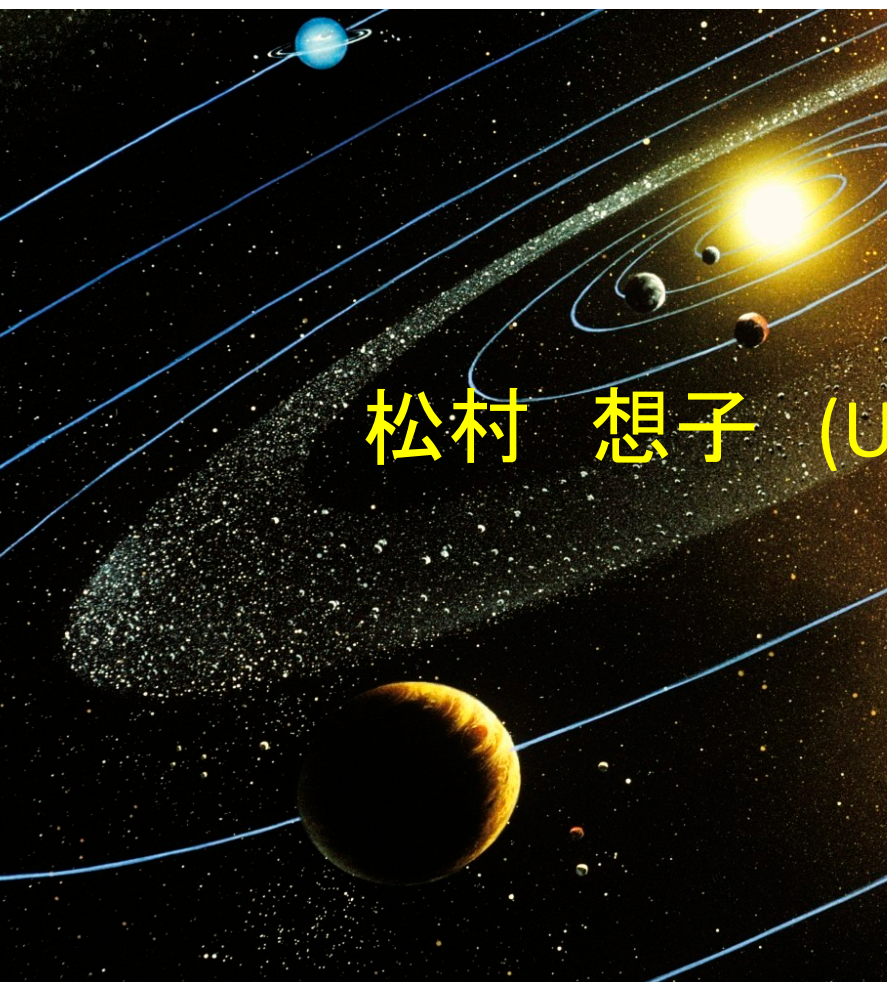


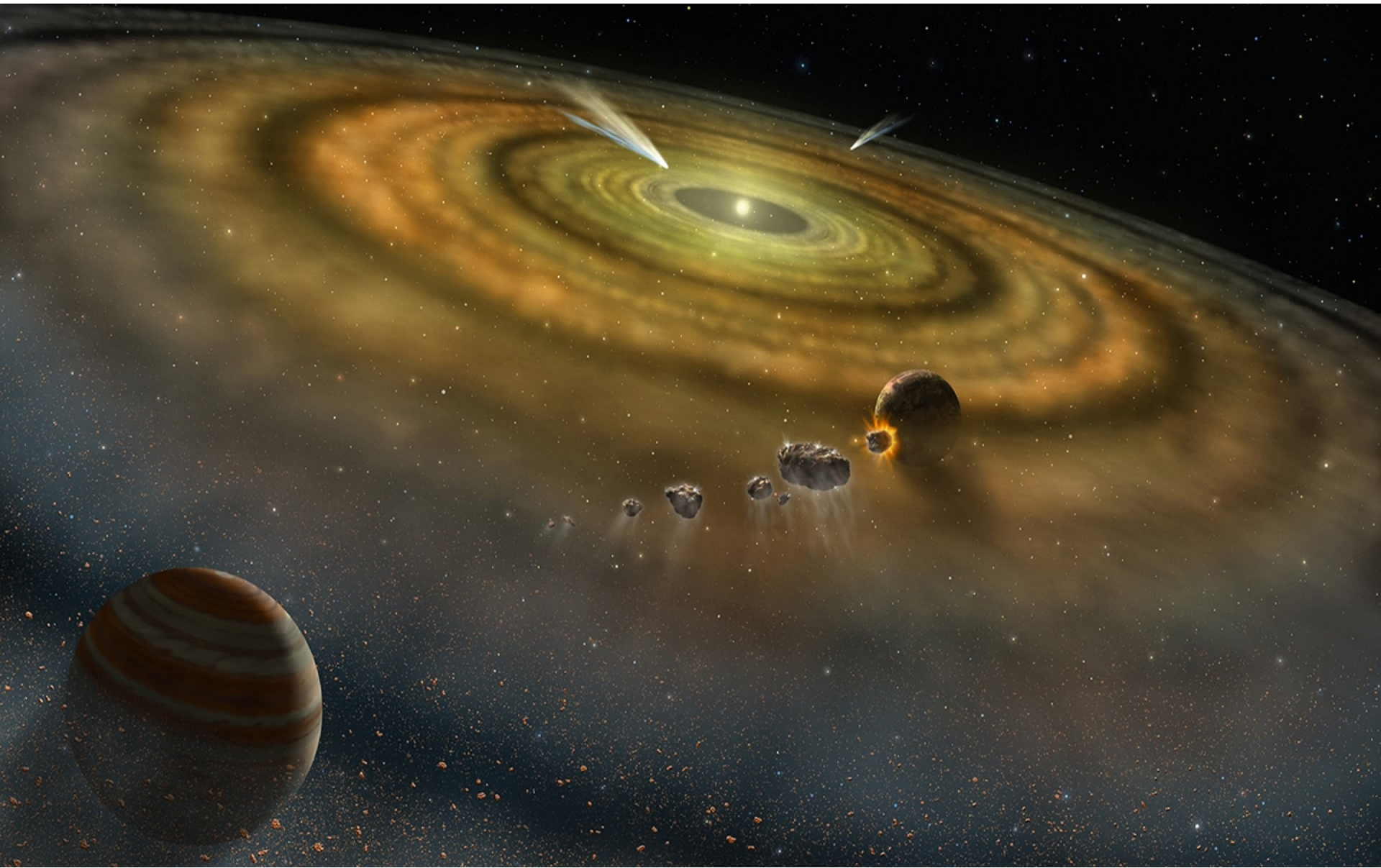
# 惑星形成モデルと元素組成

松村 想子 (University of Dundee)



# 惑星形成モデル

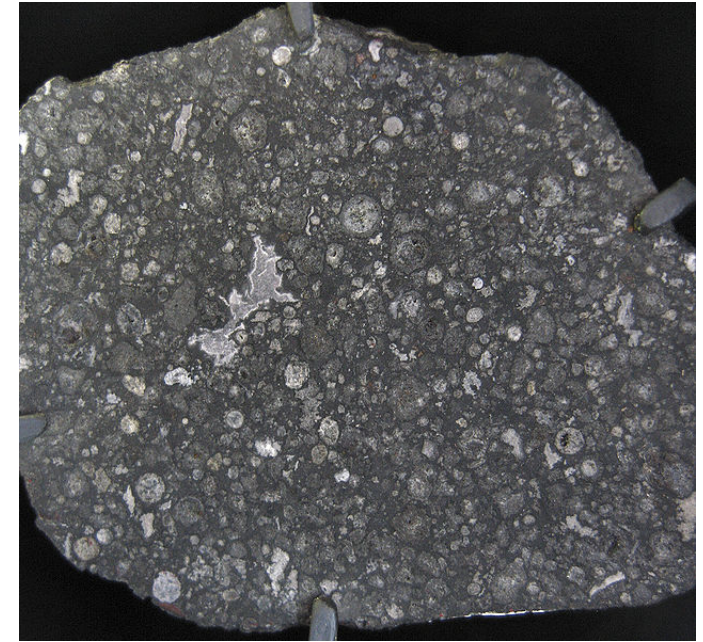




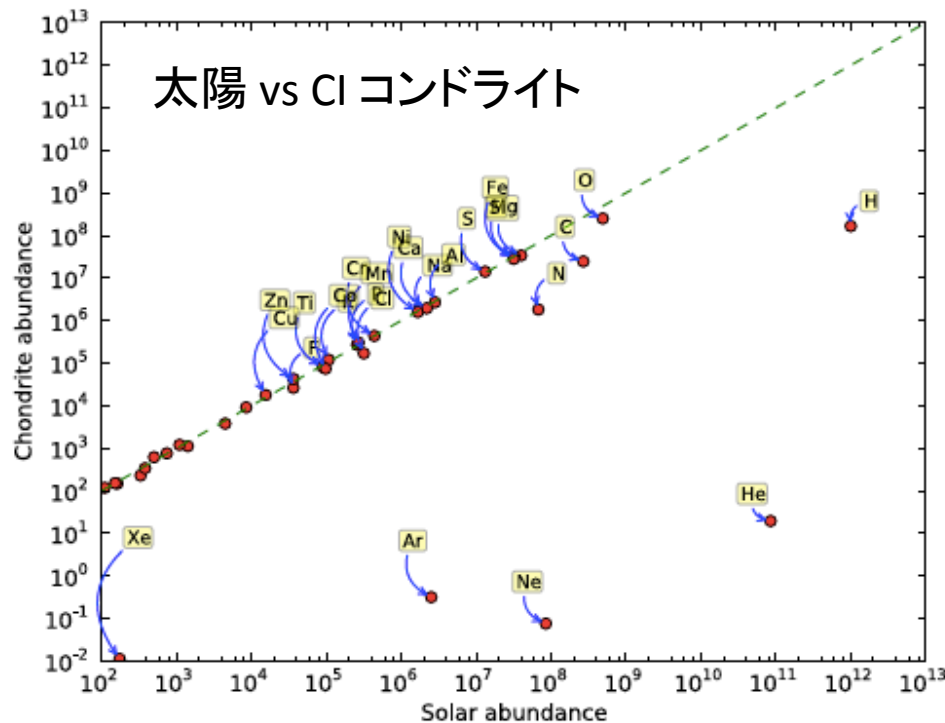


# 炭素質コンドライト (Carbonaceous chondrites)

- 生成されてから高温 ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) にさらされていない。
- 太陽系が生まれた当時の原始星間物質の元素組成を持つ。

