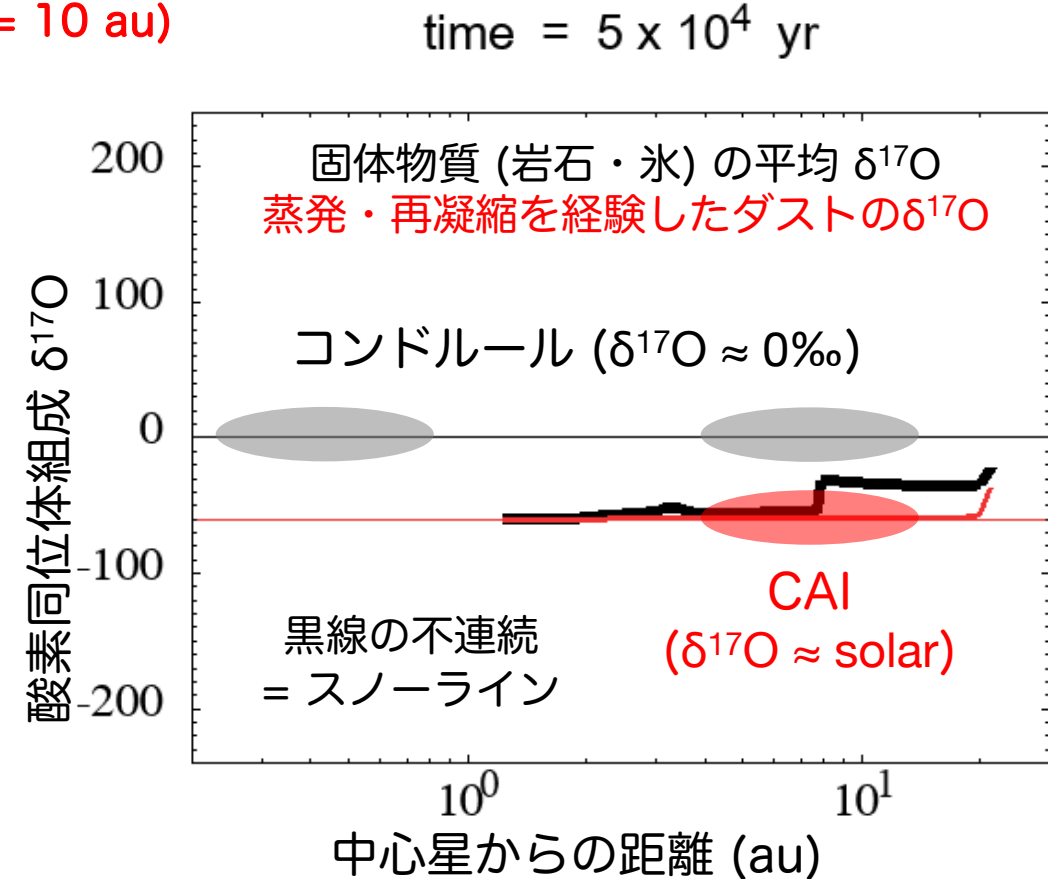
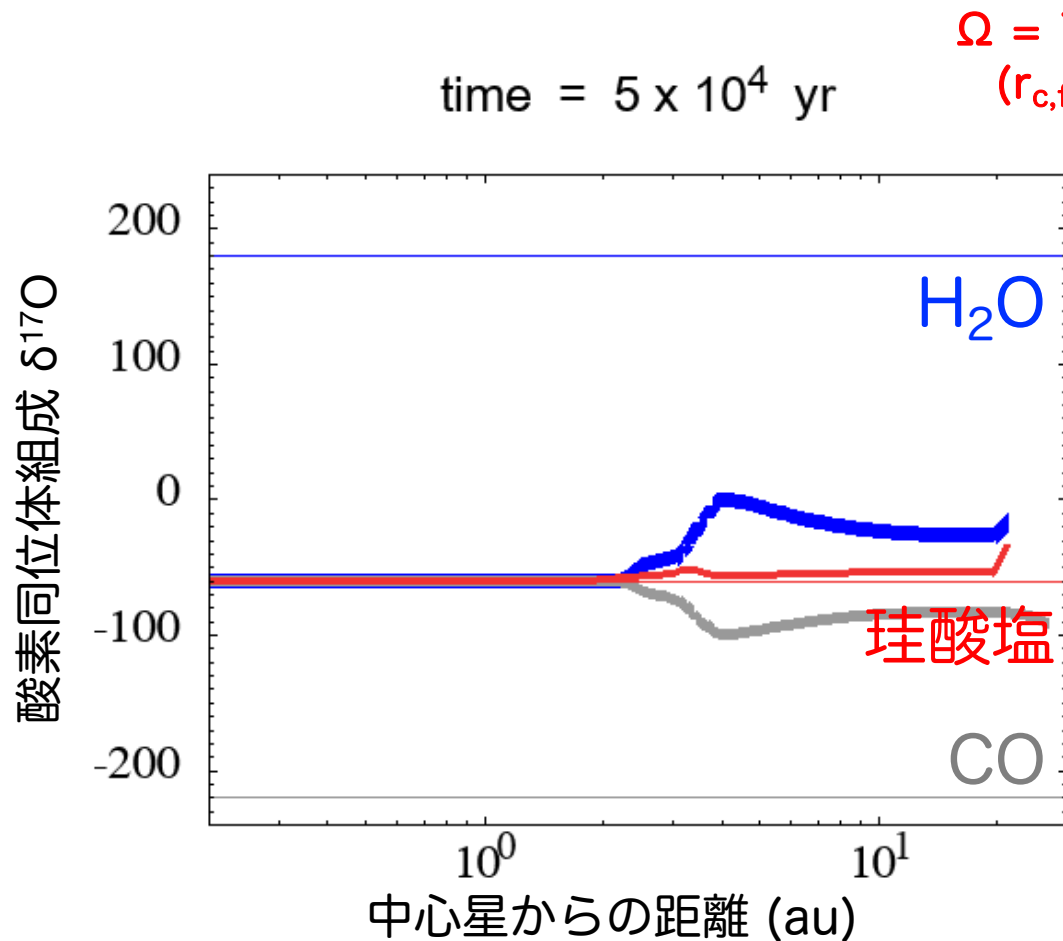
time =  $5 \times 10^4$  yr

