

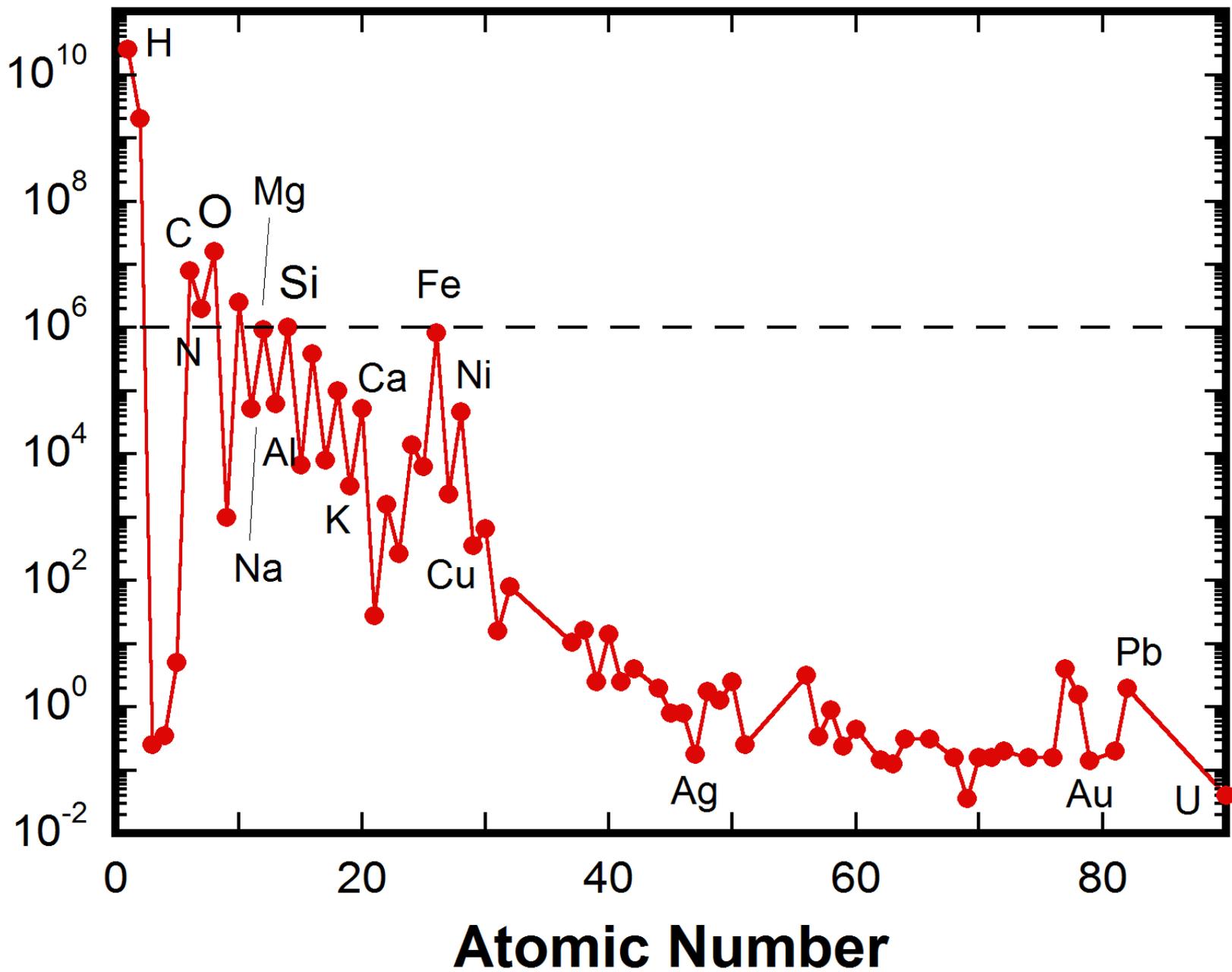
# 物質科学

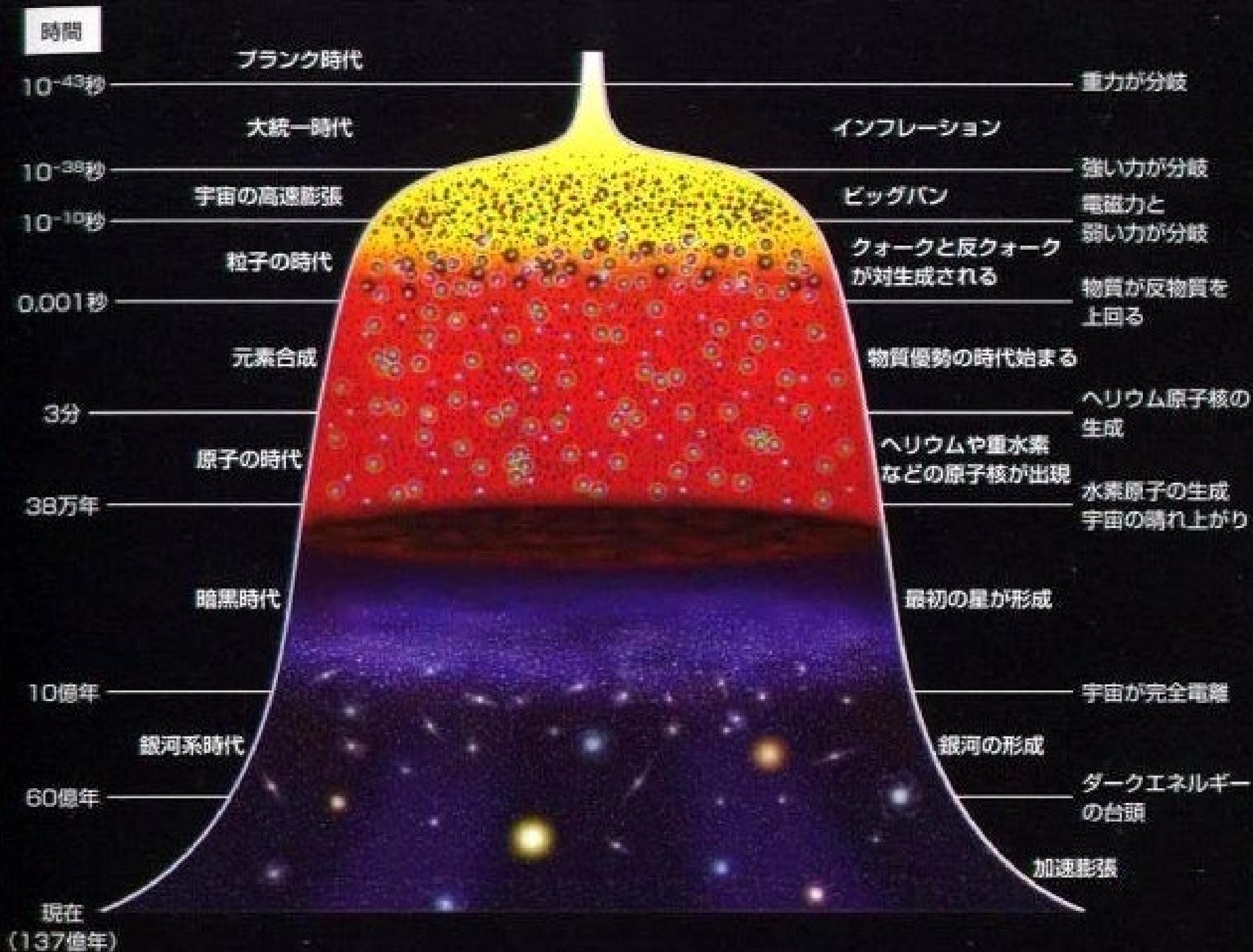
地球をつくる物質の構造 (2)

## 鉱物と岩石

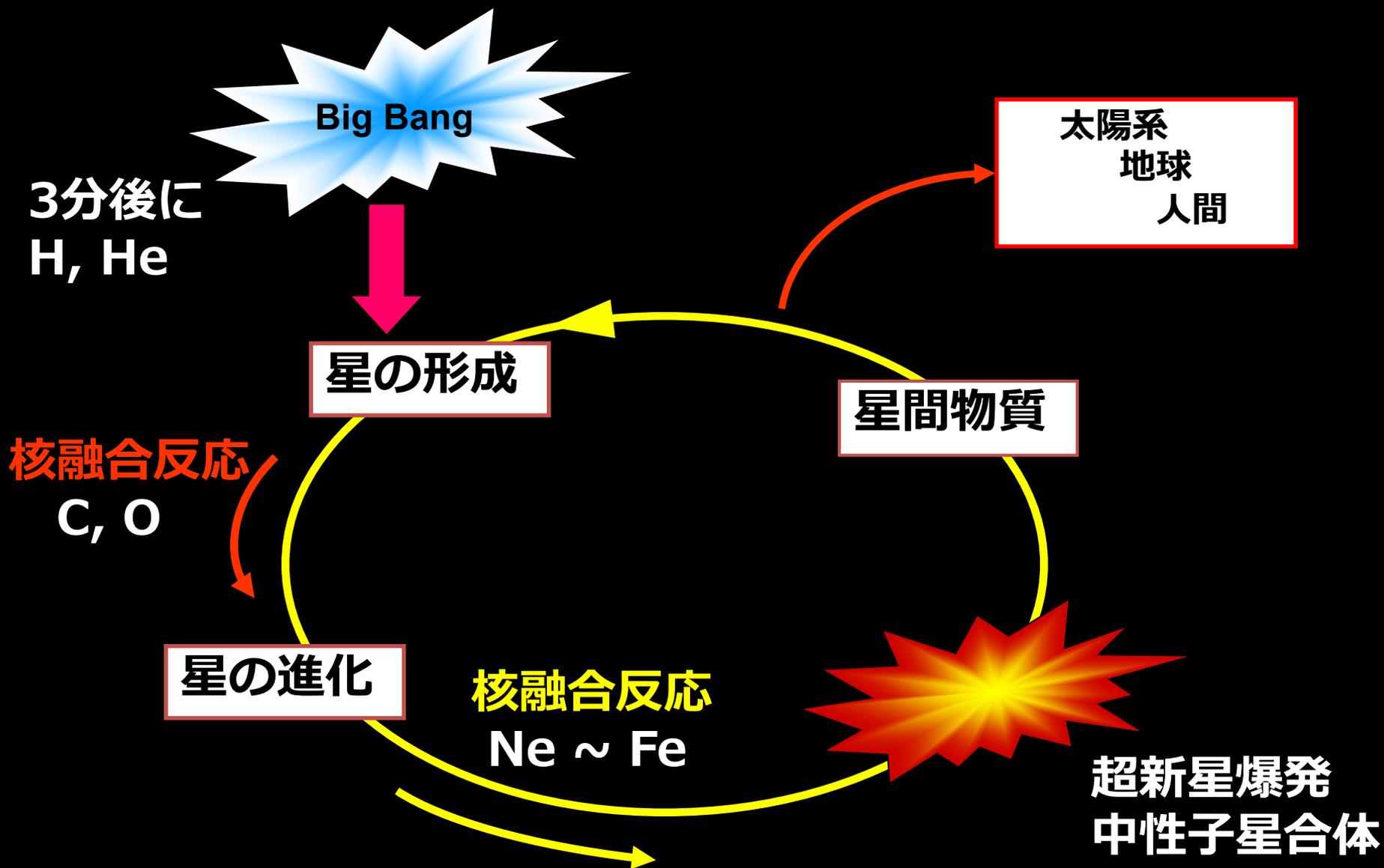
渡邊 (2019/7/3)

Relative Abundance (Si=10<sup>6</sup>)