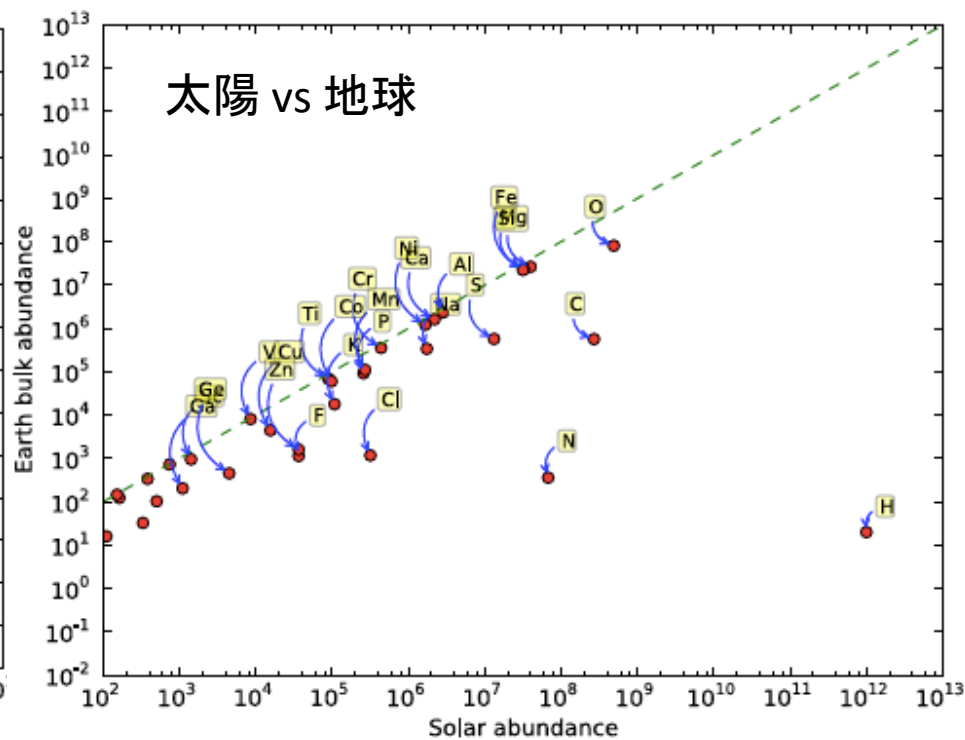
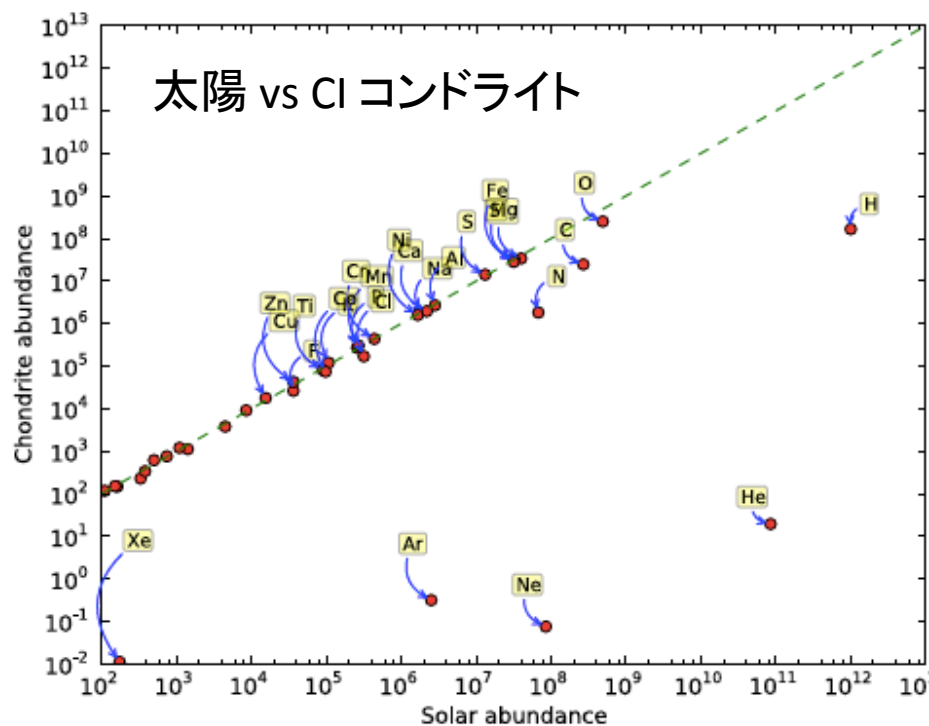
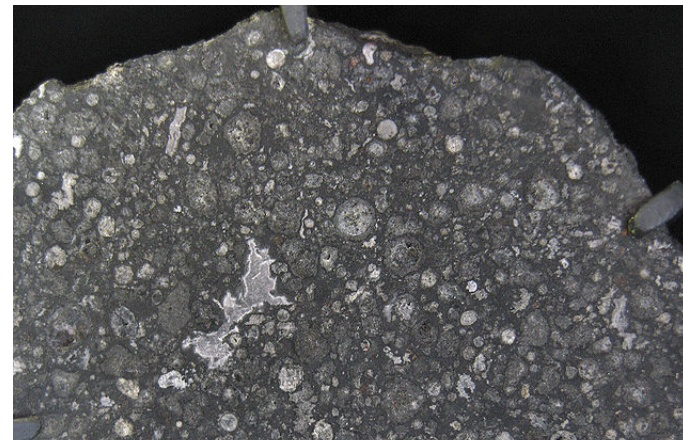


4.5 Gyr old Allende meteorite  
アエンデ隕石

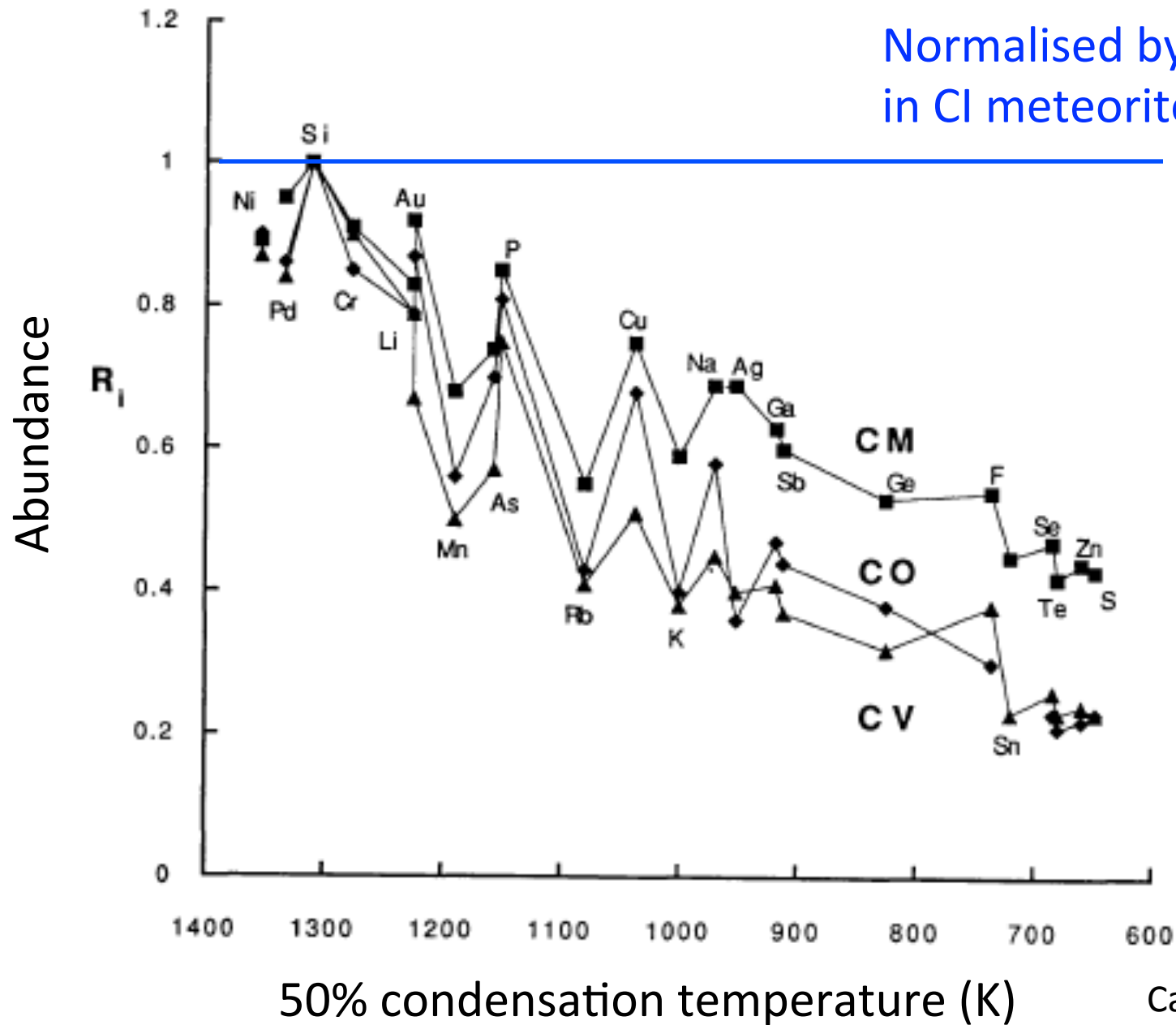


## 炭素質コンドライト (Carbonaceous chondrites)

- 生成されてから高温 ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) にさらされていない。
- 太陽系が生まれた当時の原始星間物質の元素組成を持つ？



Normalised by Si  
in CI meteorites



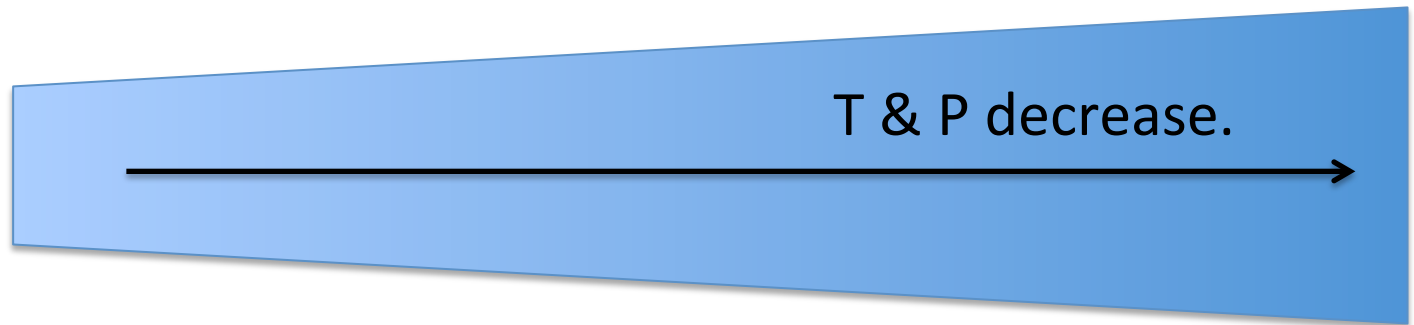
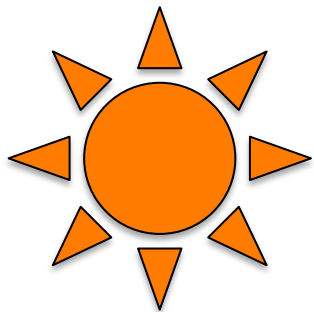
# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

Cassen (1996, 2001)

**仮説:** 惑星を形成する材料は原始惑星系円盤 (protoplanetary disks) が初期の高温の状態から冷える過程で作られる。

Refractory  
難揮発性

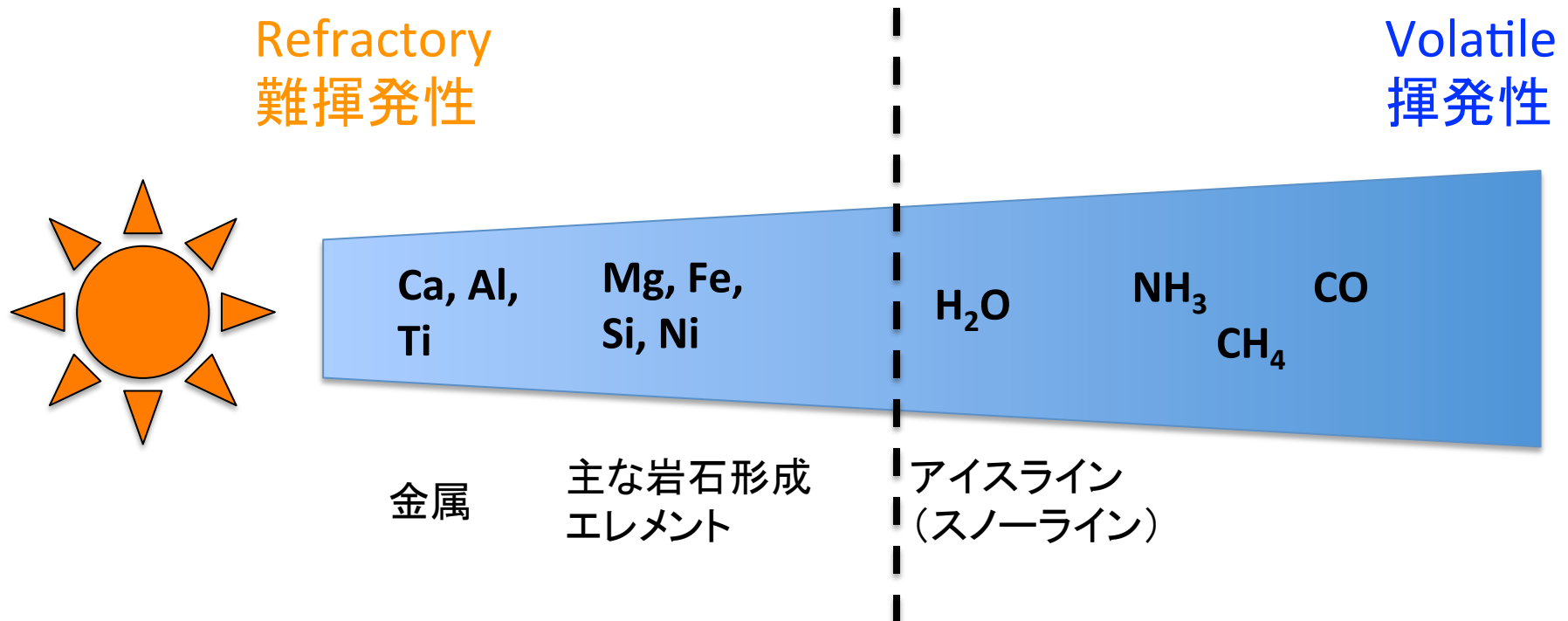
Volatile  
揮発性



# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

Cassen (1996, 2001)