time =  $5 \times 10^4$  yr



# ちょうどよい角速度の場合

降着半径 = 10 au のとき、コンドルールやCAIの酸素同位体組成の傾向を説明できそう？



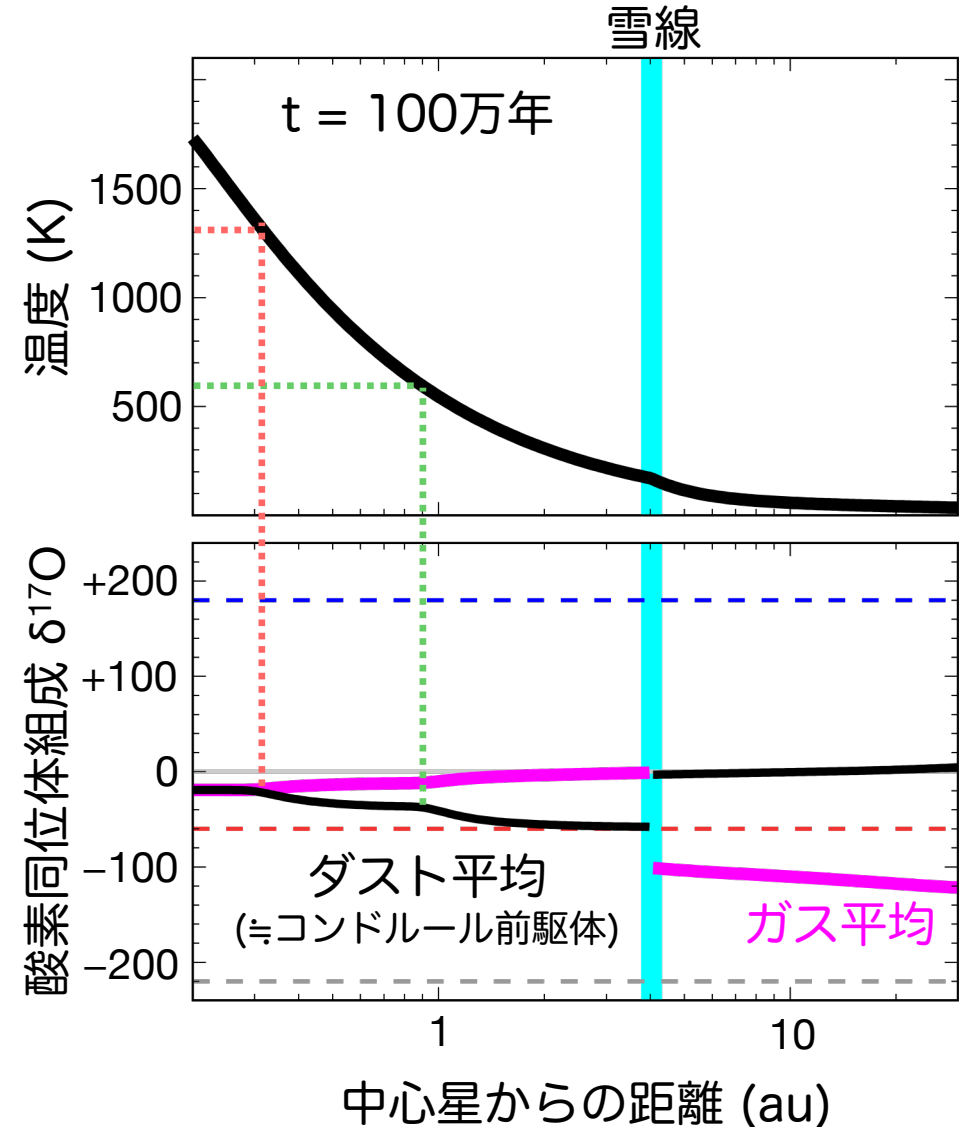
# 雪線より内側でコンドルール形成は困難 かも

雪線より内側でケイ酸塩の $\delta^{17}\text{O}$ が高くなっている領域は  $T > 600 \text{ K}$

非晶質の場合  $T > 600 \text{ K}$ ,  
結晶質の場合  $T > 1300 \text{ K}$  の  
領域でガスとの同位体交換が  
進行するため (Yamamoto+24)