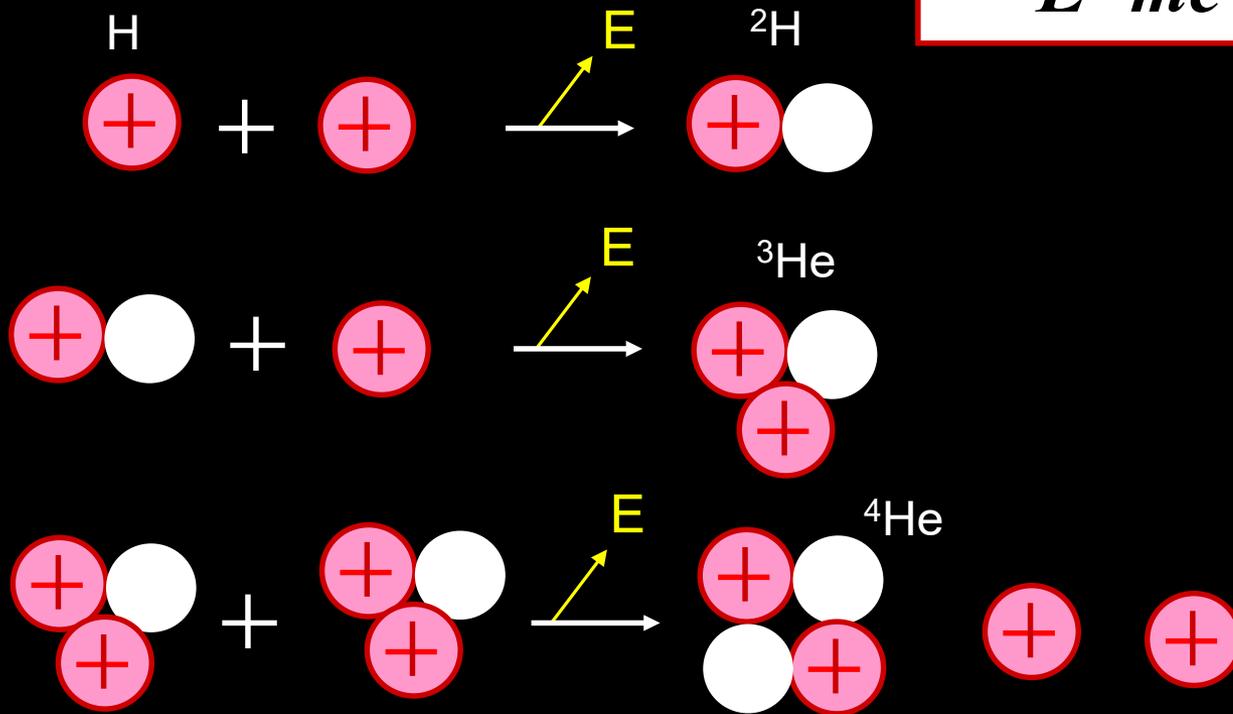
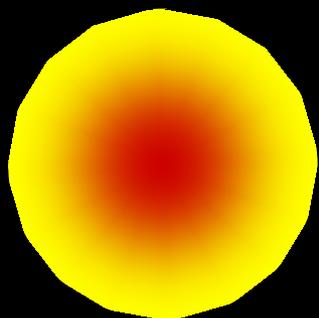


# 宇宙での元素合成サイクル



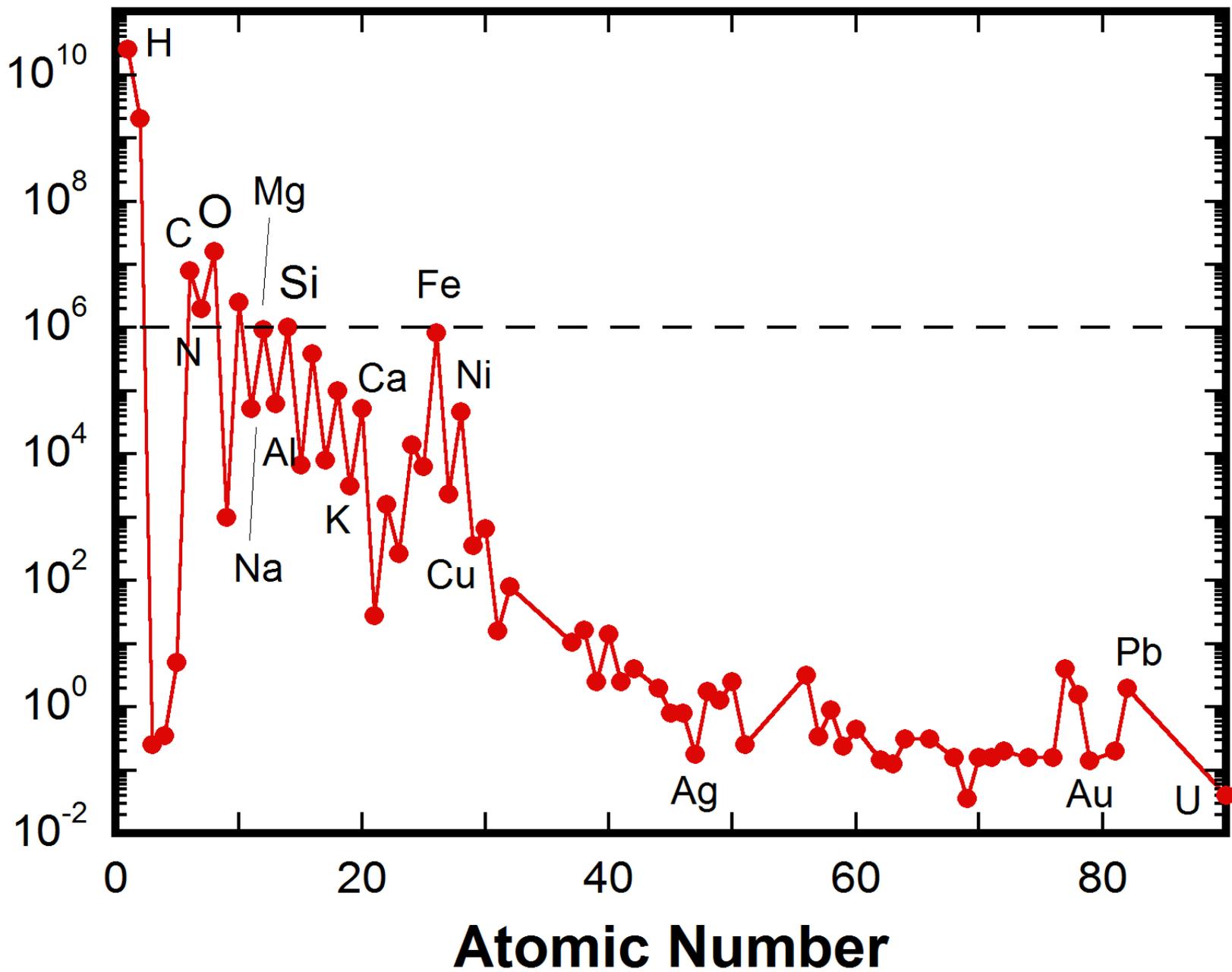
# 水素一ヘリウム核融合反応

中心部 T=1000万K



$$E=mc^2$$

Relative Abundance (Si=10<sup>6</sup>)