**仮説:** 惑星を形成する材料は原始惑星系円盤 (protoplanetary disks) が初期の高温の状態から冷える過程で作られる。





# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

仮定: 円盤の温度と密度の変化は、化学変化に比べてゆっくり起こる。

→ 円盤は化学変化の起きる間 等温等圧である。

等温等圧の条件下では、系が平衡状態にあるとは ギブズの自由エネルギーが極小になることである。

$$G = H - TS$$

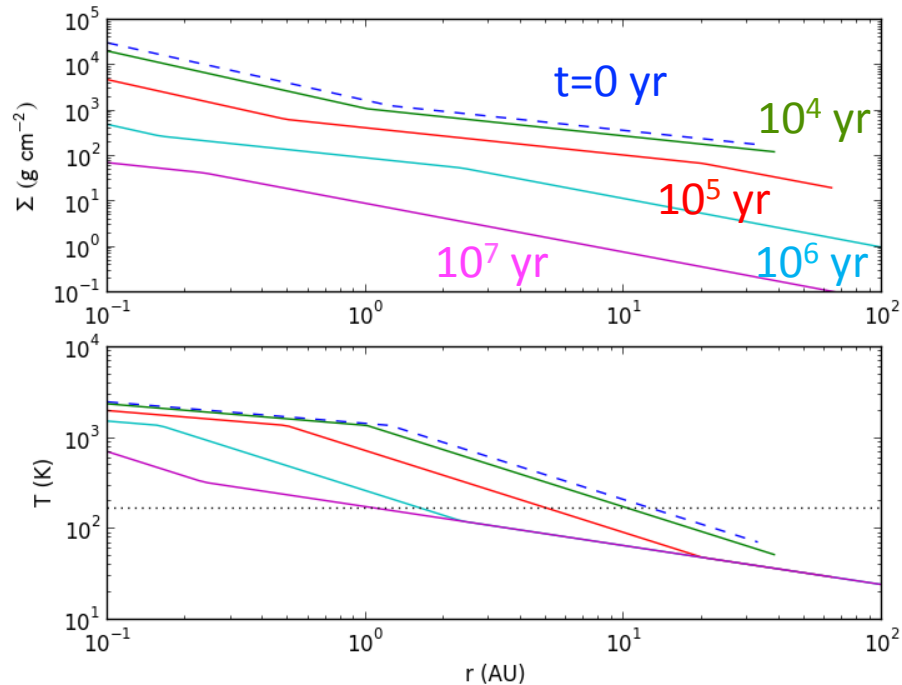
# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

[Bond, Lauretta, & O'Brien \(2010\)](#): 14種の基本的な岩石形成元素 (C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni) + H, He が 太陽の光球 (solar photosphere) における割合で存在すると仮定。

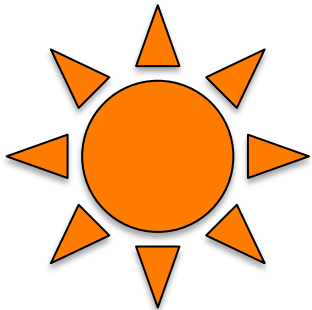
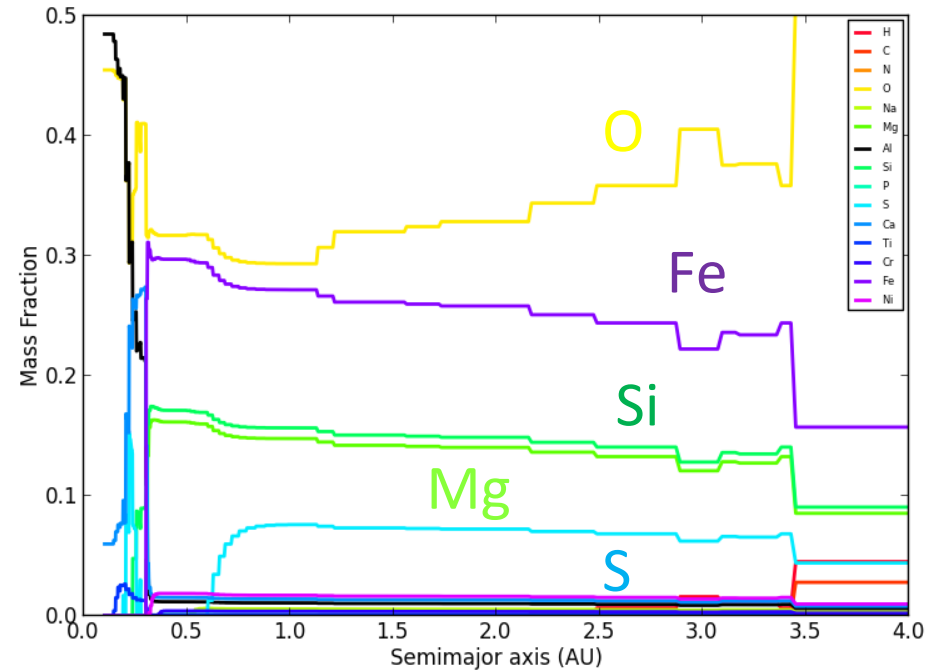
[HSC chemistry](#): 系のギブズの自由エネルギーを最小化して平衡状態における化学成分を計算する。

# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

Chambers (2009)



Matsumura, Brasser, & Ida (2016)

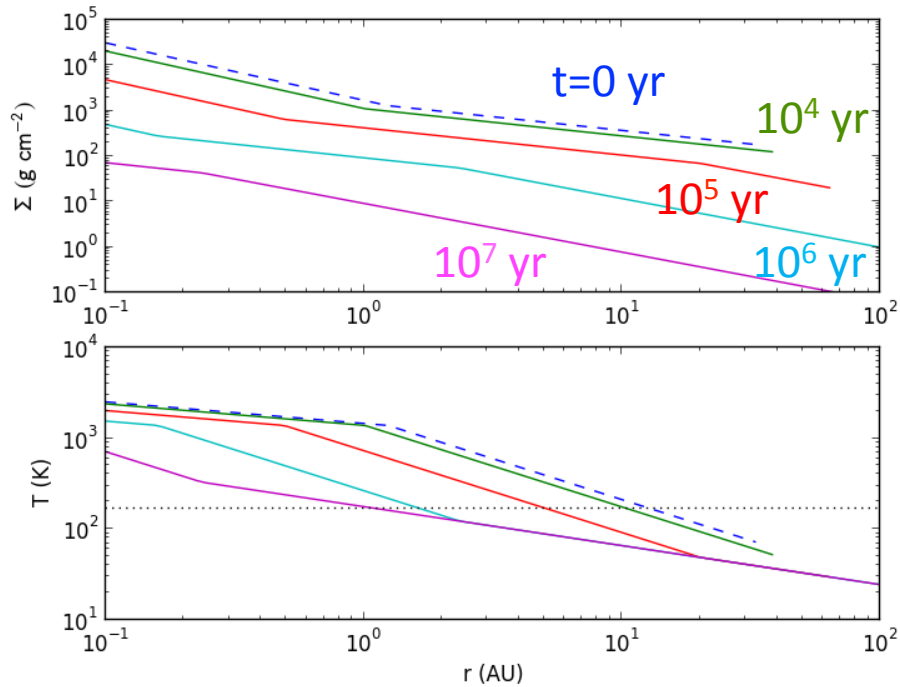


T & P decrease.

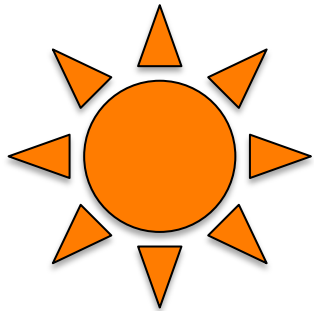
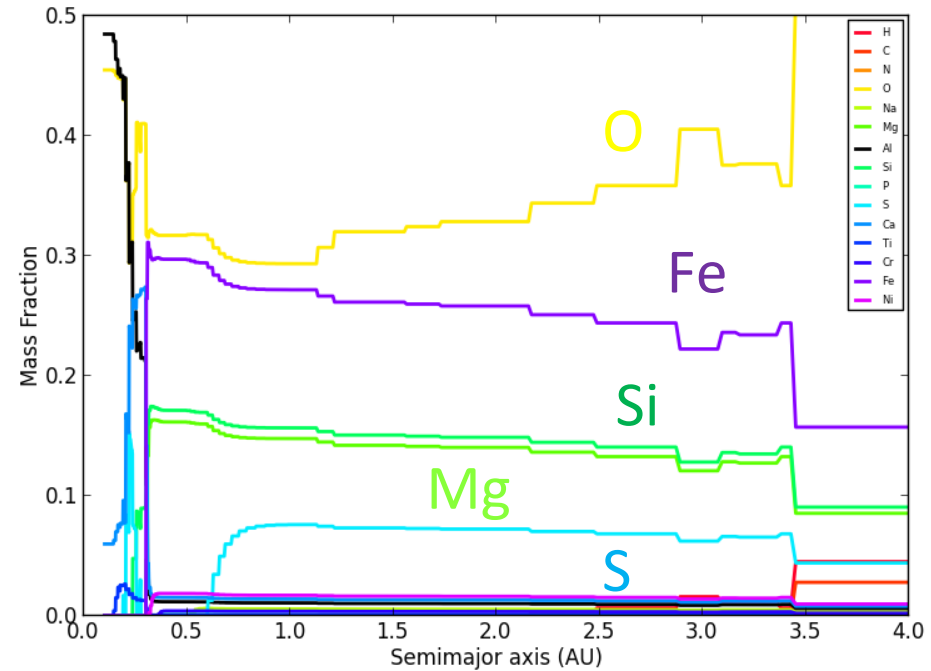


# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

Chambers (2009)



Matsumura, Brasser, & Ida (2016)