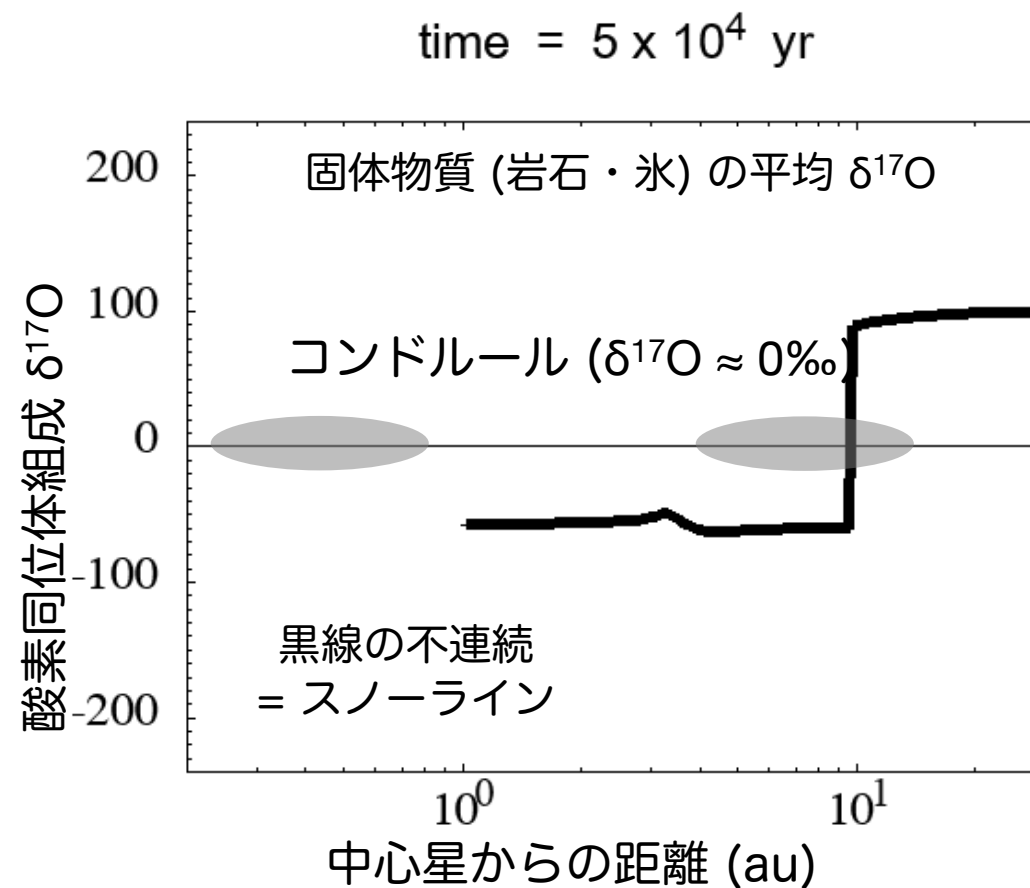
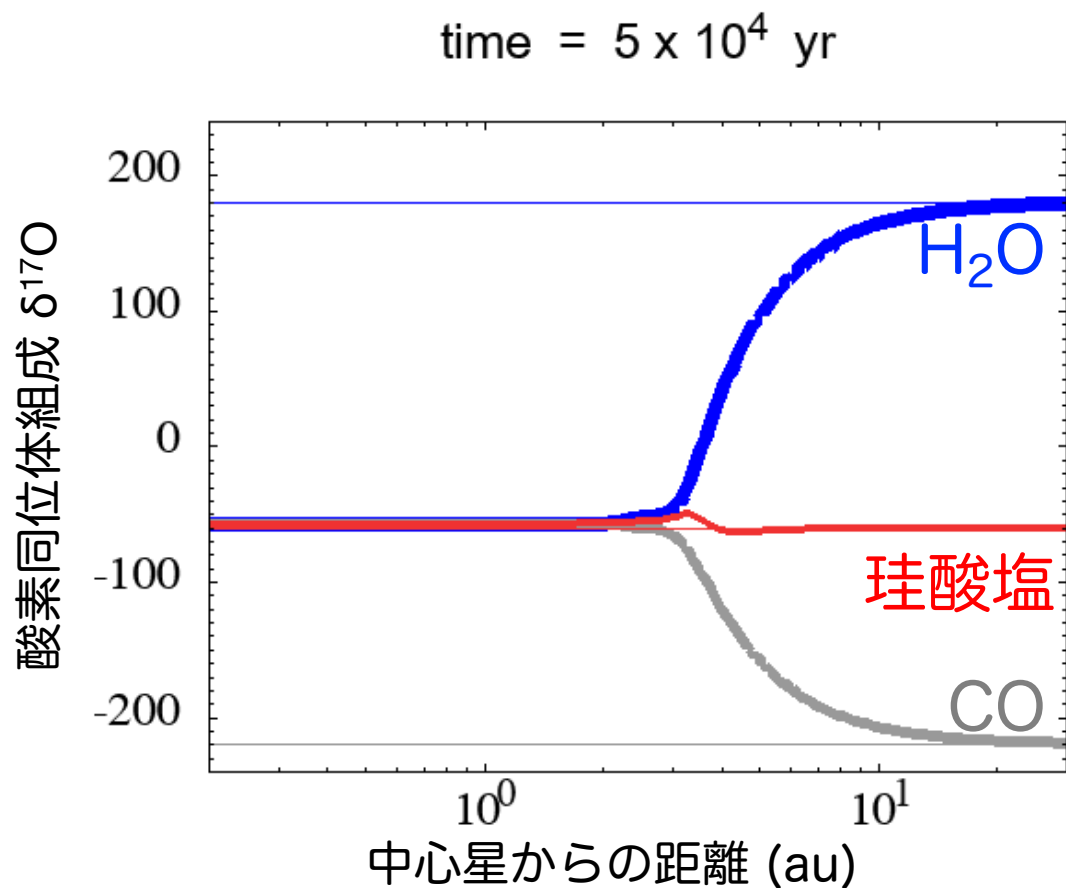
普通コンドライトのコンドルールが  
雪線より内側で形成されたならば、  
形成場の背景温度は  $T > 600 \text{ K}$   
ということになる

一方、コンドルール中の  
primary FeS の存在は  
 $T < 650 \text{ K}$  を示唆? (e.g., Rubin+99)