**地球を構成する**

**物質はどんなものか？**

**物質の性質が**

**環境を支配している。**

# 内容

- 1. 太陽系形成時の物質の挙動**
- 2. 大気・海洋・大陸の形成**

# 内容

**1. 太陽系形成時の物質の挙動**

2. 大気・海洋・大陸の形成

**太陽は46億年前に誕生した**

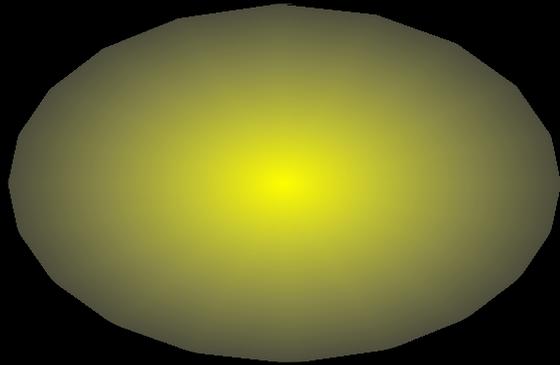
**太陽は46億年前に誕生した**

⇒ **なぜそういえるのか？**



# 太陽の形成

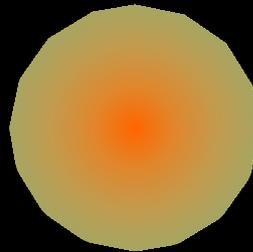
銀河系内の密度のゆらぎ



原始太陽系星雲

重力収縮

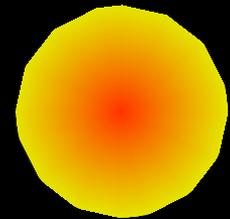
赤外線放射



原始星

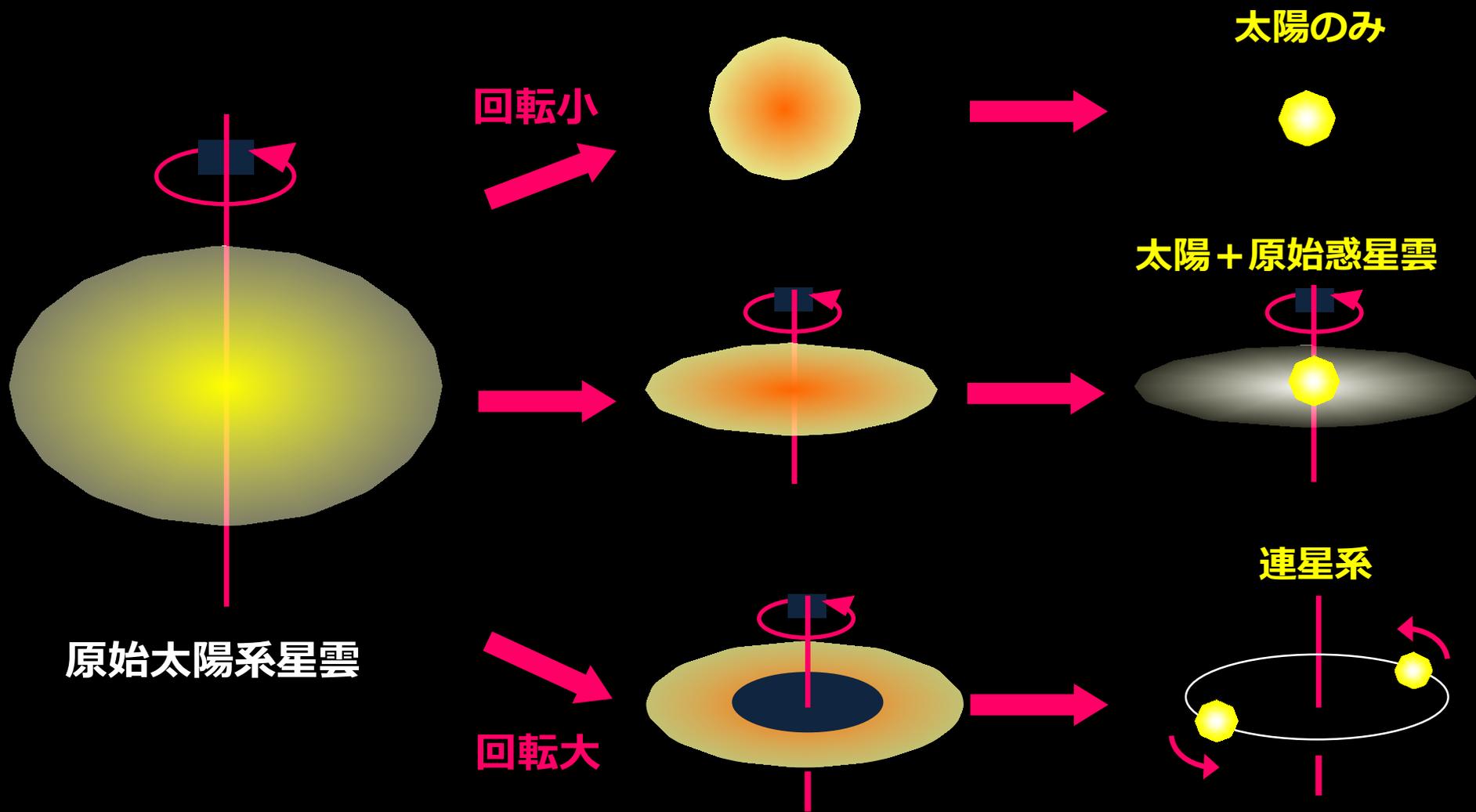
重力収縮

H 燃烧の開始

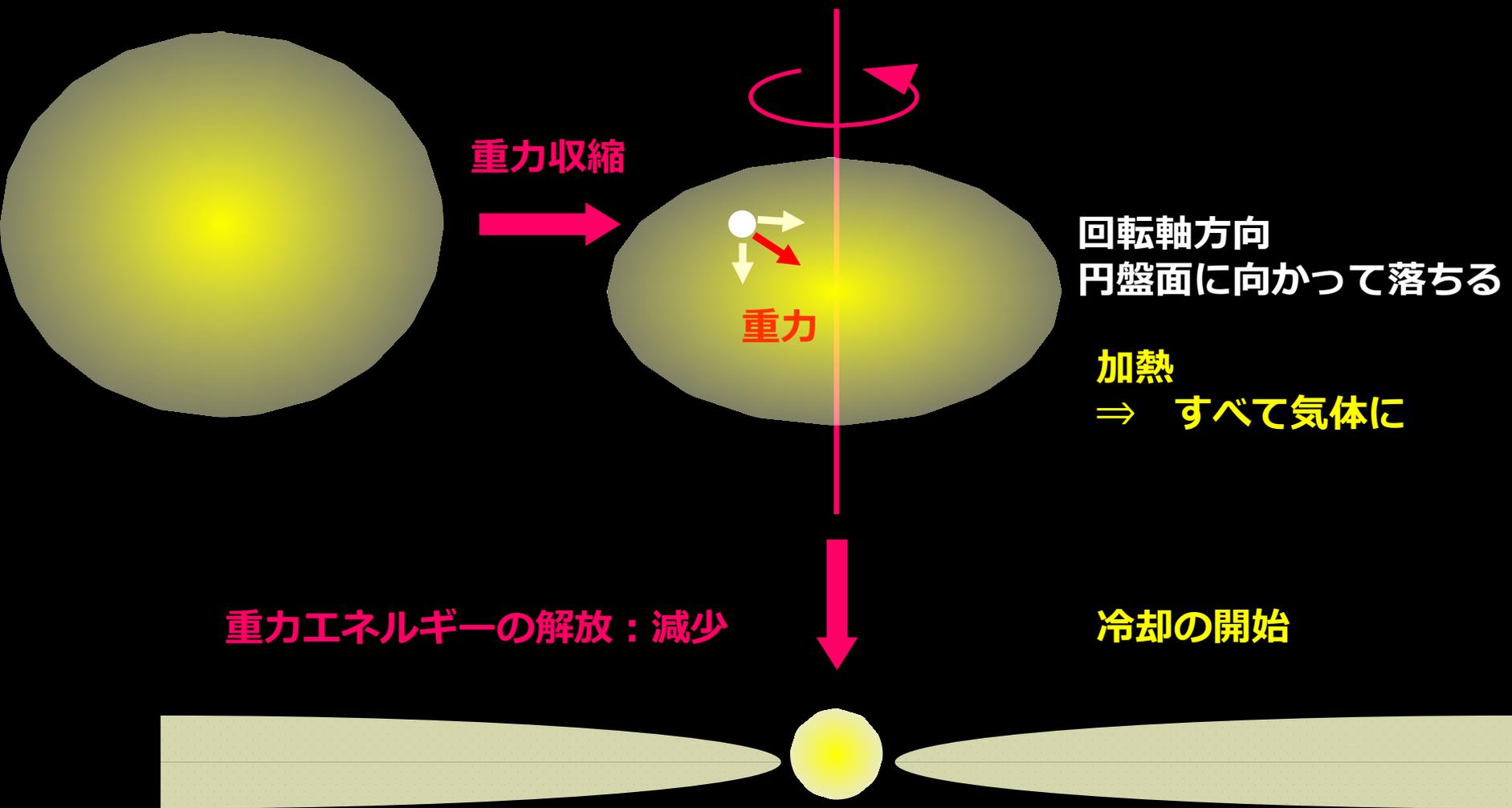


温度上昇  
T=1000万K

# 惑星系の形成 ⇒ 回転がカギ



# 原始太陽系星雲の進化



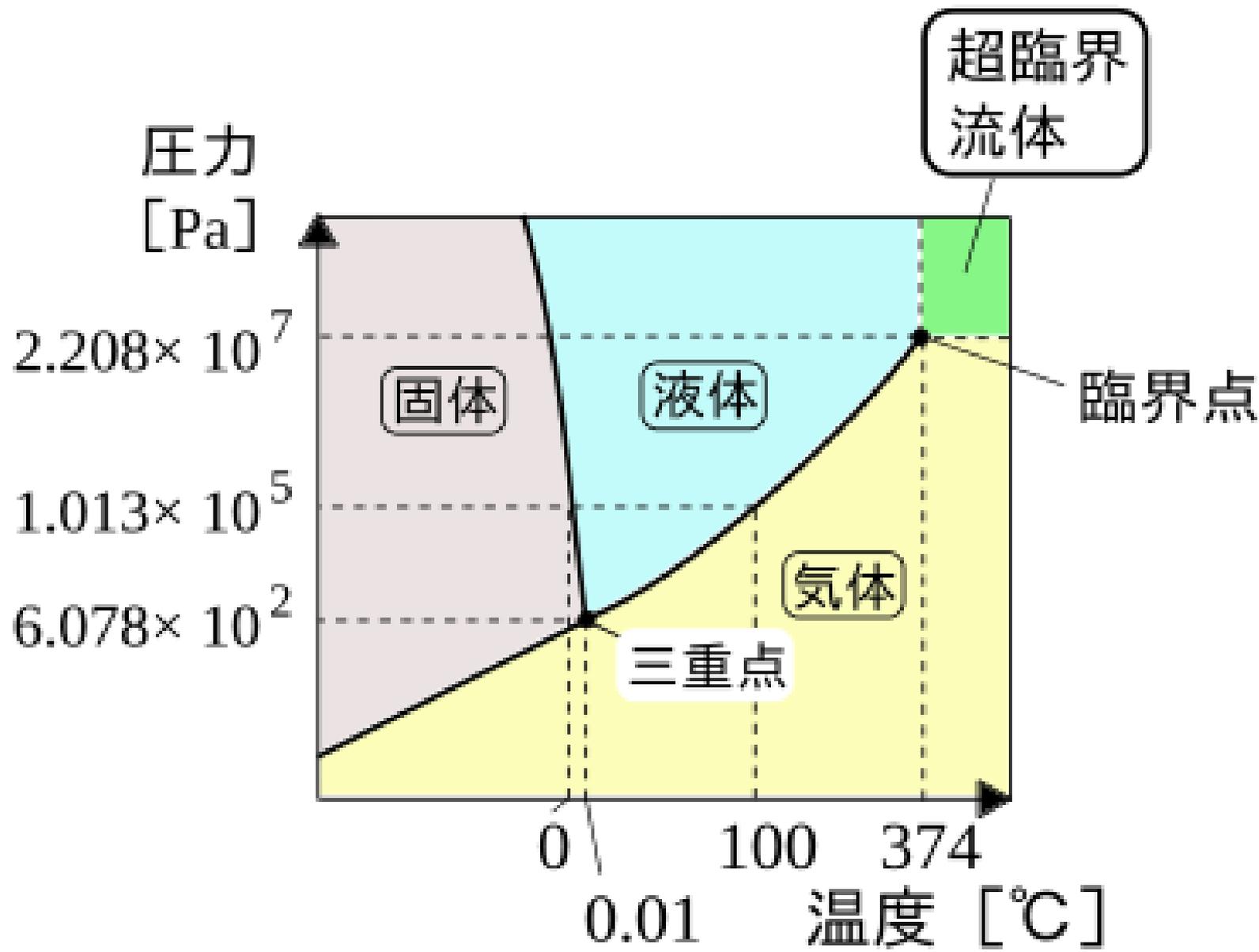
**太陽系星雲の気体が**

**冷えてくると**

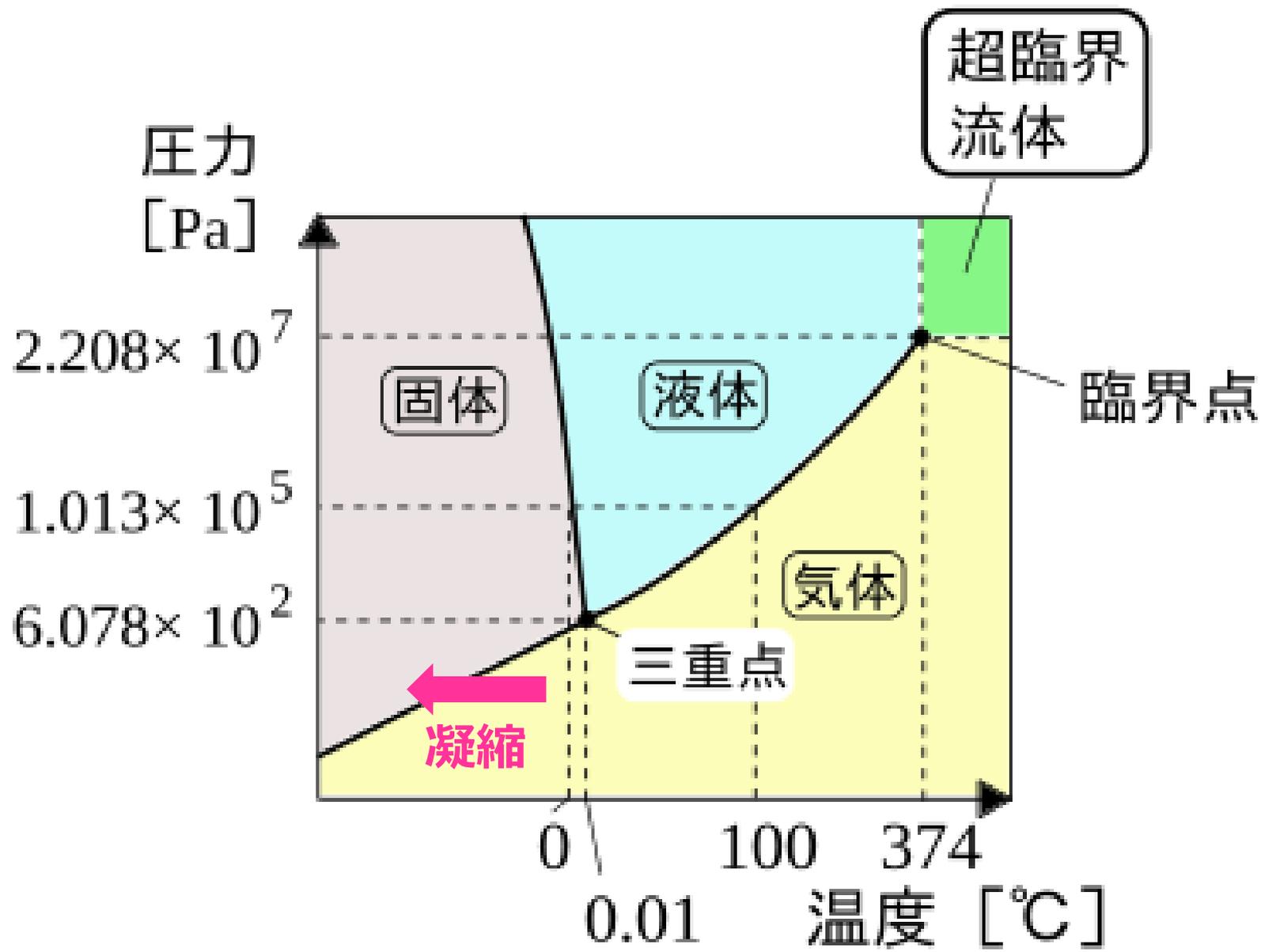
**何が起きるか？**

**水蒸気が冷えると**

**何が起きるか？**



水の状態図



水の状態図

**太陽系星雲の気体が**

**冷えてくると**

**何が起きるか？**

**どんな物質から**

**凝縮するか？**

# 凝縮の条件

(物質の分圧) > (その温度での物質の飽和蒸気圧)