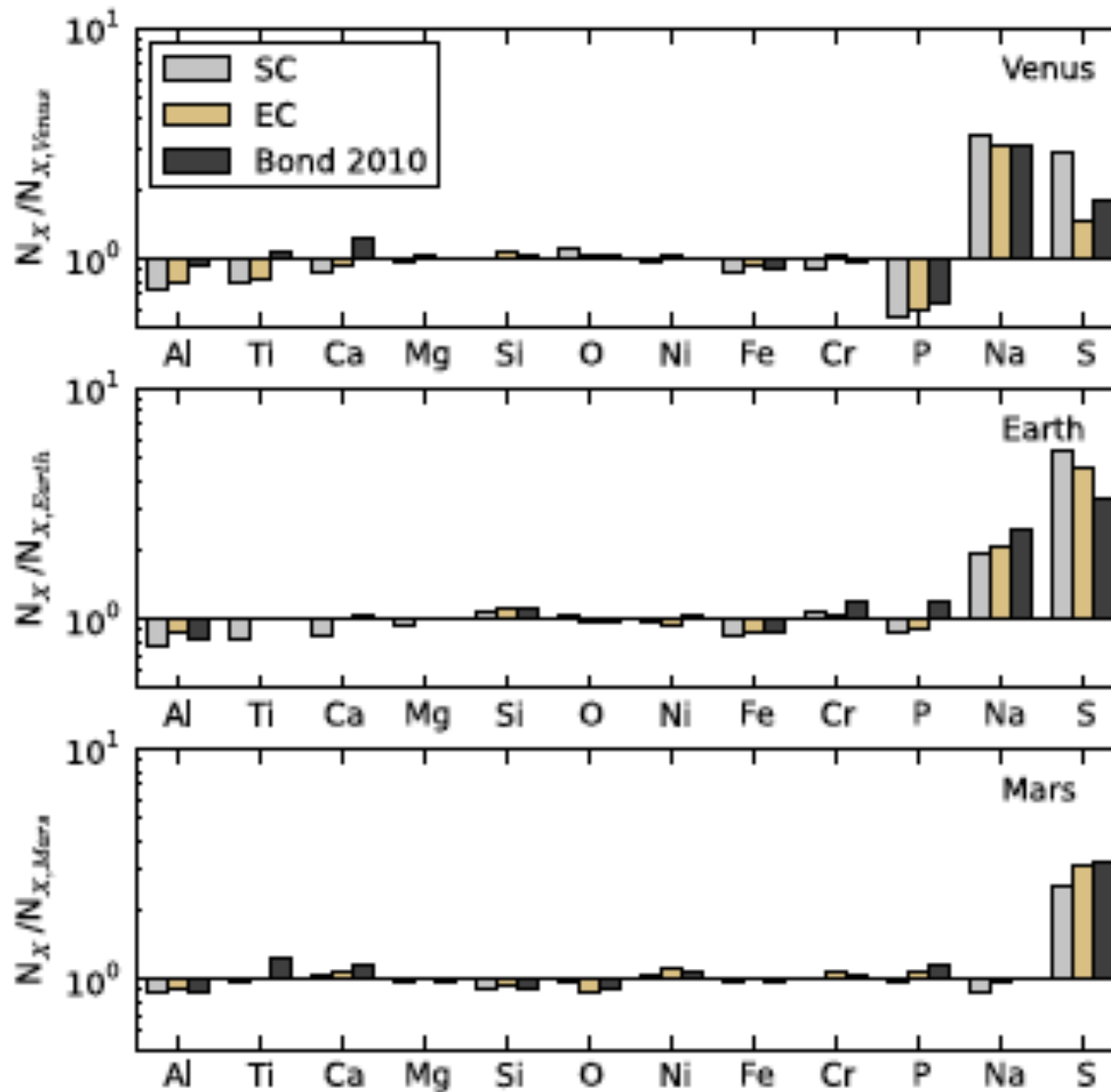


Planetesimals

Embryos

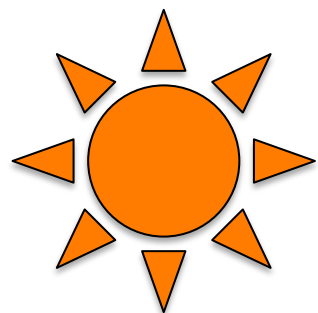


# 凝縮モデルと元素組成



Moriarty et al. (2014)  
Bond et al. (2010)

# 古典的惑星形成モデル (Classical Planet Formation Model)



Planetesimals

Embryos

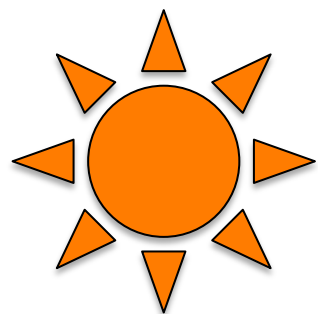
Jupiter

Saturn



巨大惑星は現在の軌道を取ると仮定。

## Grand Tack Model (Walsh et al. 2011)



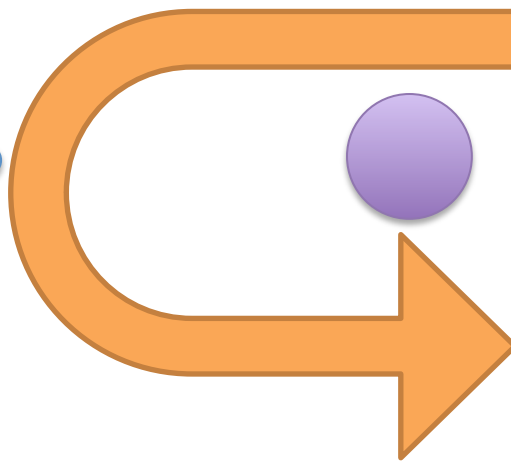
Planetesimals

Embryos



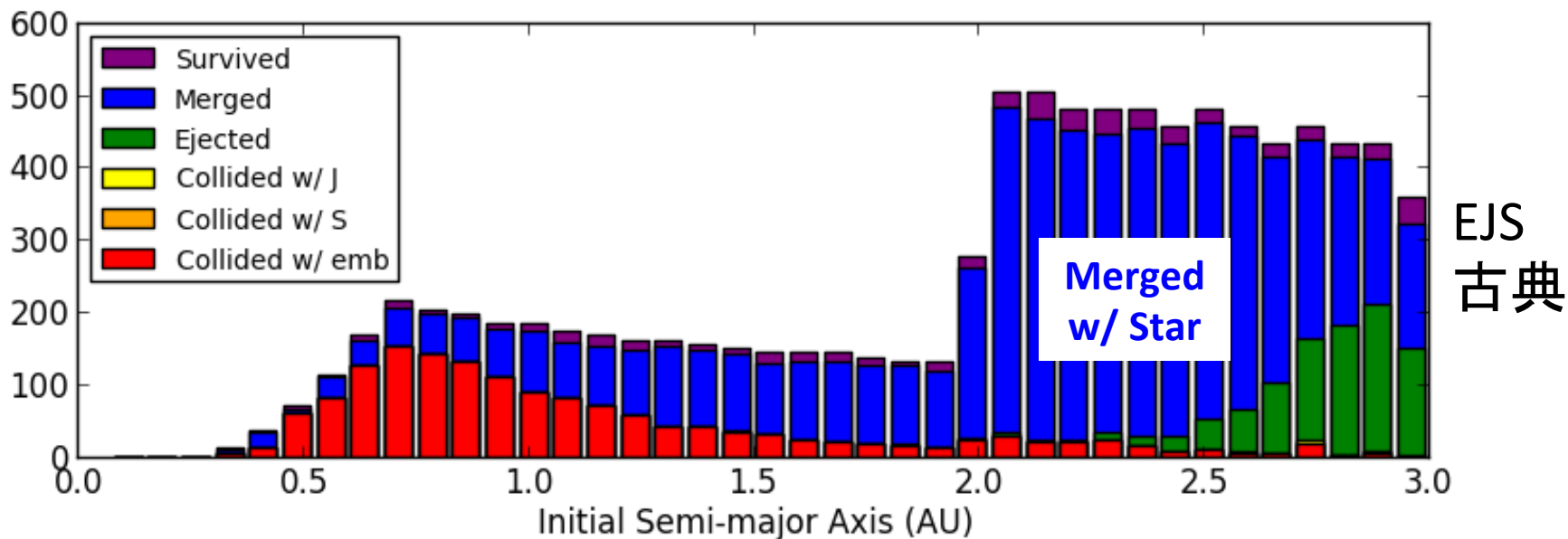
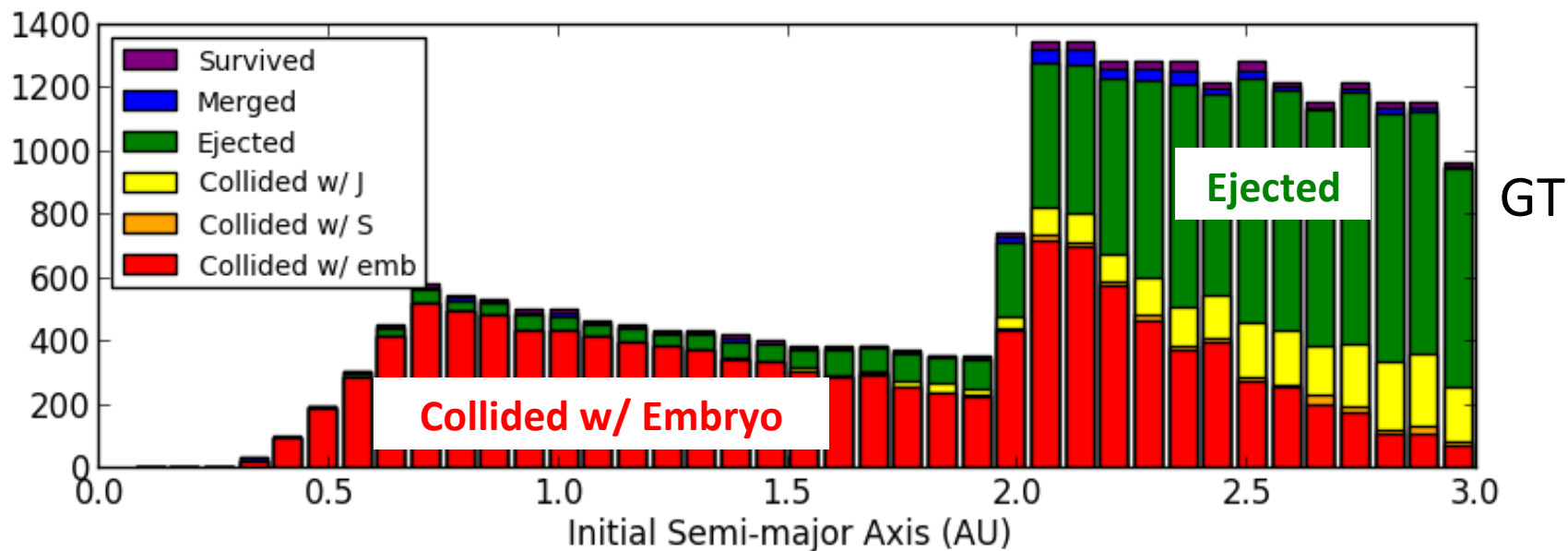
Jupiter

Saturn

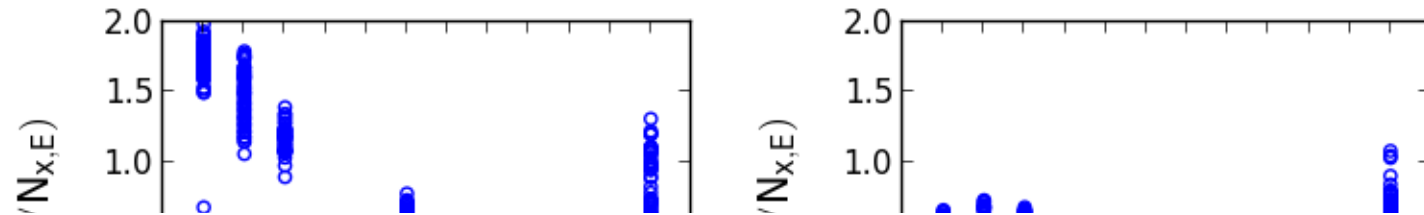




# Planetesimals の運命



# 地球と比べた Grand Tack Model の惑星の元素組成

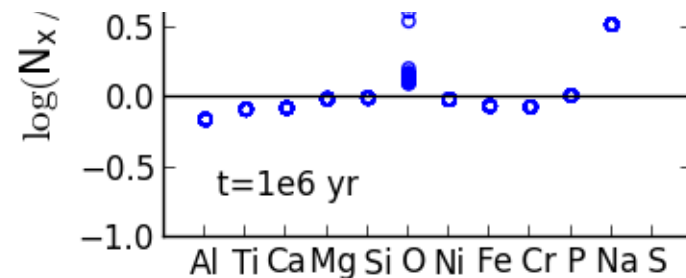
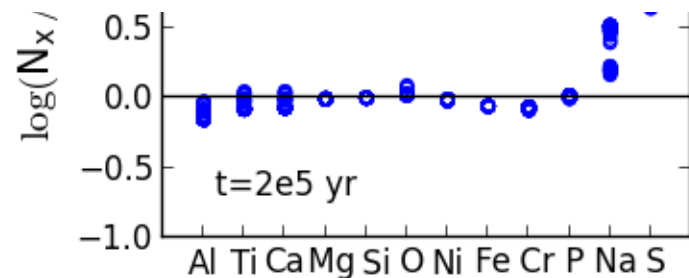