# 分子雲コアの回転が速い場合

降着半径 = 100 au のとき、円盤外側で3成分とも分子雲の初期組成を保持する



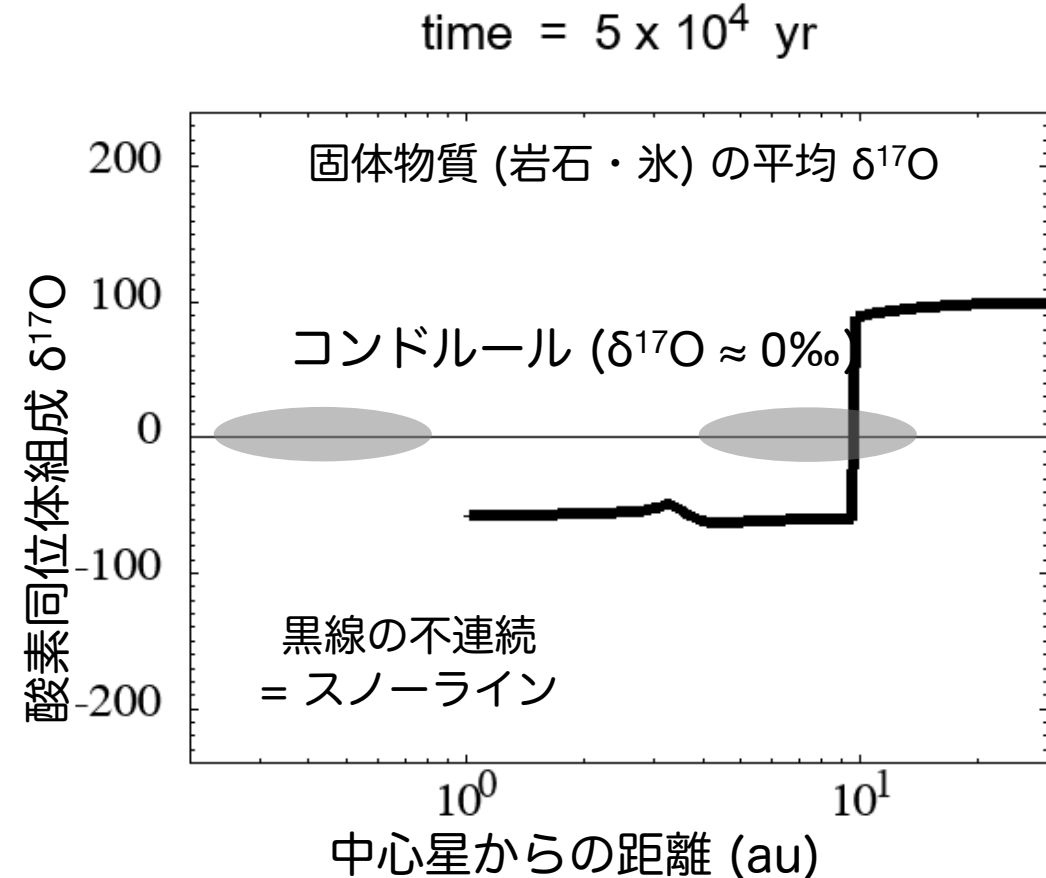
# 分子雲コアの回転が速い場合

降着半径 = 100 au のとき、円盤外側で3成分とも分子雲の初期組成を保持する

ケイ酸塩： $\text{H}_2\text{O} : \text{CO} = 1:2:3$  を仮定すると  
 コンドルールの酸素同位体組成  
 ( $\delta^{17}\text{O} = 0\%$ ) の再現は難しい

スノーライン内側では時刻によってはOK、  
 $0\%$ になる時刻はダストサイズで調整可能  
 ただし  $T > 600 \text{ K}$  の高温領域でのみ

外側の同位体組成が $^{16}\text{O}$ -poorになりすぎる  
 $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  に欠乏した分子雲コアのダスト組成  
 (e.g., van Dishoeck+13) を仮定すれば  
 コンドルールの酸素同位体組成を説明可能、  
 (あるいは分子雲の $\text{H}_2\text{O}$ のO同位体組成は  
 $+180\%$ より $^{16}\text{O}$ -richだったのかもしれない)