分圧 ⇒ 物質の量 (モル数) が多いほど高い

飽和蒸気圧 ⇒ 結合力が弱いほど高い

⇒ 量 と 結合力 の兼ね合いで定まる

# 凝縮の条件

**(物質の分圧) > (その温度での物質の飽和蒸気圧)**

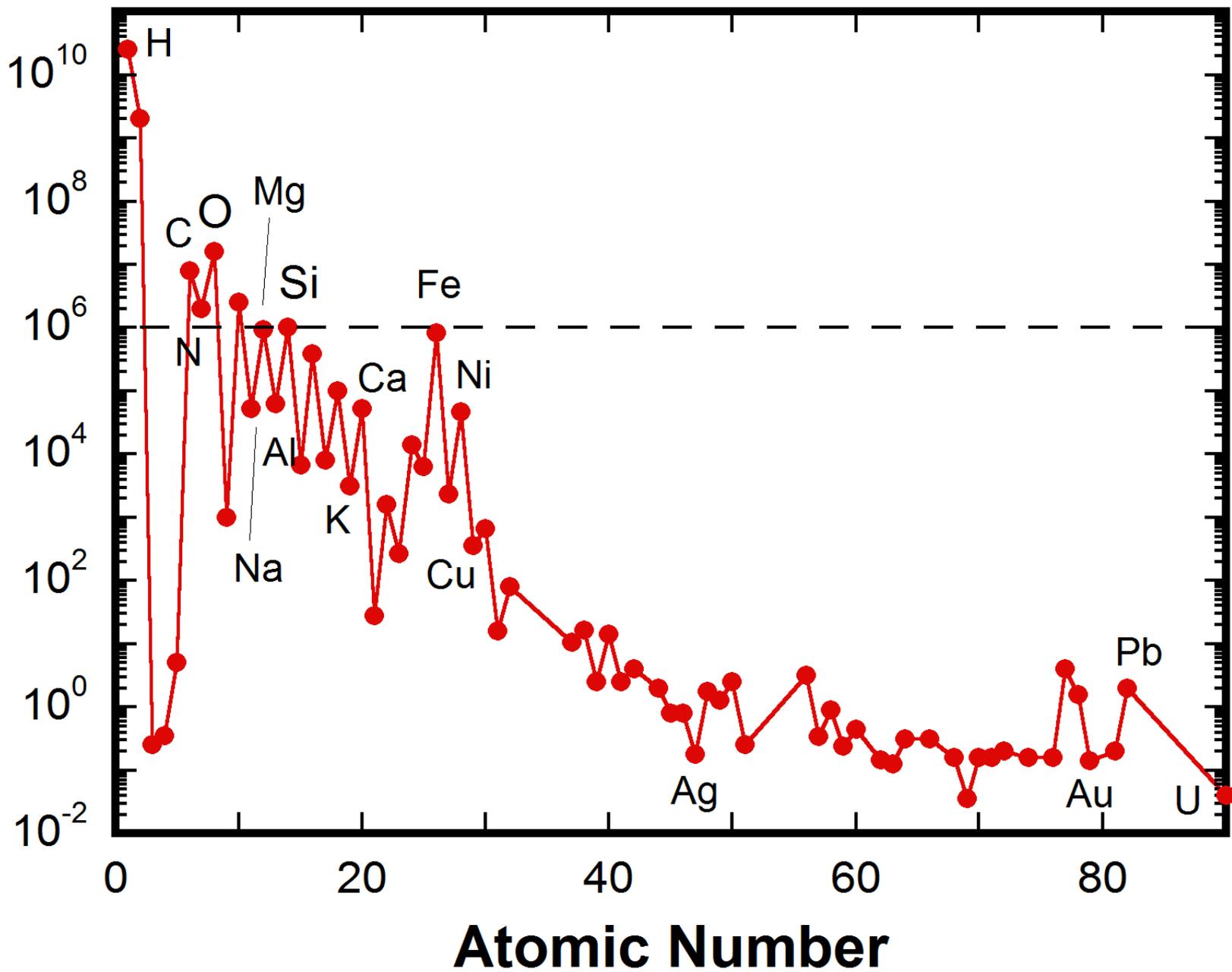
**分圧 ⇒ 物質の量 (モル数) が多いほど高い**

**飽和蒸気圧 ⇒ 結合力が弱いほど高い**

**⇒ 量 と 結合力 の兼ね合いで定まる**

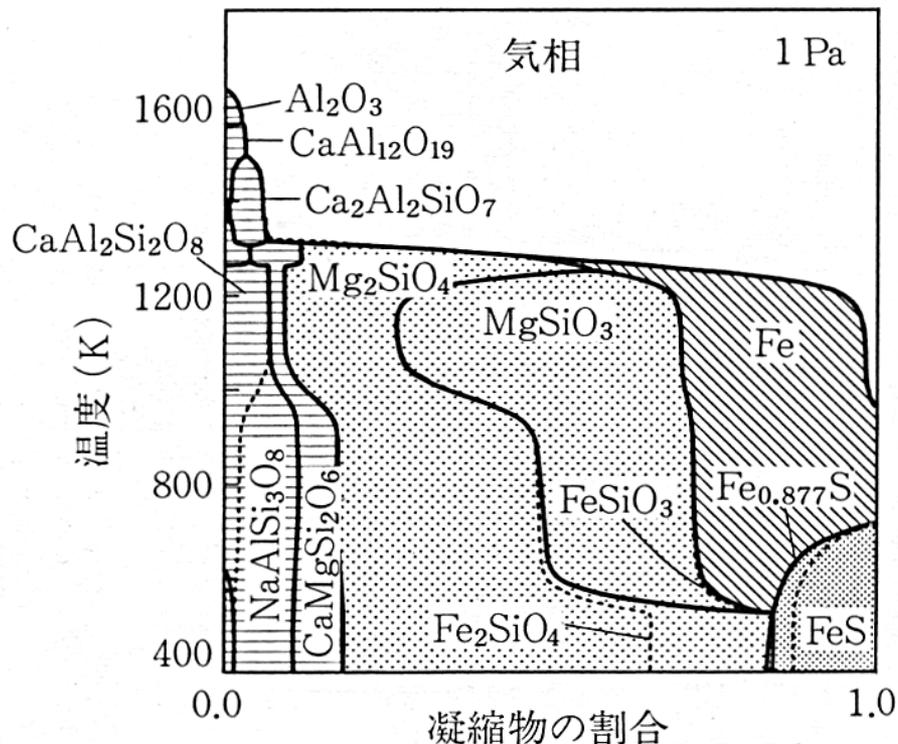
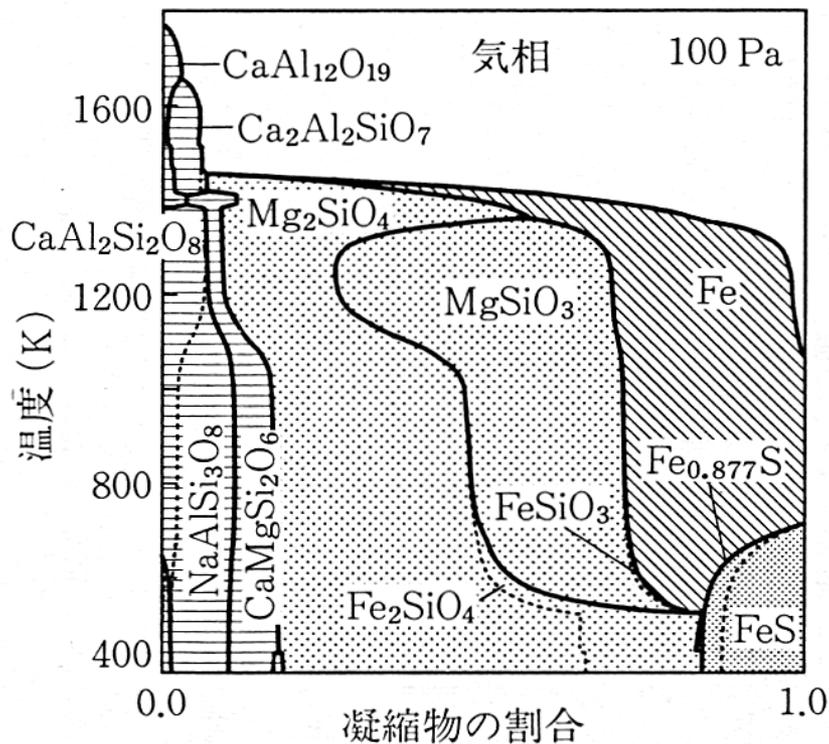
**イオン結合, 共有結合, 金属結合, 分子間結合, 水素結合**

Relative Abundance (Si=10<sup>6</sup>)



# 太陽系星雲の温度と凝縮物の割合

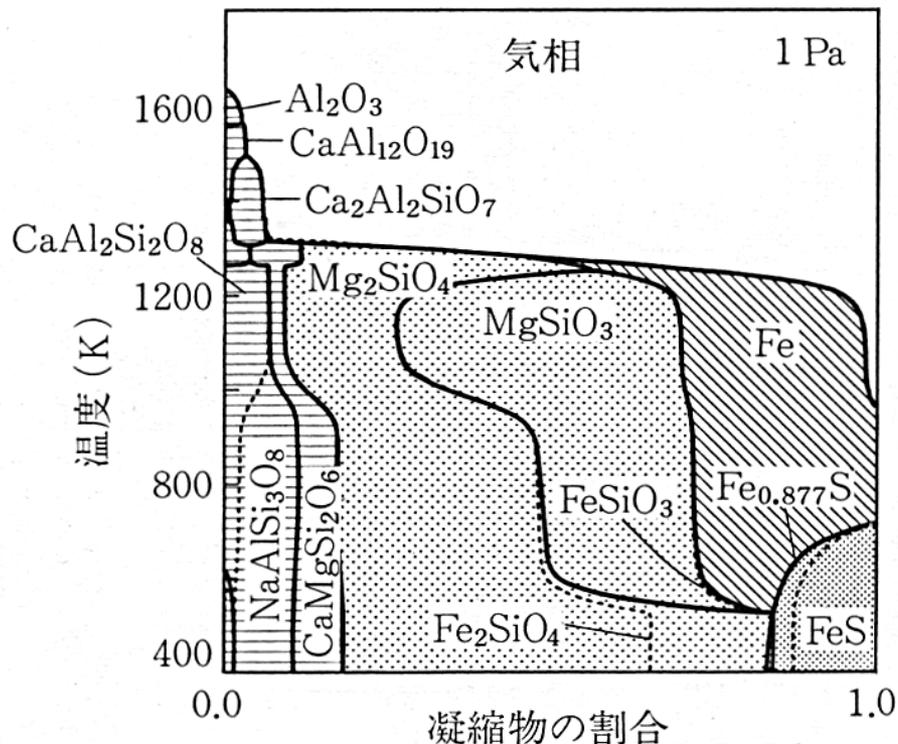
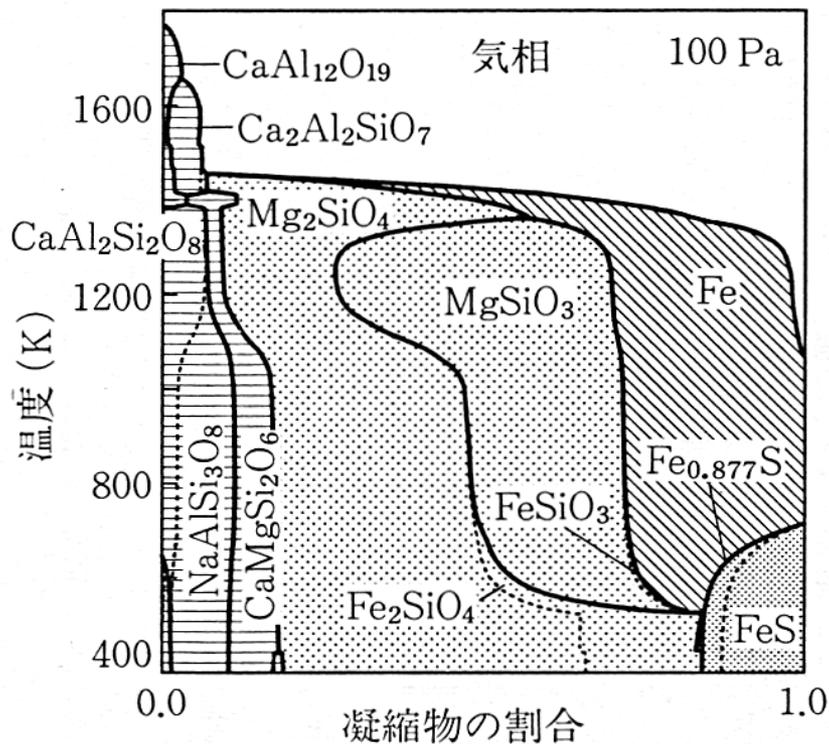
Wood & Hashimoto (1993)



- 気相
- ▨ Ca, Alを含む鉱物
- ▤ 主なケイ酸塩 (オリビンとパイロキシン)
- ▧ 金属鉄
- ▩ 硫化物

# 太陽系星雲の温度と凝縮物の割合

Wood & Hashimoto (1993)

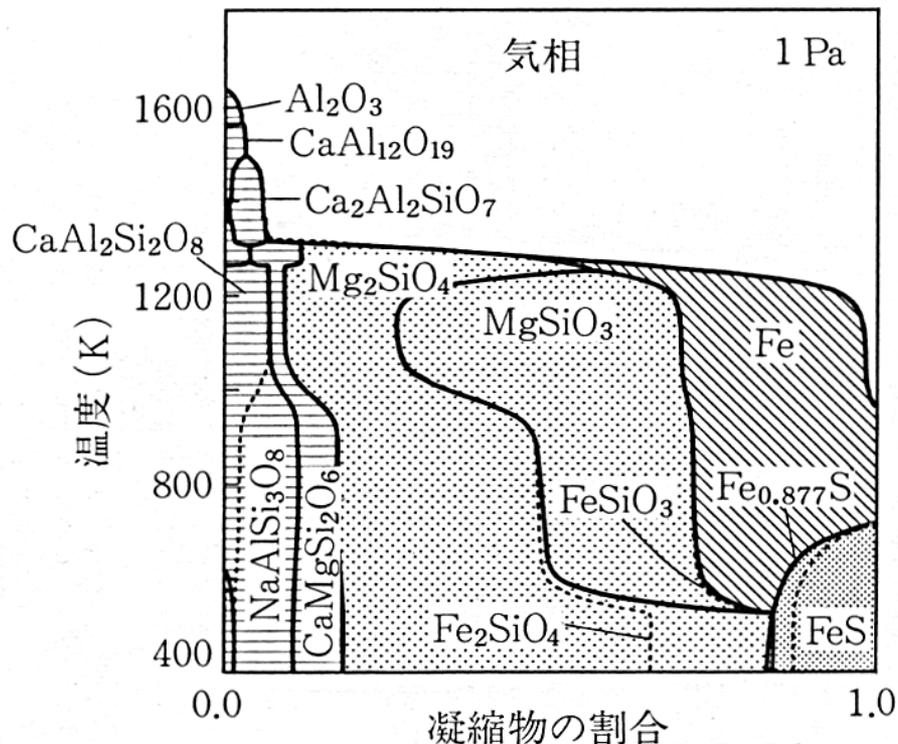
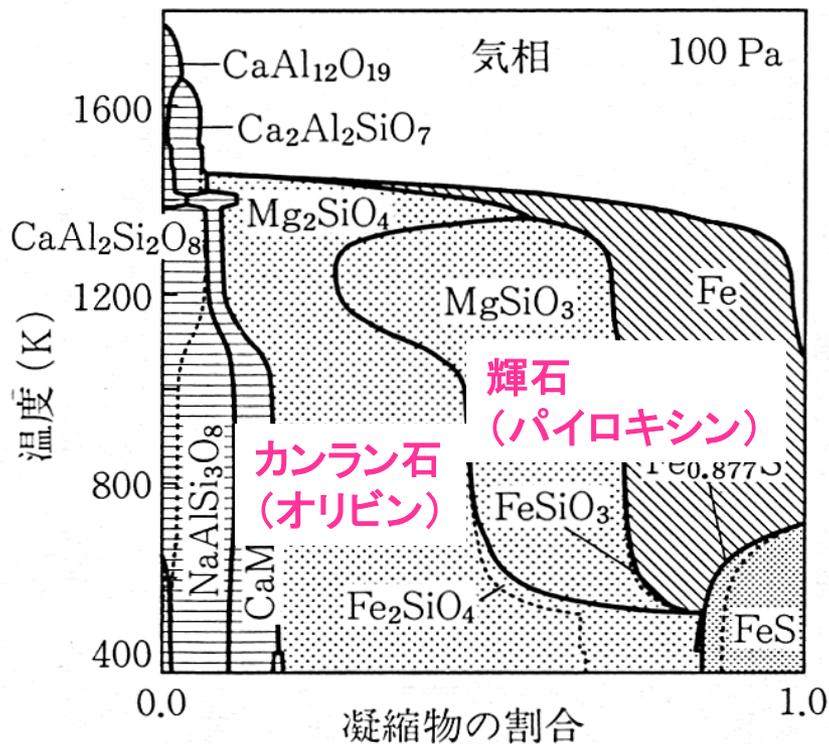