- 地球の難揮発性 (refractory) の元素組成は古典的モデルでも Grand Tack モデルでも説明できる。

Al Ti Ca Mg Si O Ni Fe Cr P Na S

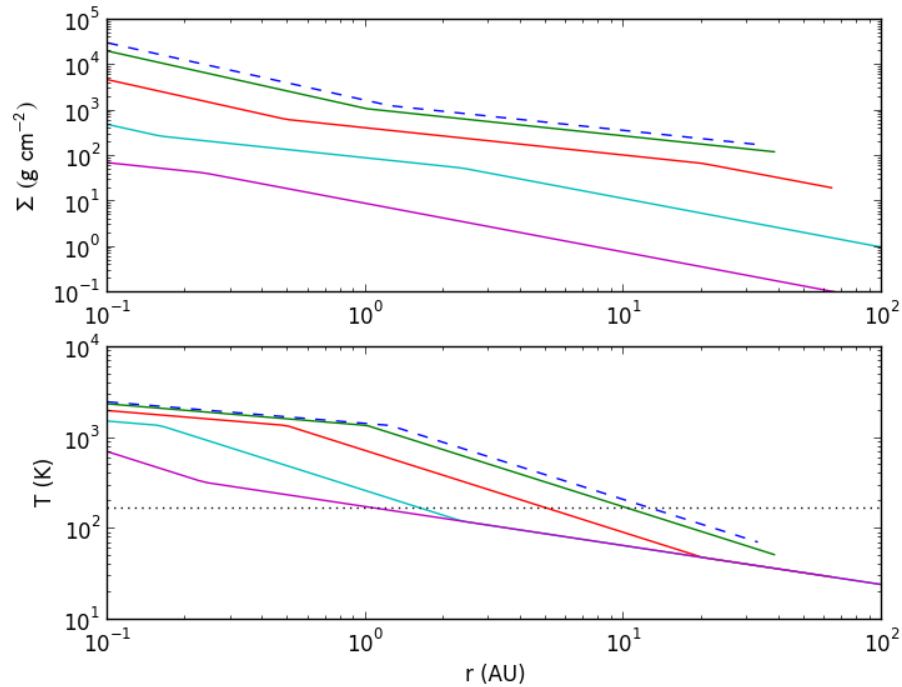
Al Ti Ca Mg Si O Ni Fe Cr P Na S

- 難揮発性の元素組成は初期円盤の状態に強く依存しない (e.g., Bond et al. 2010)。

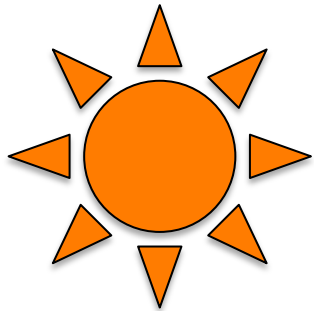
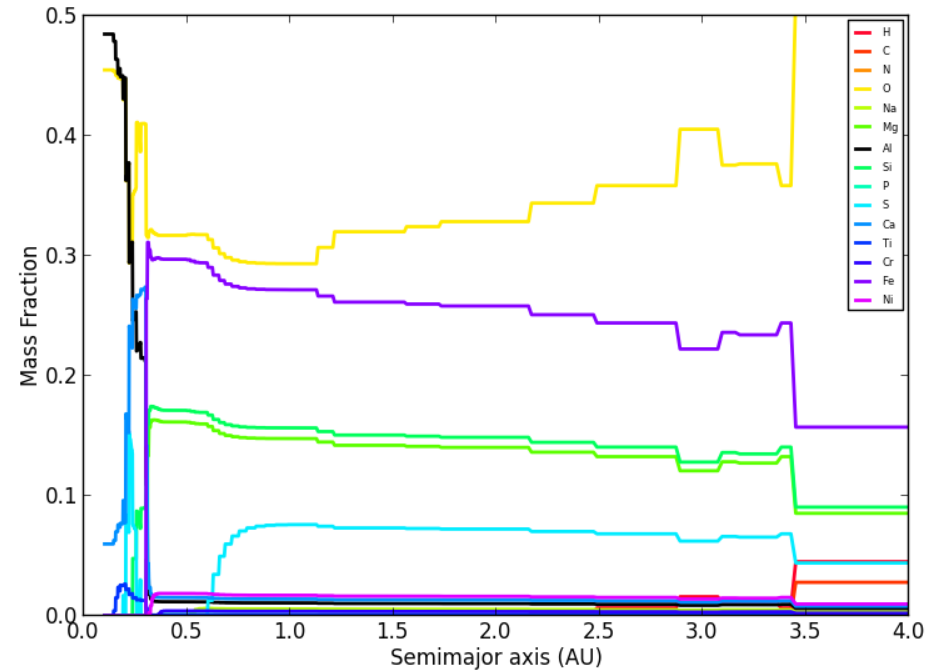


# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

Chambers (2009)



Matsumura, Brasser, & Ida (2016)



Planetesimals

Embryos

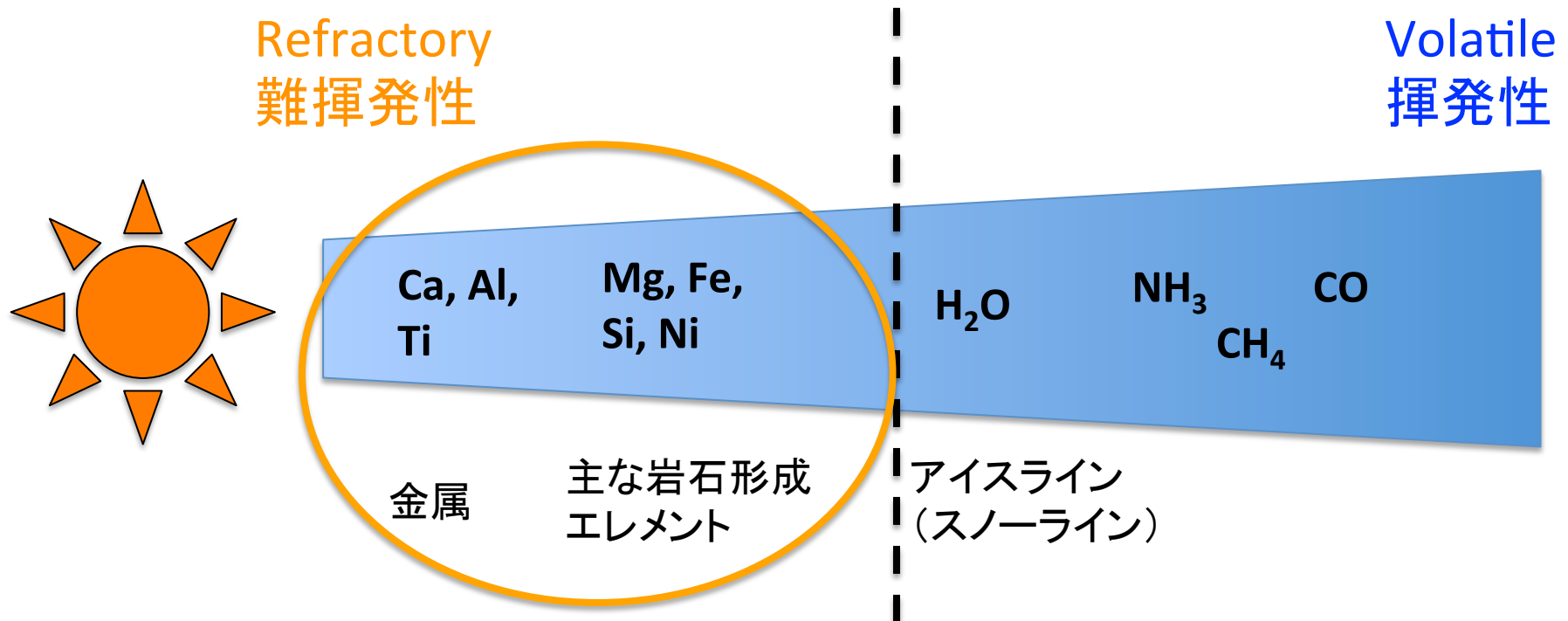




# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

Cassen (1996, 2001)

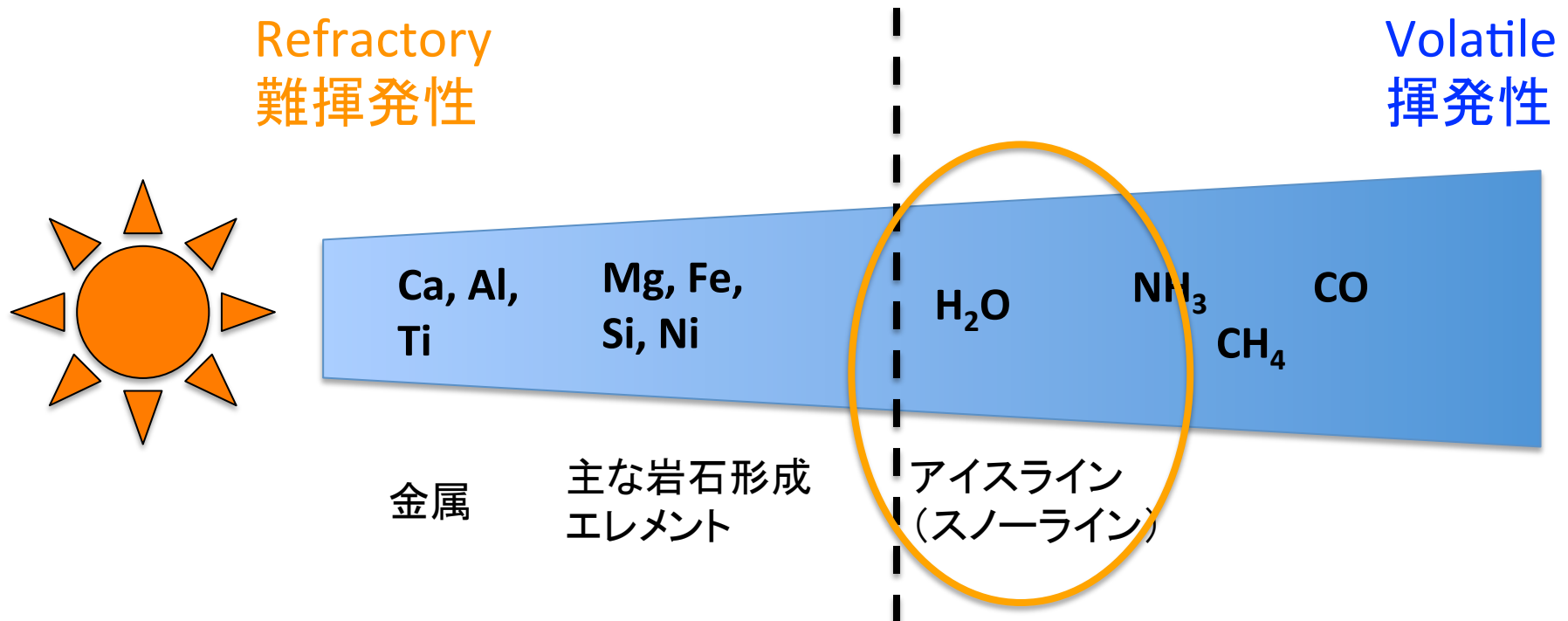
仮説: 惑星を形成する材料は原始惑星系円盤 (protoplanetary disks) が初期の高温の状態から冷える過程で作られる。