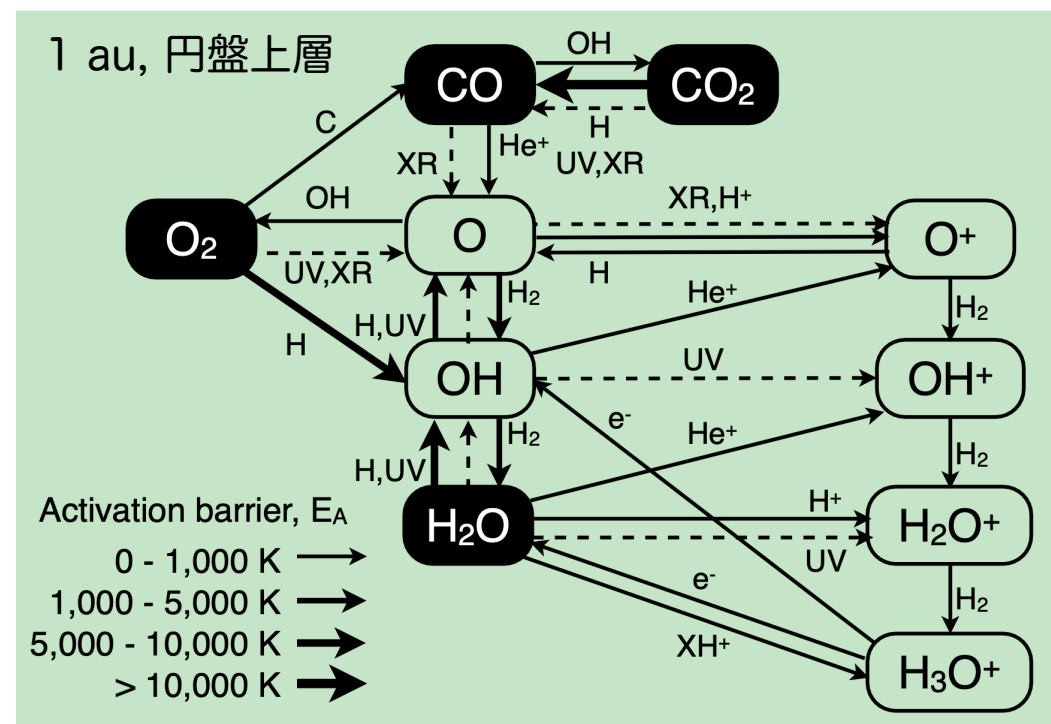


# まとめ

- 太陽系に物質の酸素同位体組成は、 $^{16}\text{O}$ -poorな $\text{H}_2\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}$ -richな $\text{CO}$ 、太陽系平均のケイ酸塩、の3成分が、円盤中で同位体交換することで変動する
- 物質分布および熱履歴は、分子雲コアの重力崩壊による円盤形成過程を反映する
- 円盤の形成・進化と酸素同位体組成進化を同時に解き、太陽系の特徴を再現できる条件を探した。特に分子雲コアの角速度との関係に注目した
- 分子雲コアの角速度が小さいと、3成分とも太陽系平均組成に均質化
  - 太陽系の酸素同位体組成の多様性を説明できない
- 一方、角速度が大きいと、円盤外側で3成分とも分子雲の初期組成を保持する
  - $\text{H}_2\text{O}$ 雪線の外側でコンドロールの酸素同位体組成を説明できないかも（炭素質コンドライト）
- ちょうどよい角速度のとき、適度に3成分間で同位体交換してから円盤外側に輸送される
  - $\text{H}_2\text{O}$ 雪線の外側でコンドロールの酸素同位体組成を再現できそう
- $\text{H}_2\text{O}$ 雪線の内側でコンドロールの酸素同位体組成を説明できる領域は  $T > 600 \text{ K}$ , ちょっと高温すぎる？

# 今後検討すべきプロセス

- **ダストやガスの面密度（比）を変える機構は酸素同位体組成進化に直接影響する**
  - 光蒸発、惑星へのガス降着、ダスト集積→微惑星、赤道面降着 vs. 表層降着、など
- **COは他のものに変換されているかも？（化学反応の重要性）**
  - CO<sub>2</sub>、CH<sub>3</sub>OHなど
  - ただし、ケイ酸塩との同位体交換反応速度がわかっているのはH<sub>2</sub>OとCOのみ
- **円盤への質量降着プロセスのアップデート**
  - 剛体回転する分子雲コア → 最新の理解？
  - 後期降着（ストリーマー）



Walsh et al. (2015)