- 気相
- Ca, Alを含む鉱物
- 主なケイ酸塩 (オリビンとパイロキシン)
- 金属鉄
- 硫化物

鉱物 = 天然に存在する固体の相 (マクロに一様)

# 太陽系星雲の温度と凝縮物の割合

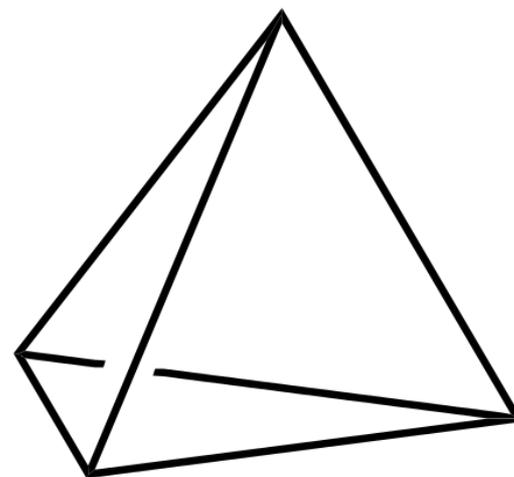
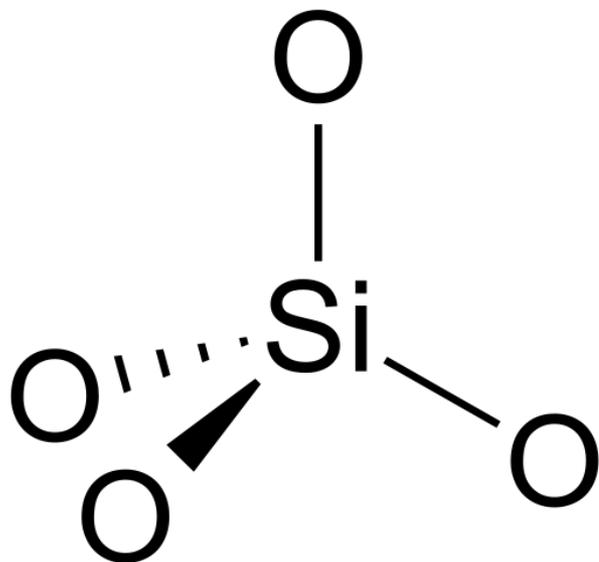
Wood & Hashimoto (1993)



- 気相
- Ca, Alを含む鉱物
- 主なケイ酸塩 (オリビンとパイロキシン)
- 金属鉄
- 硫化物

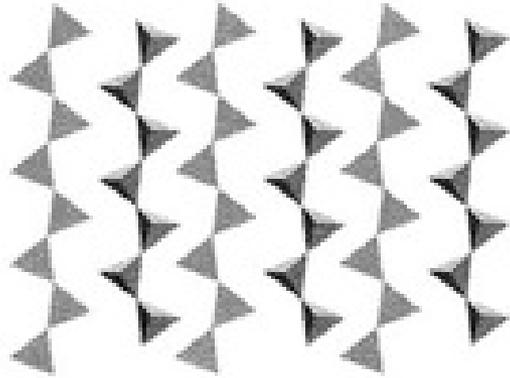
鉱物 = 天然に存在する固体の相 (マクロに一様)

# ケイ酸塩鉱物の基本構造

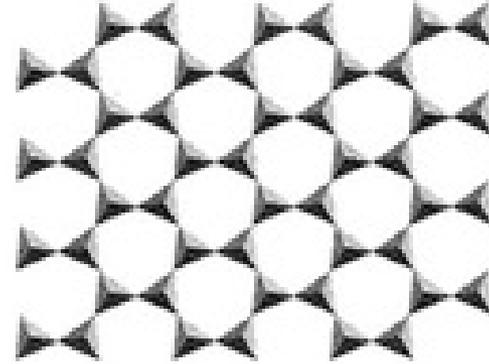


# ケイ酸塩鉱物の構造

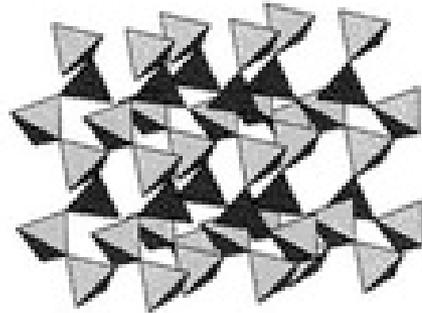
(A)



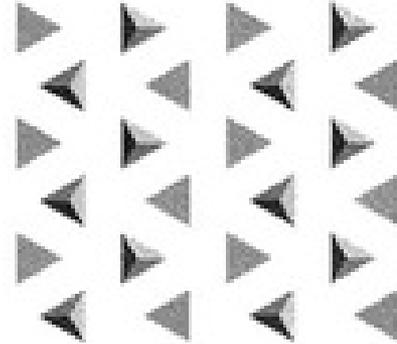
(B)



(C)



(D)



(E)

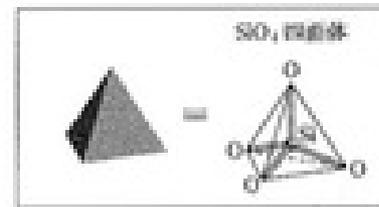
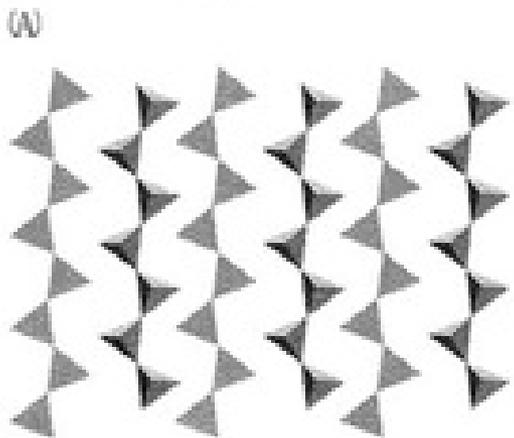


図  $\text{SiO}_4$  四面体どうしのつながりかた

# ケイ酸塩鉱物の構造

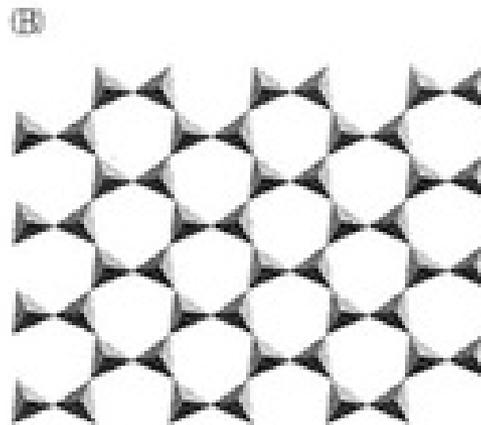
単鎖状

輝石など



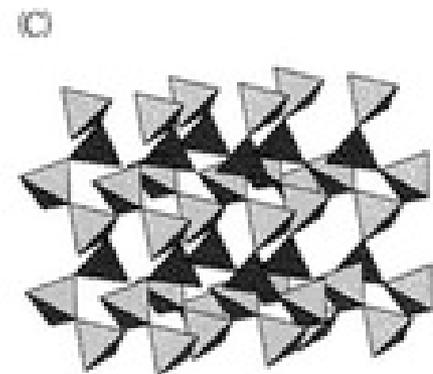
層状

雲母など



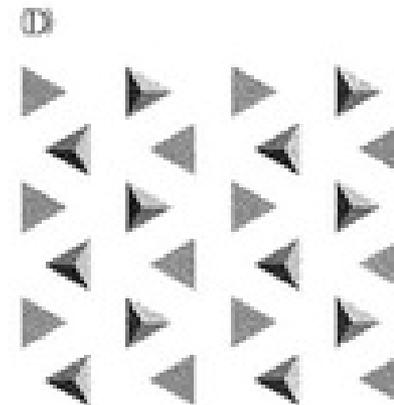
3次元  
網目状

石英など



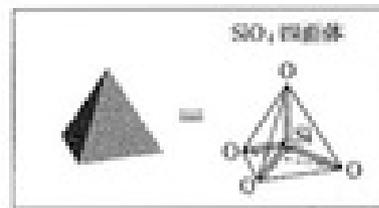
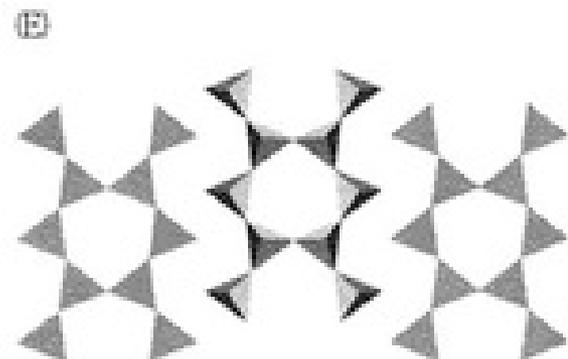
単体

カンラン石  
など



二重鎖状

角閃石など



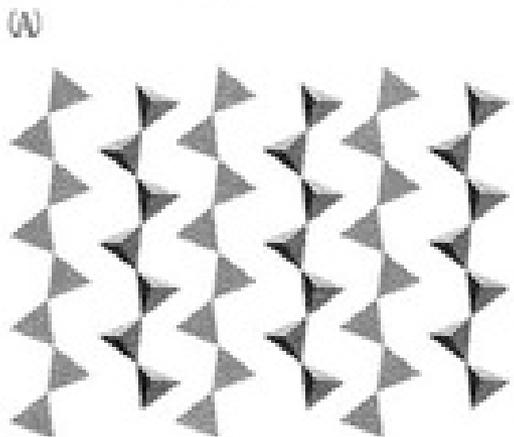
基本構造

図 SiO<sub>4</sub>四面体どうしのつながりかた

# ケイ酸塩鉱物の構造

単鎖状

輝石など



層状

雲母など



3次元  
網目状

石英など



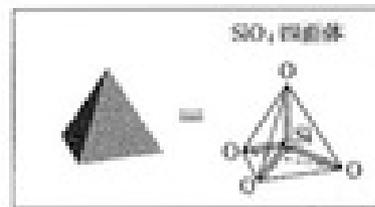
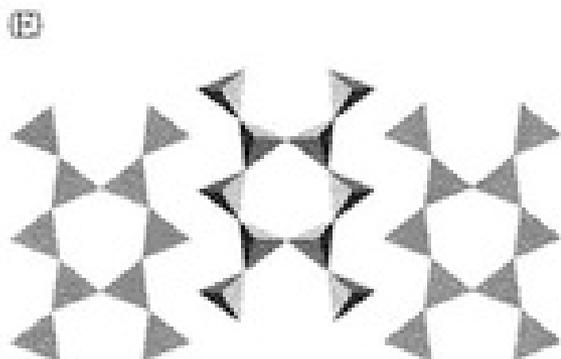
単体