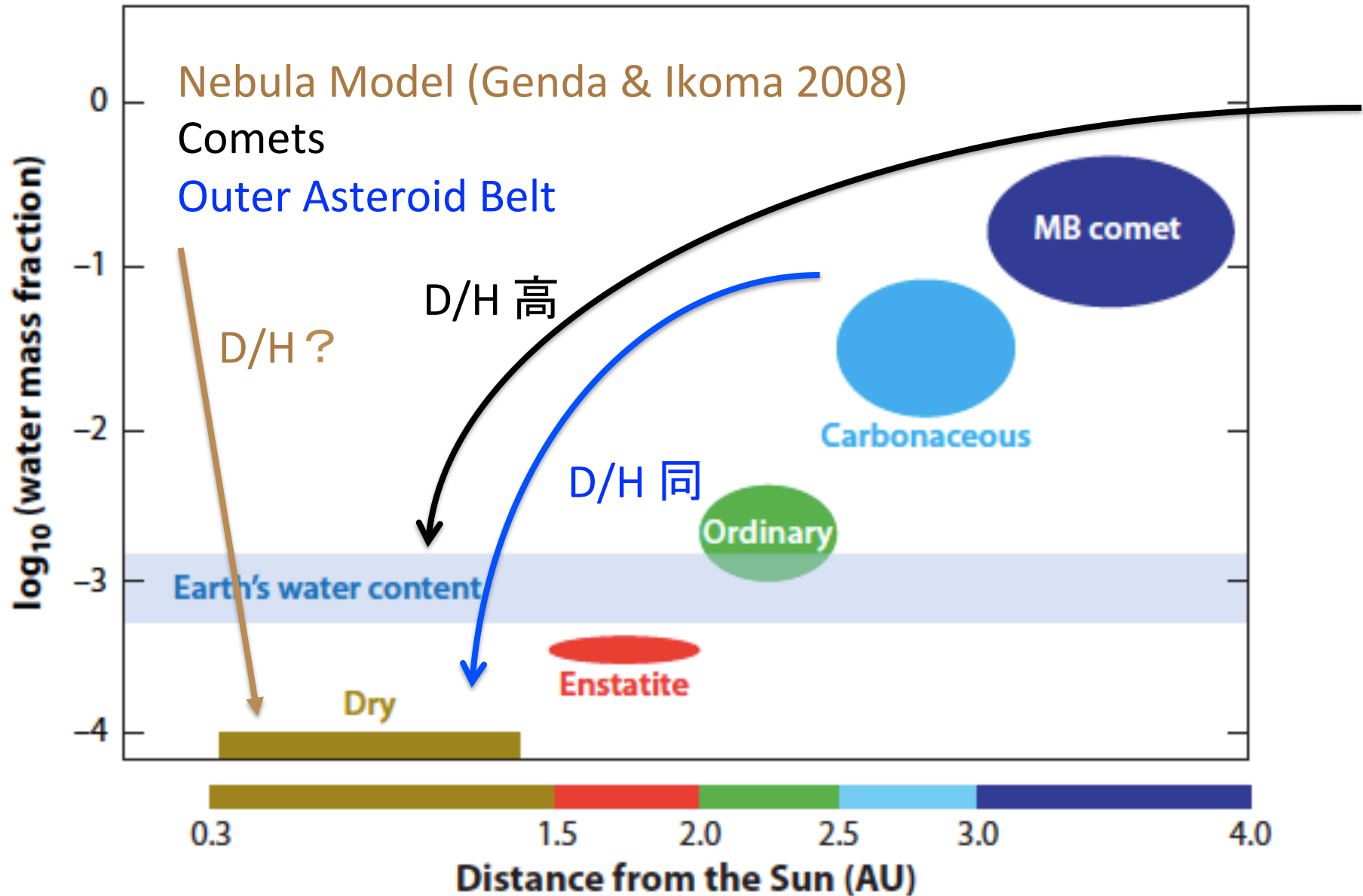
# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

Cassen (1996, 2001)

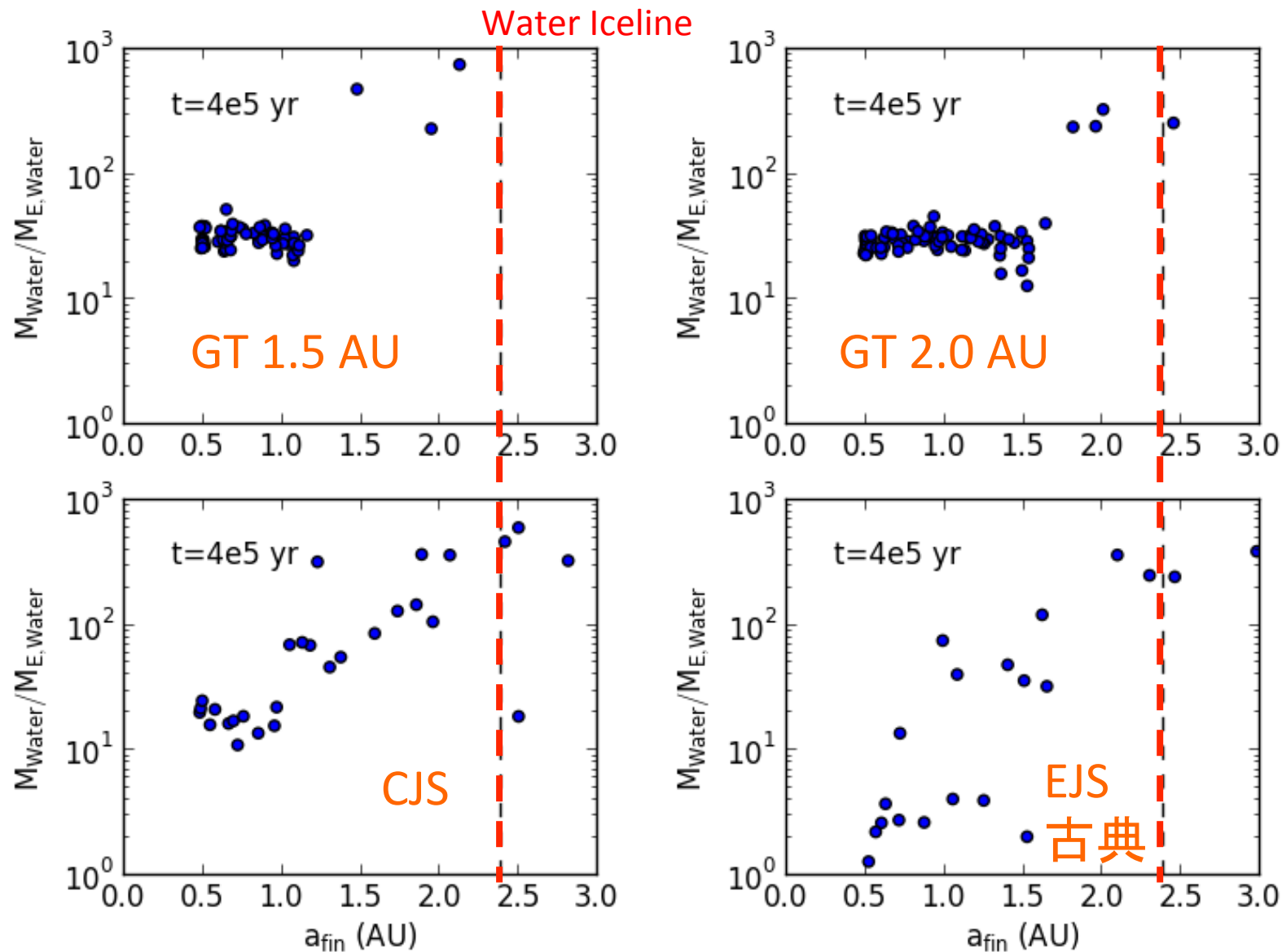
仮説: 惑星を形成する材料は原始惑星系円盤 (protoplanetary disks) が初期の高温の状態から冷える過程で作られる。



# 水はどこから来たか？



# 水はどこから来たか？

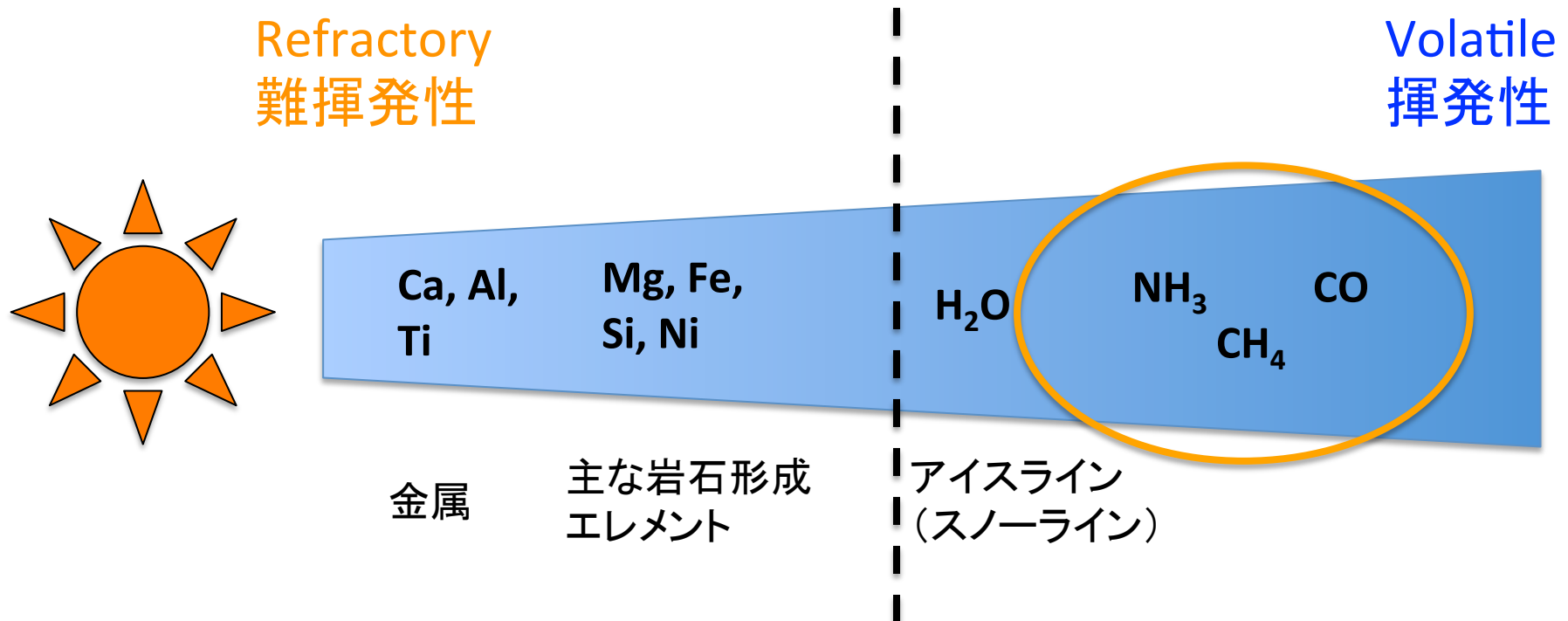




# 平衡凝縮モデル (Equilibrium Condensation Model)

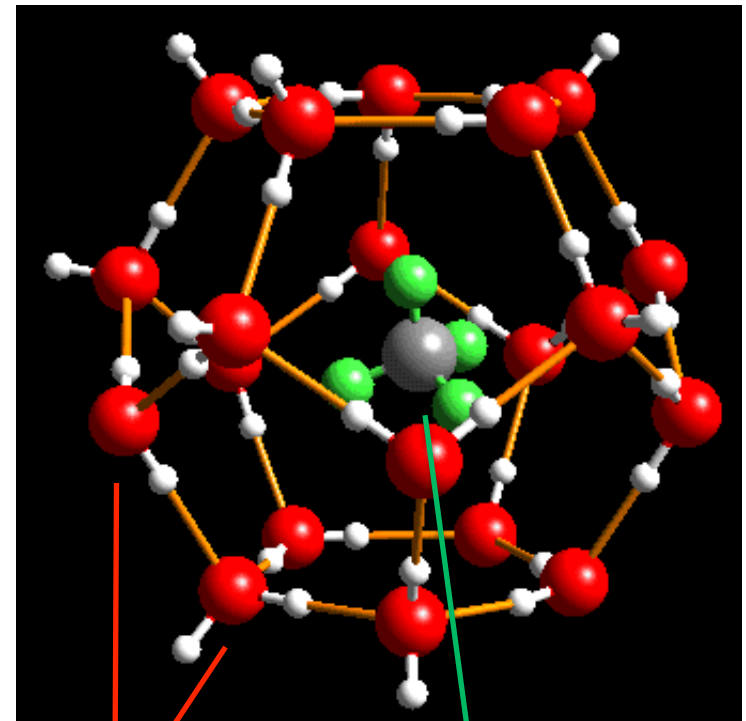
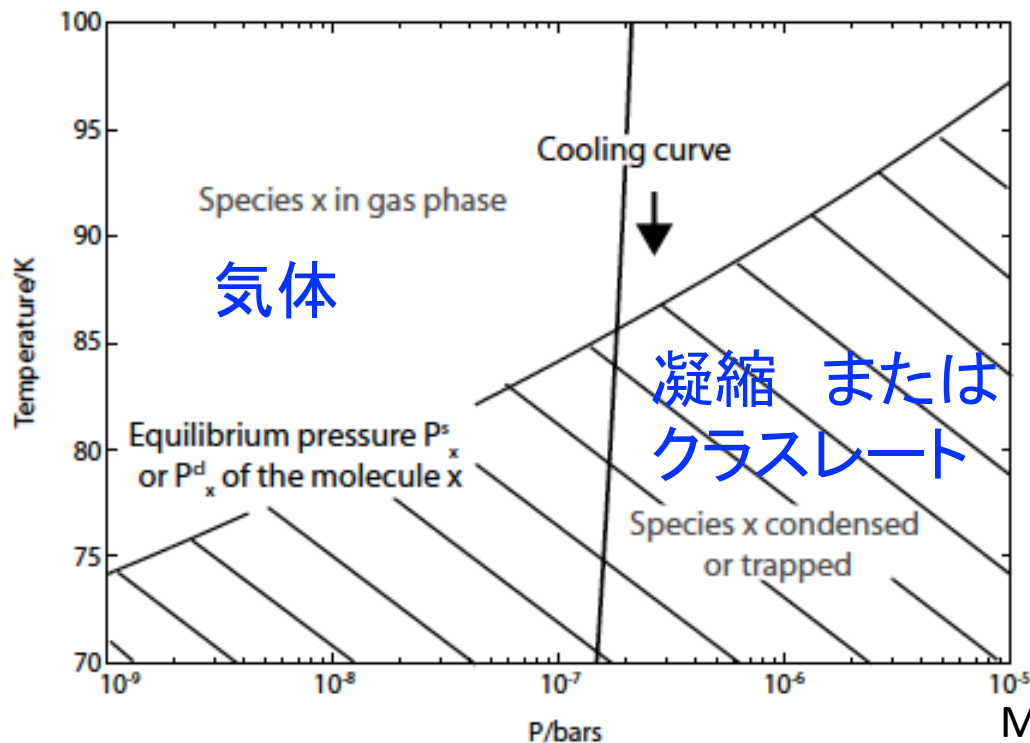
Cassen (1996, 2001)