カンラン石  
など



二重鎖状

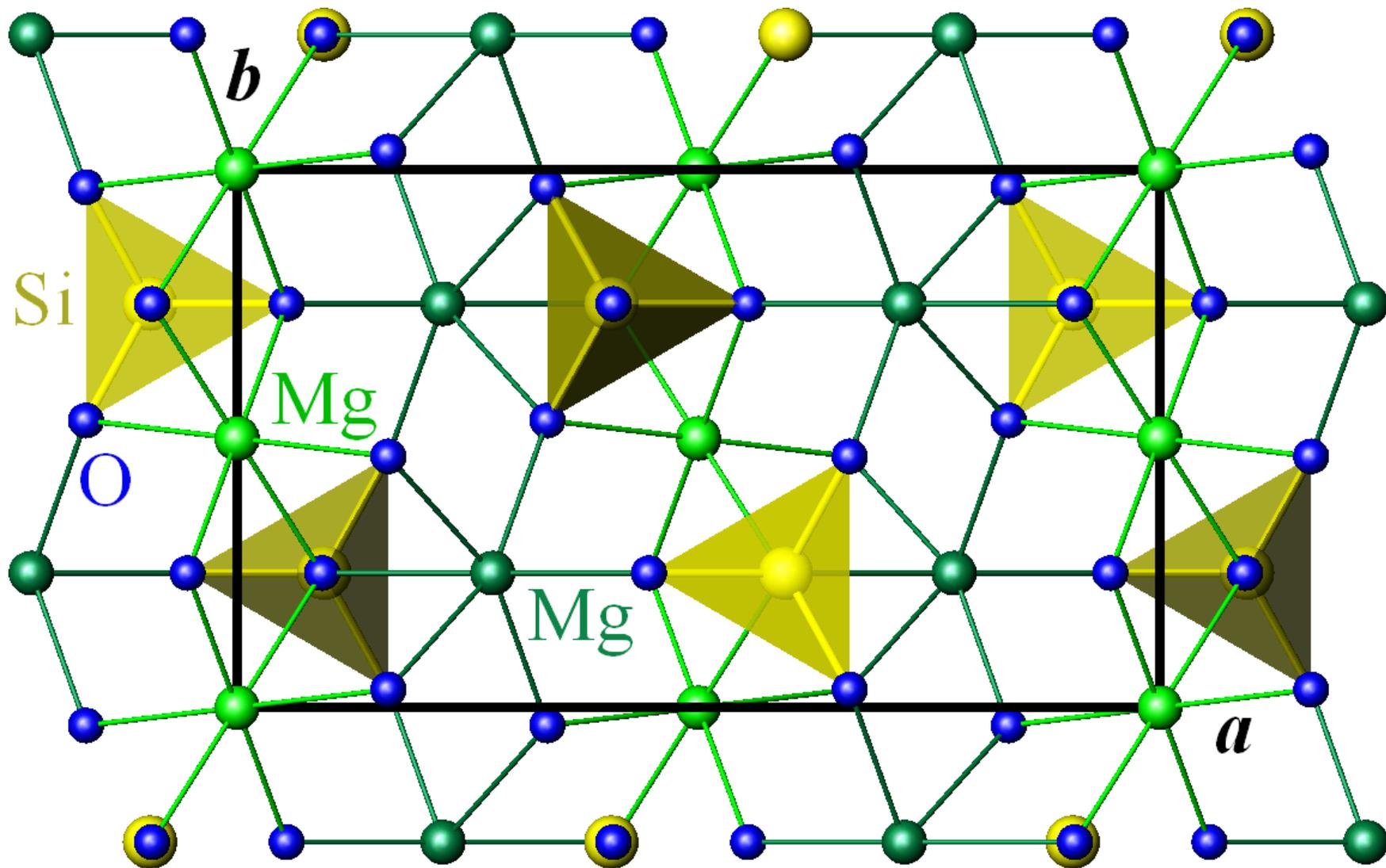
角閃石など



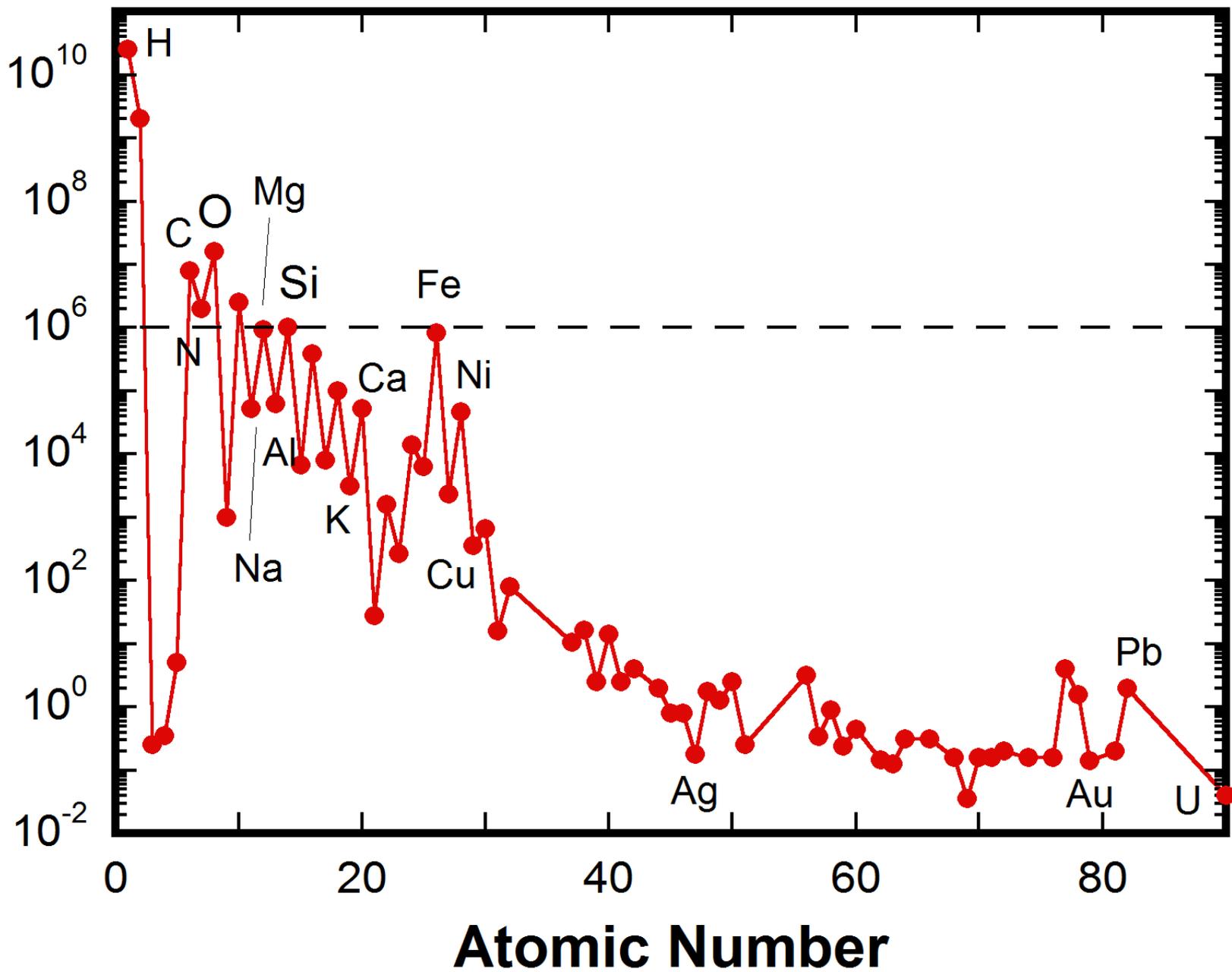
基本構造

図 SiO<sub>4</sub>四面体どうしのつながりかた

# カンラン石の結晶構造

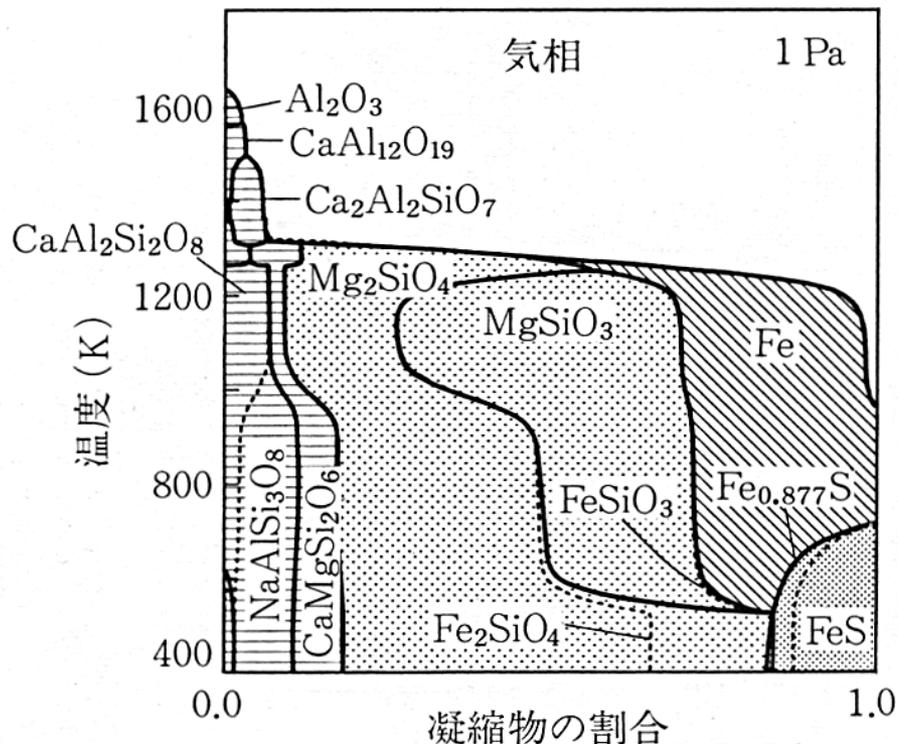
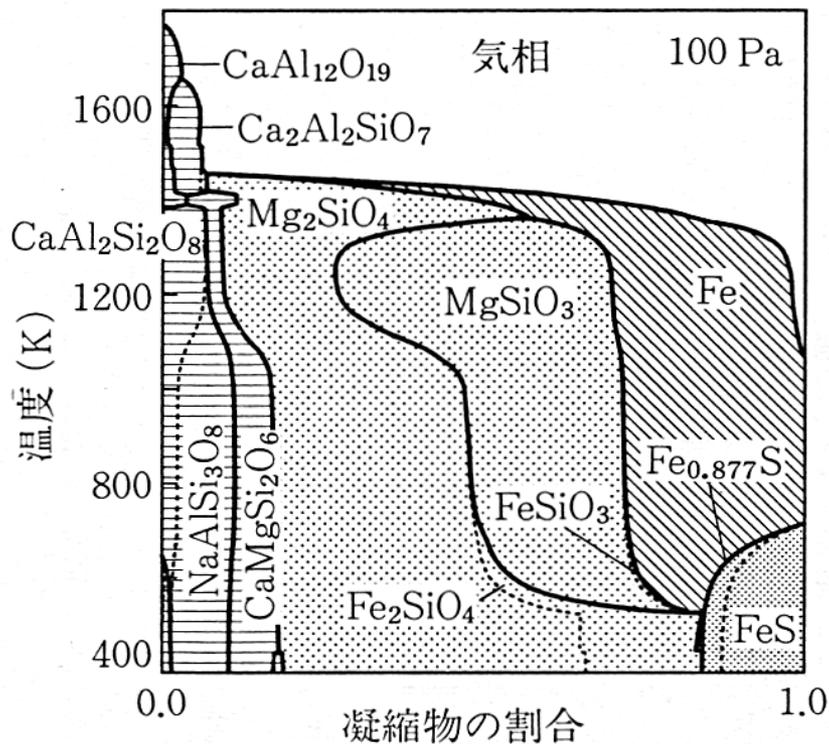


Relative Abundance (Si=10<sup>6</sup>)



# 太陽系星雲の温度と凝縮物の割合

Wood & Hashimoto (1993)



- 気相
- ▨ Ca, Alを含む鉱物
- ▤ 主なケイ酸塩 (オリビンとパイロキシン)
- ▧ 金属鉄
- ▩ 硫化物

Mgがケイ酸塩鉱物になり、Feが金属鉄になるのはなぜか？

# 遷移金属はなぜ硬い

- 金属結合は、原子の外殻電子のうちs,p電子が結晶全体に広がることによって全エネルギーが低下することが原因ですが、このことが通常金属(Na, Mg, Alなど)や貴金属(Cu, Ag, Au)の柔らかさをもたらします。一方、Fe, Tiなど遷移金属の結合にはd電子が寄与しています。遷移金属では、原子あたりの電子数が多く、電子の海に供給する電子数が多いことが結合の強さをもたらし、高い融点と硬さをもたらしています。

(西村先生のスライド)

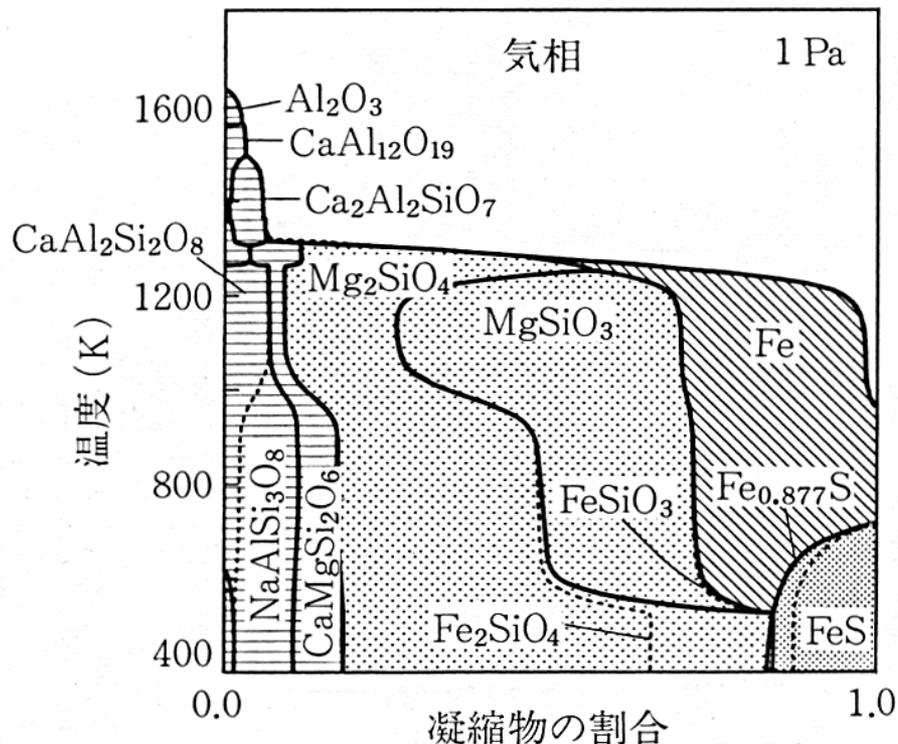
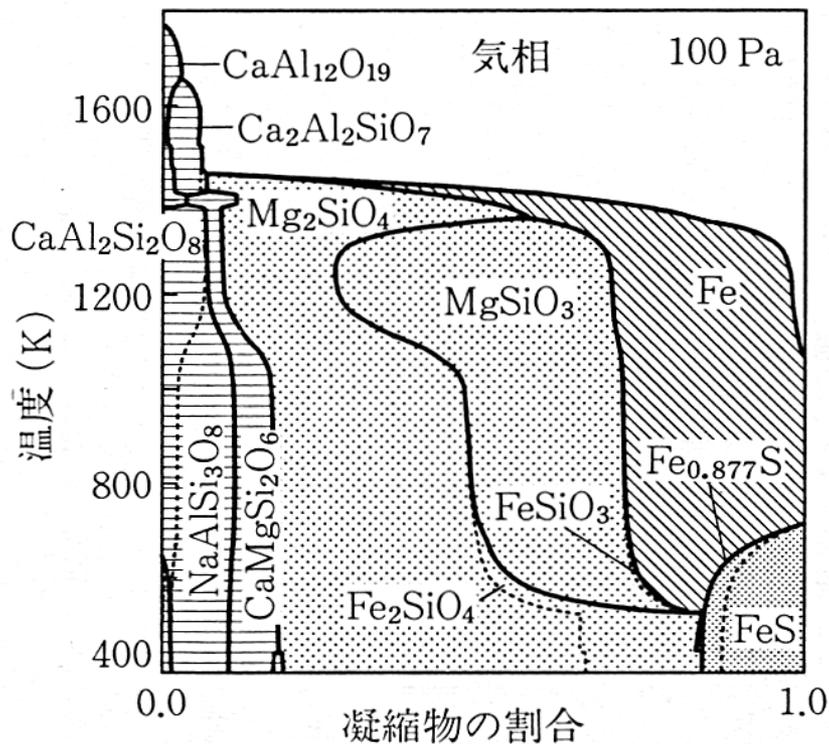
# 常圧（大気圧）での融点

**Mg      650 °C**

**Fe      1536 °C**

# 太陽系星雲の温度と凝縮物の割合

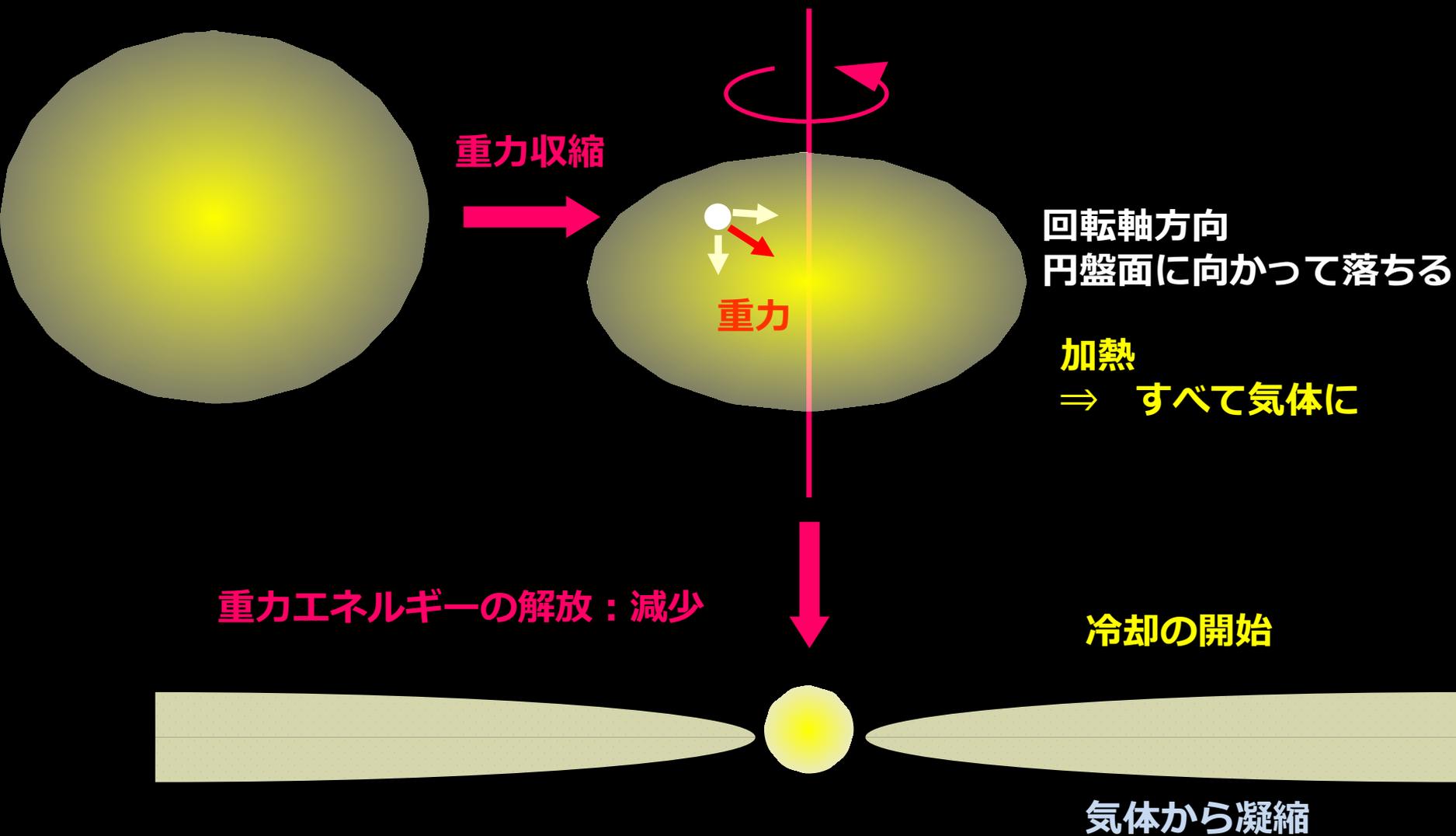
Wood & Hashimoto (1993)