仮説: 惑星を形成する材料は原始惑星系円盤 (protoplanetary disks) が初期の高温の状態から冷える過程で作られる。



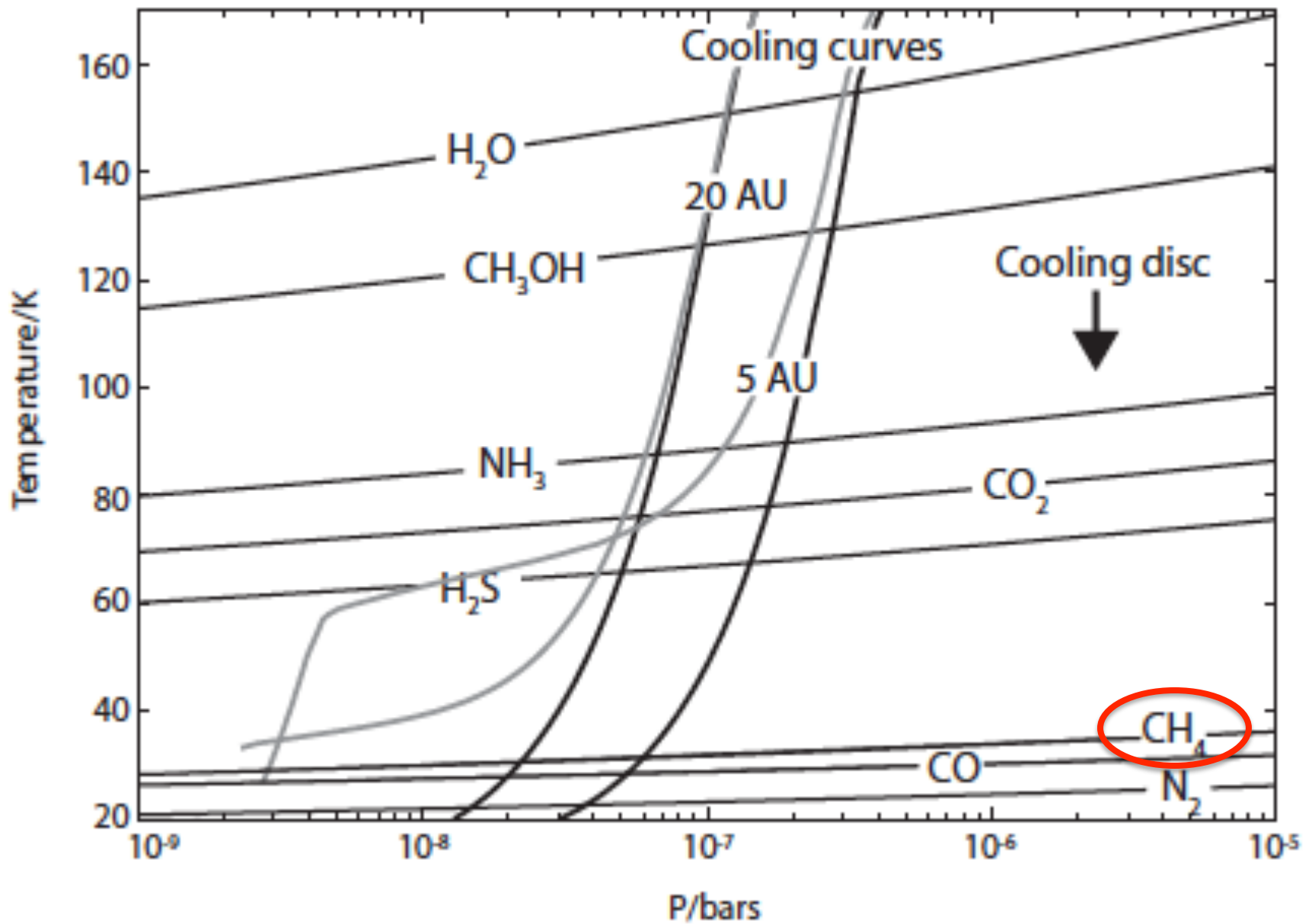
# クラスレート (clathrates)

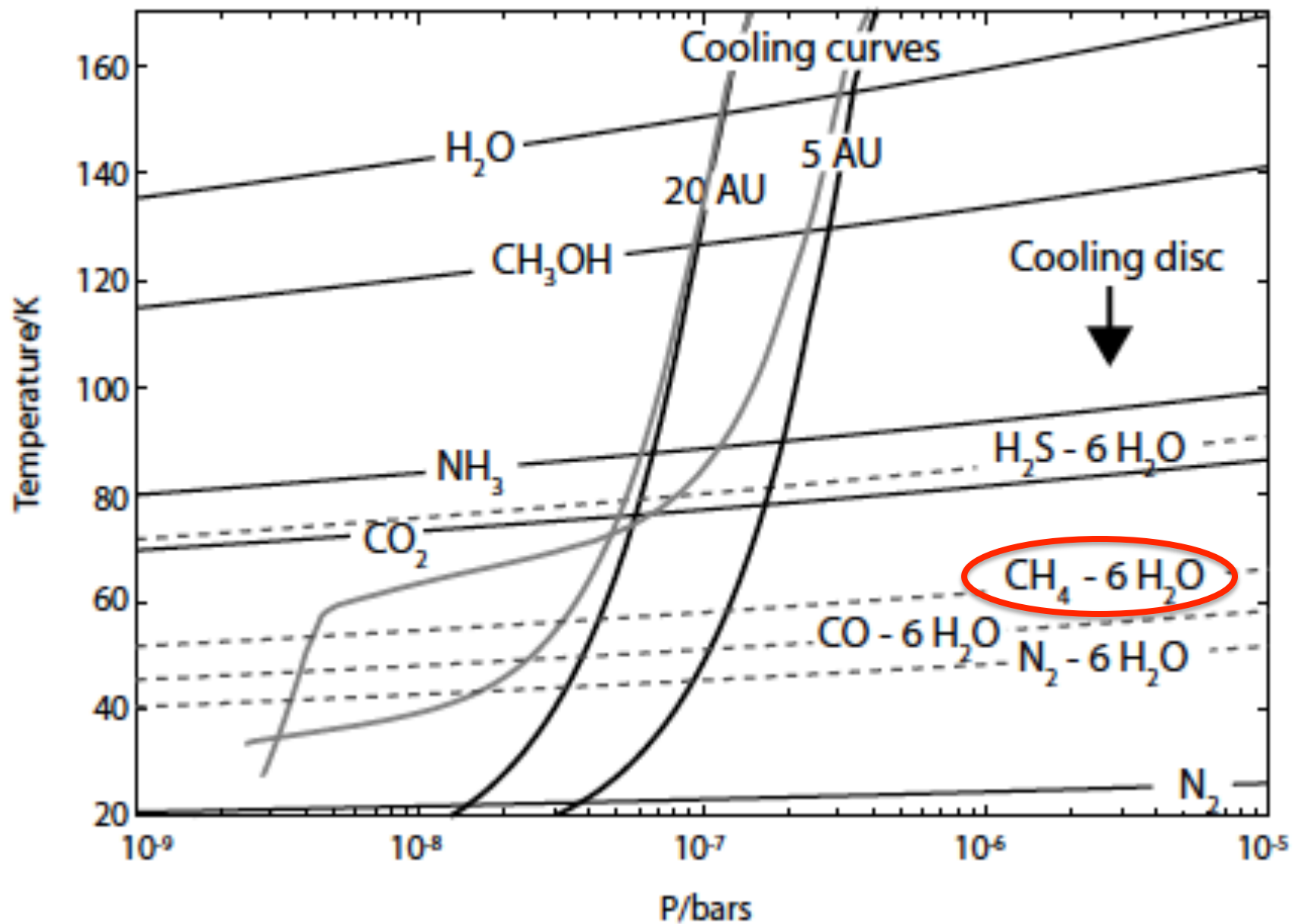
クラスレート: 結晶格子によって作られた檻の中に気体分子が取り込まれて安定に存在するもの。



水 ( $\text{H}_2\text{O}$ )

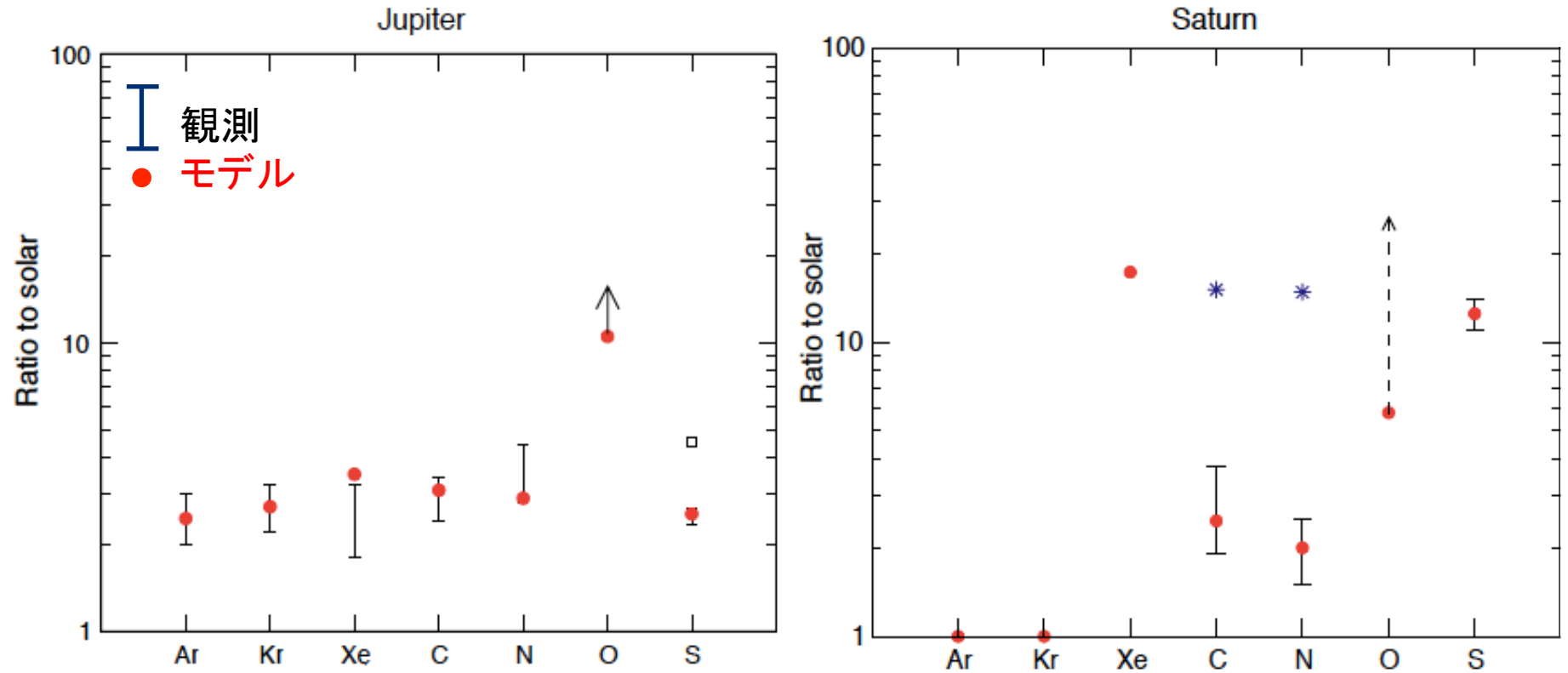
メタン ( $\text{CH}_4$ )



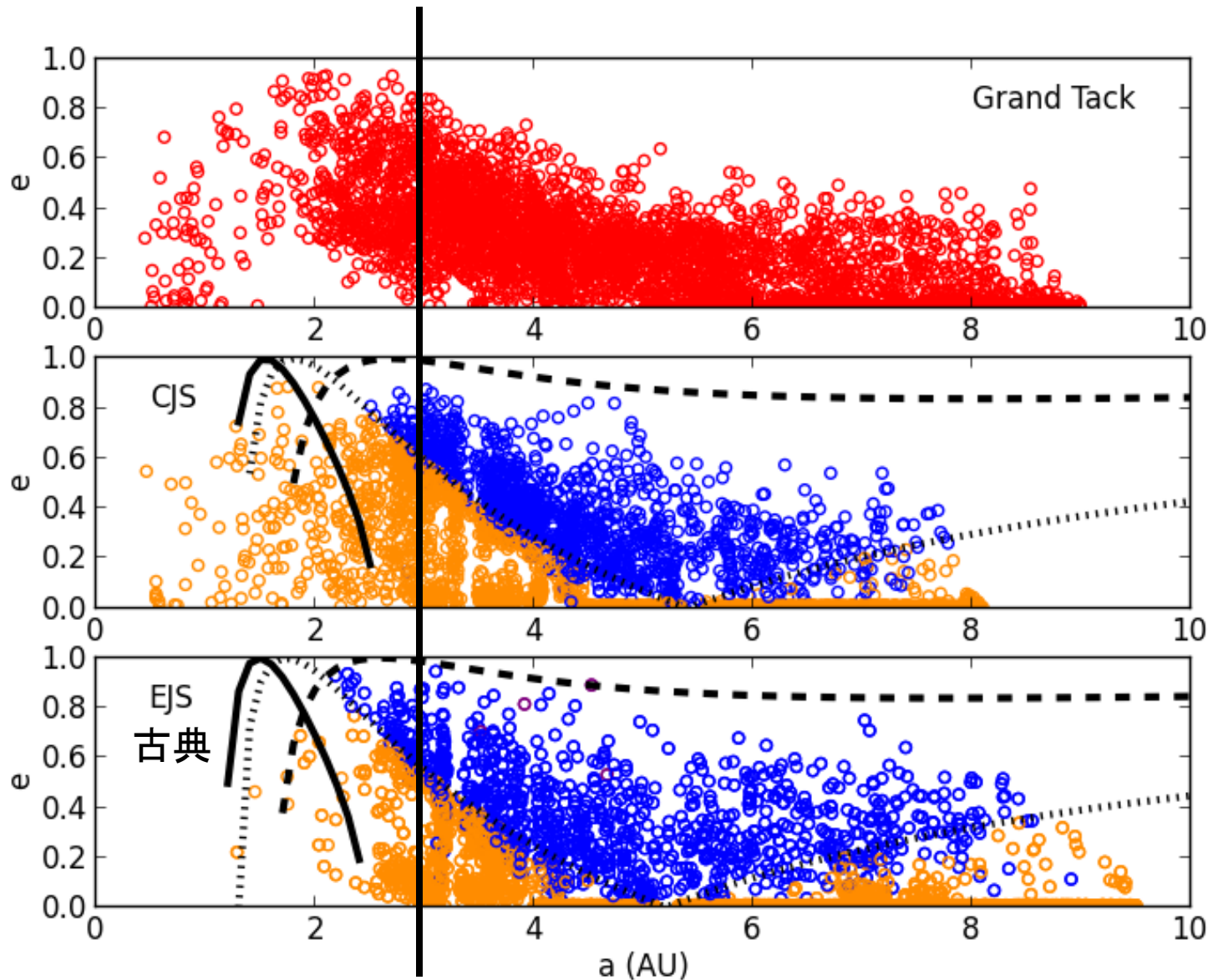




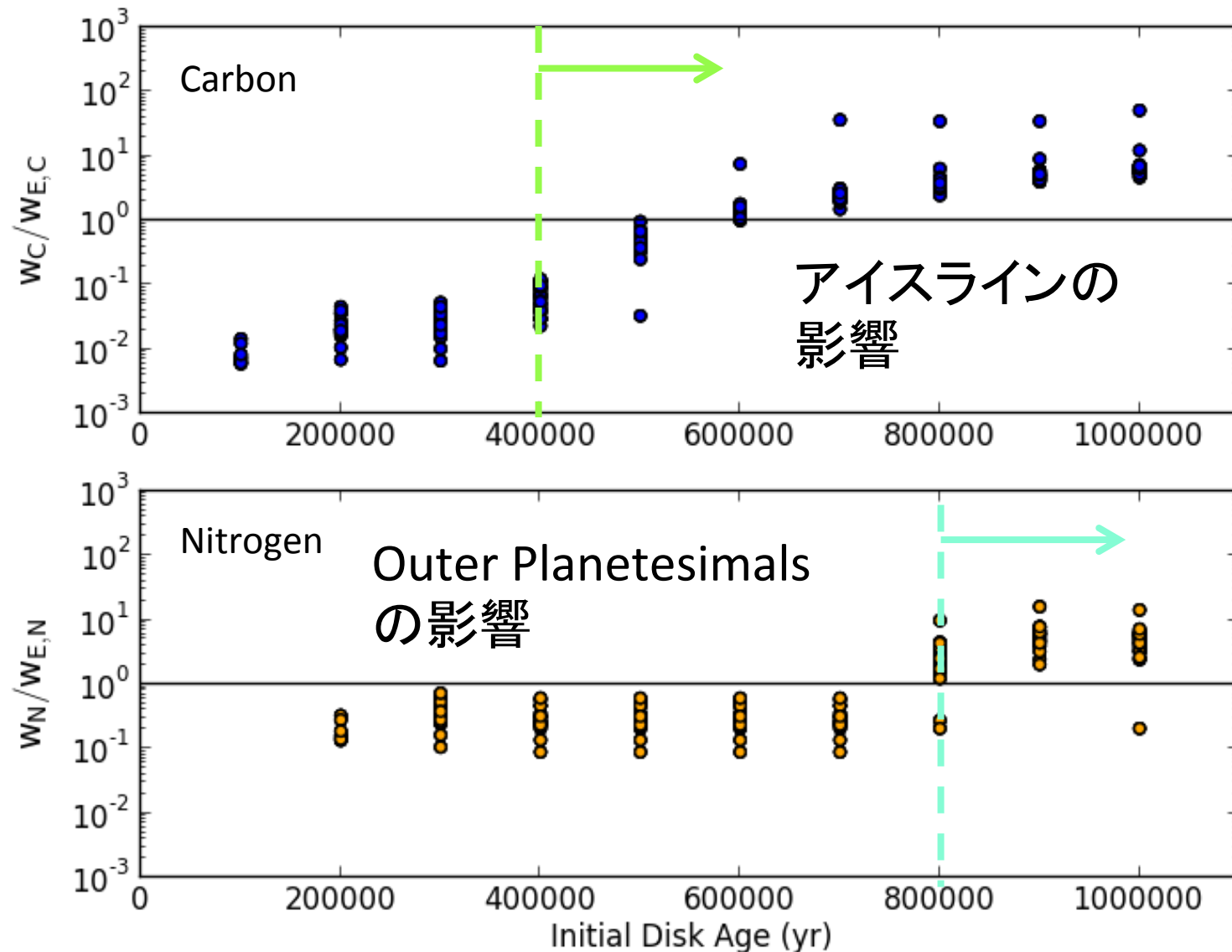
# 木星と土星の揮発性元素



# Outer Planetesimals の分布 (100 Myr)



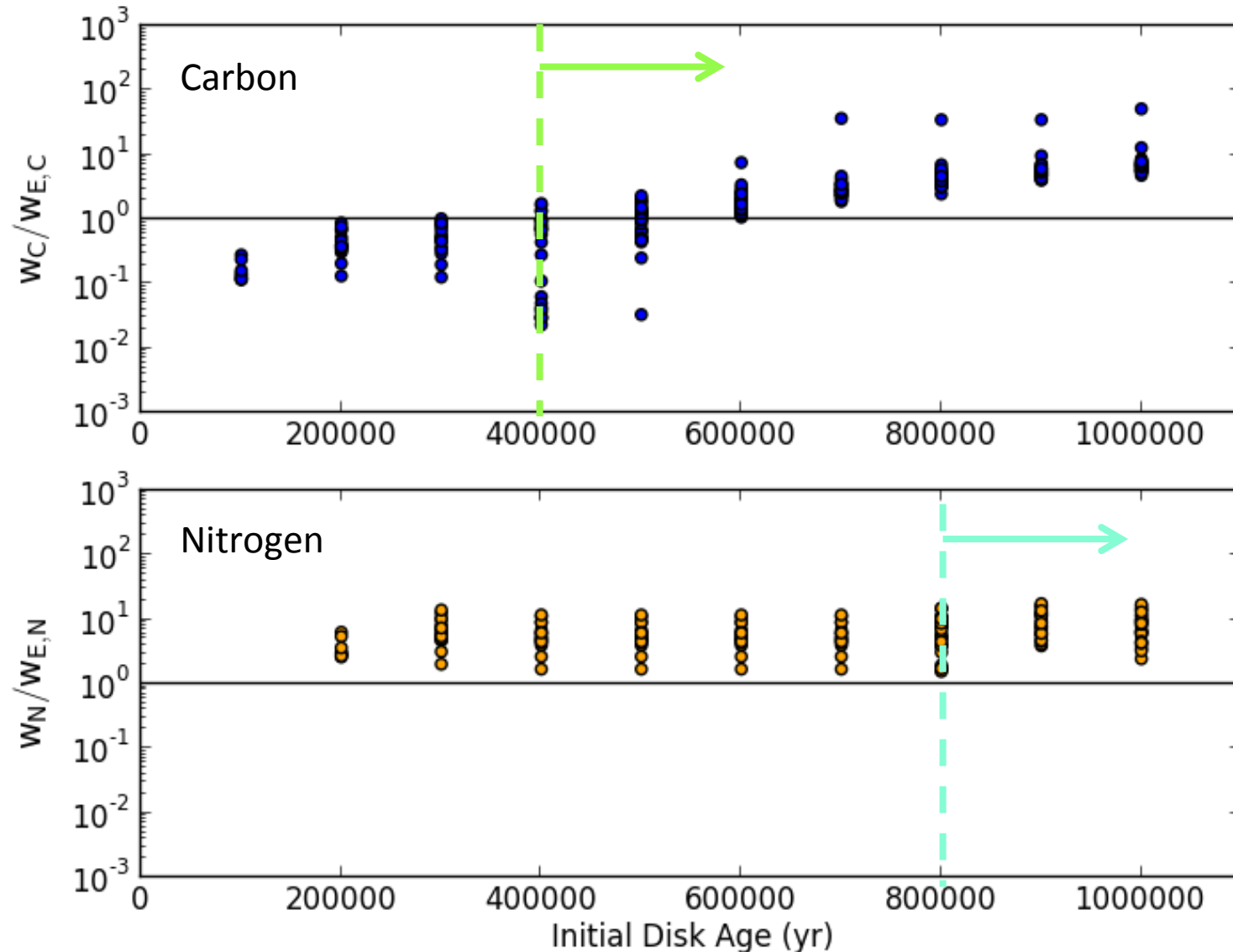
# Delivery of Biogenic Species: Grand Tack



# Higher Planetesimal Masses?

$$m_{\text{plsm}} = 1.2 \times 10^{-4} M_E$$

→  $2.3 \times 10^{-3} M_E$



# その他

- Late Veneer
- より正確なモデル
  - Sequential Condensation
  - Presolar Grains, Organics
  - Volatile Loss
- 系外惑星への応用

Fabrycky, Lissauer, & Ragozzine et al. 2012

KOI Number