- 気相
- ▨ Ca, Alを含む鉱物
- ▤ 主なケイ酸塩 (オリビンとパイロキシン)
- ▧ 金属鉄
- ▩ 硫化物

Mgがケイ酸塩鉱物になり、Feが金属鉄になるのはなぜか？

# 原始太陽系星雲の進化



# 固体粒子⇒微惑星⇒惑星

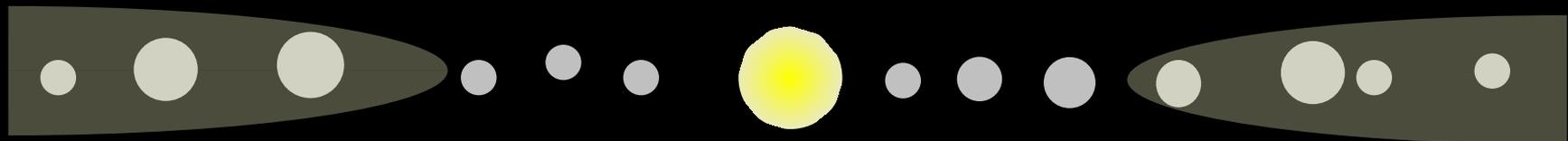
固体粒子の沈殿



重力不安定 ⇒ 微惑星

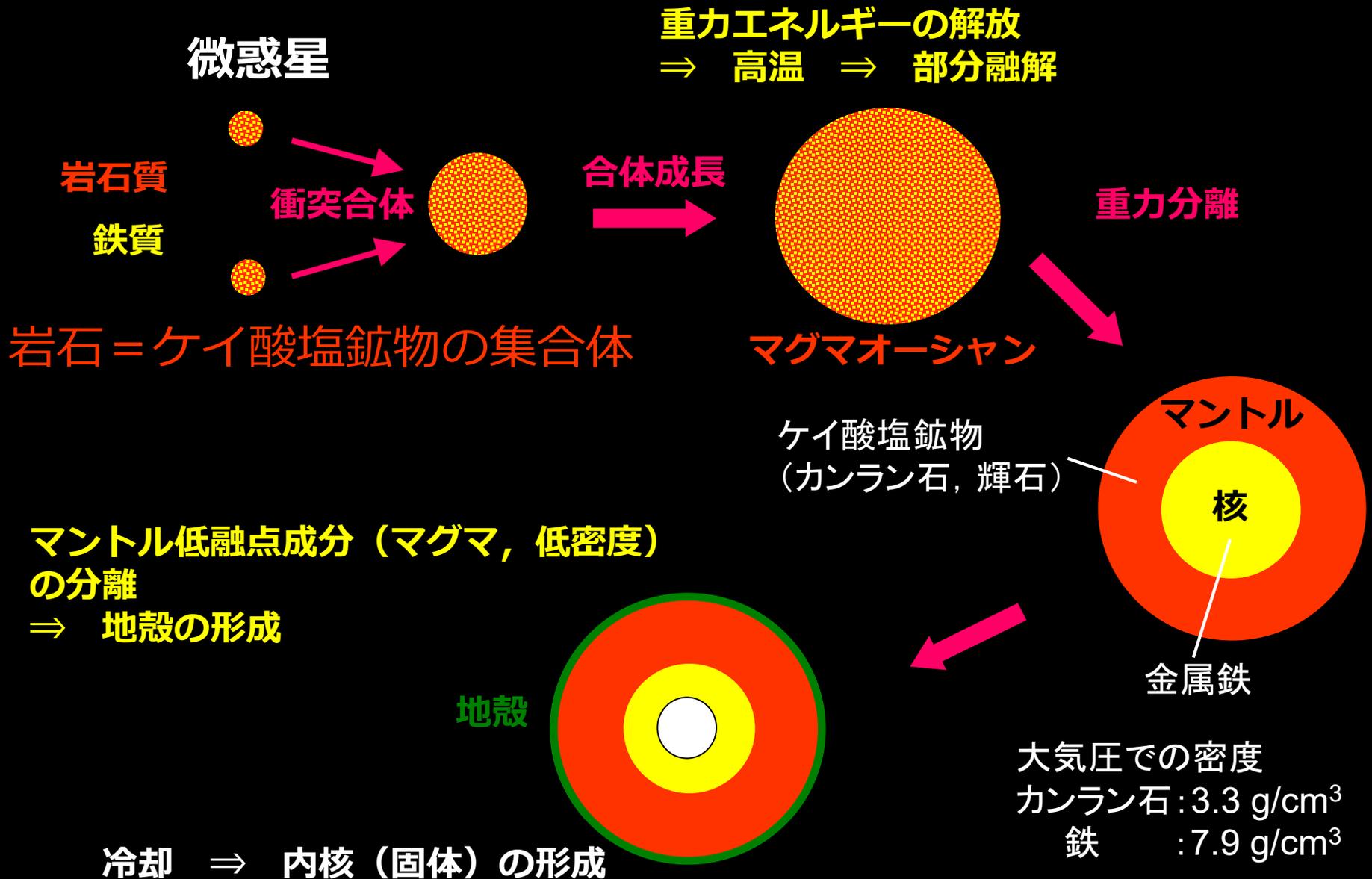


衝突 ⇒ 合体 ⇒ 成長



太陽風によるガスの散逸

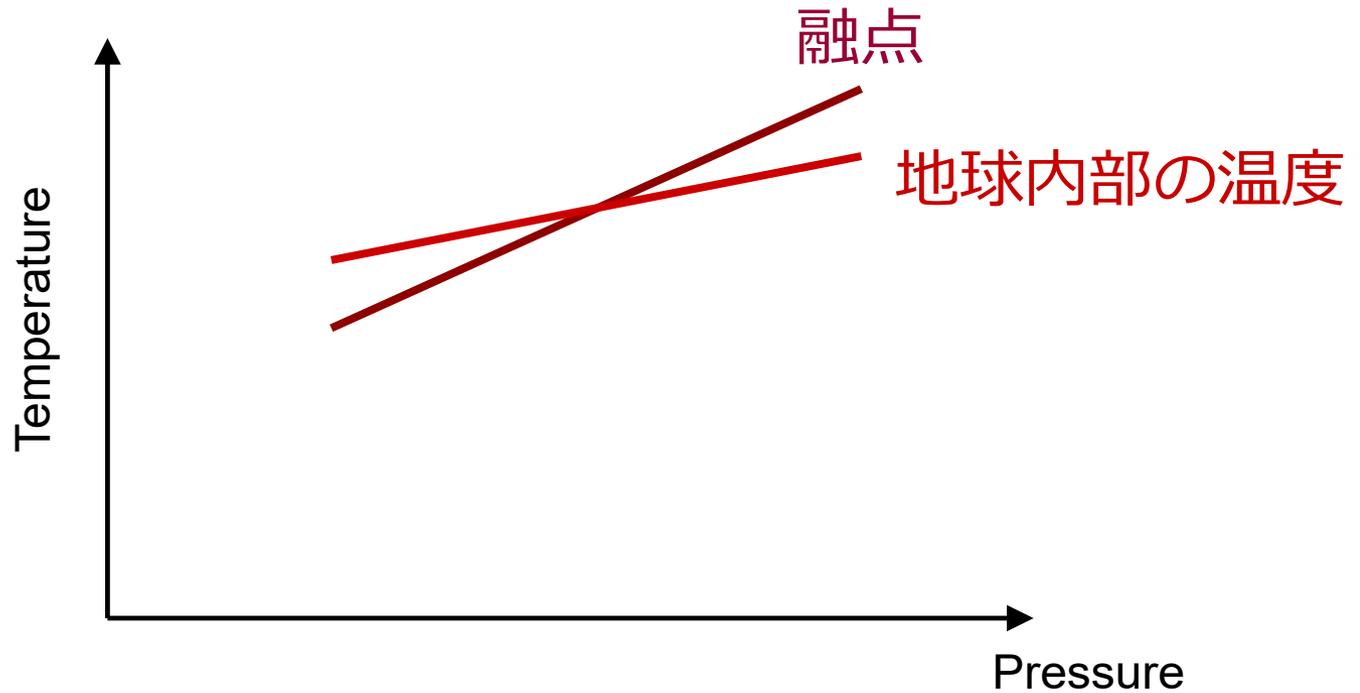
# 層構造の形成



地球中心部の方が温度は高い

なぜ核は内側から固化するのか？

一般に融点は圧力とともに高くなる

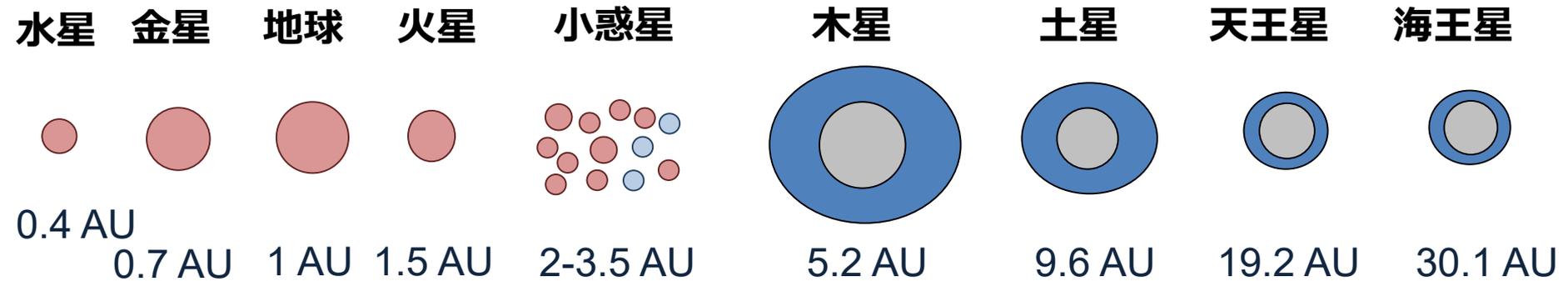


# 構成物質の違い

太陽からの距離による違い

材料物質

> 2.7AU で氷 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ) が凝縮  
(Ice line)



**岩石惑星**  
岩石, 鉄

**ガス惑星**  
岩石, 鉄, 氷 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ )  
+ ガス ( $\text{H}$ ,  $\text{He}$ )

**氷惑星**

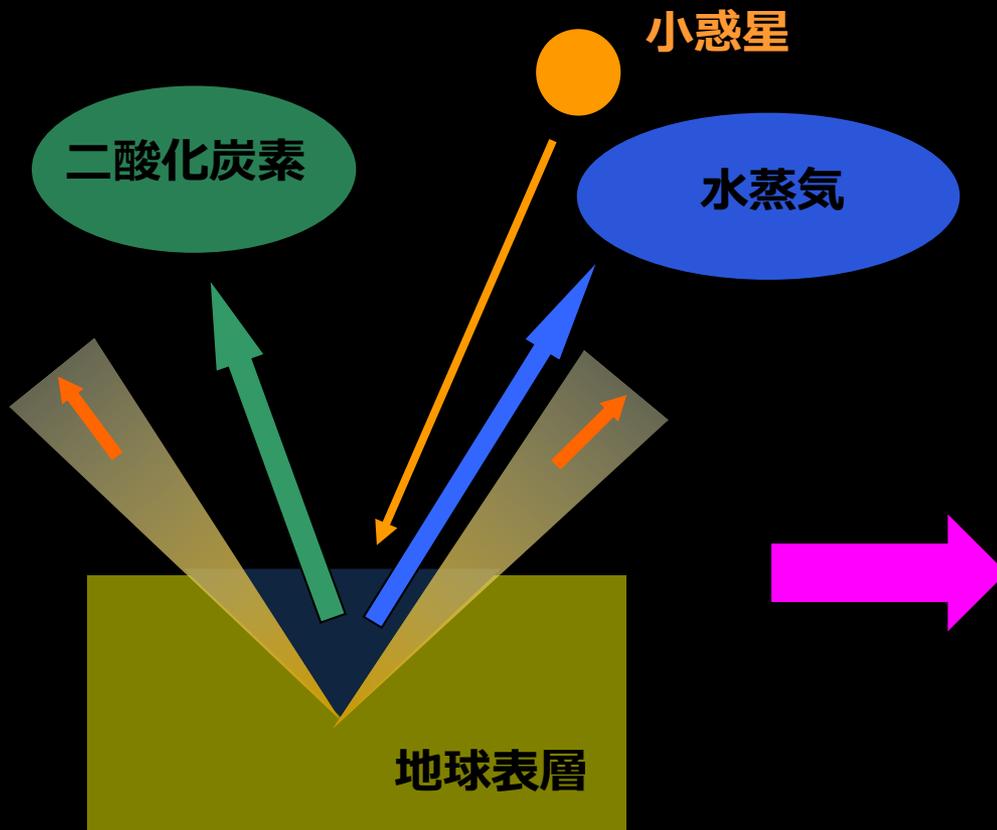
# 内容

1. 太陽系形成時の物質の挙動

2. 大気・海洋・大陸の形成

# 大気・海洋の形成

大気形成 : 衝突脱ガス



**原始大気**

二酸化炭素 : 数十気圧

水蒸気 : 約100気圧

1500K

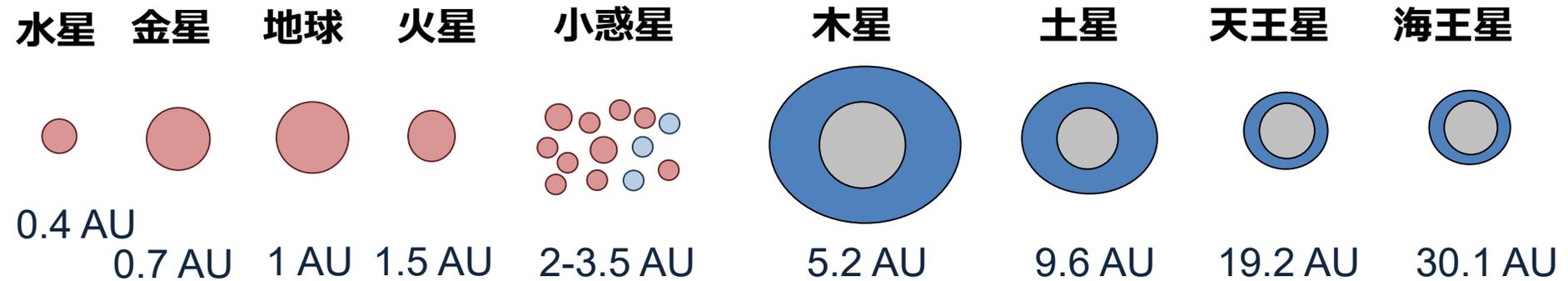
マグマオーシャン

# 構成物質の違い

太陽からの距離による違い

材料物質

> 2.7AU で氷 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ) が凝縮  
(Ice line)



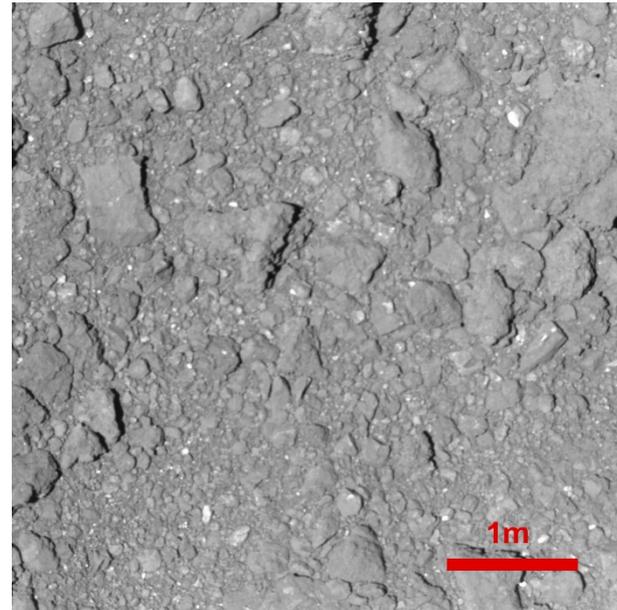
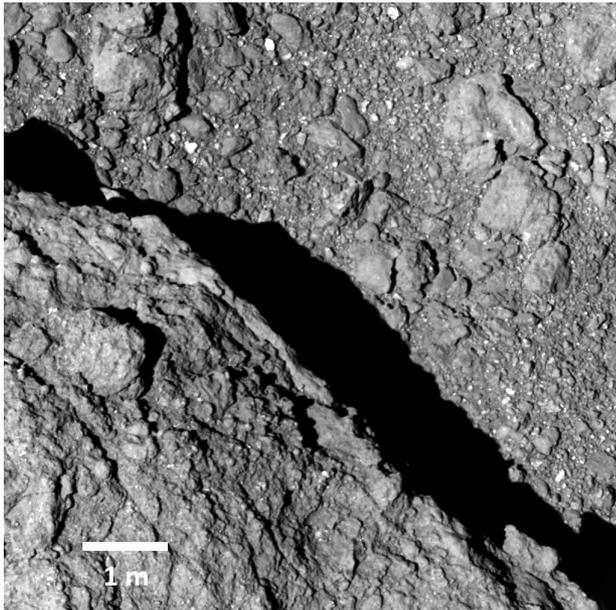
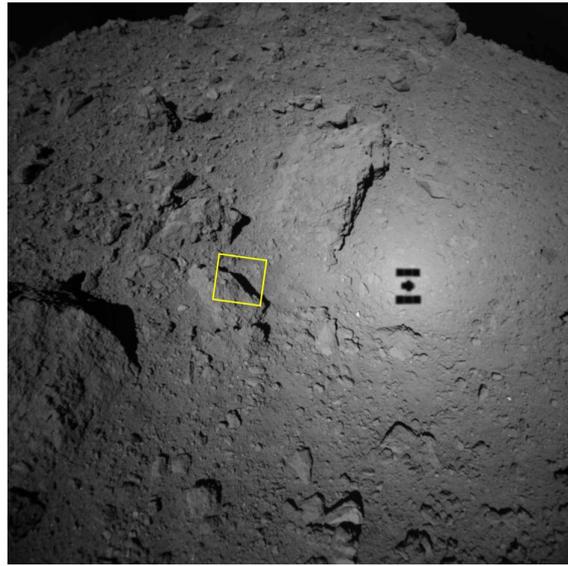
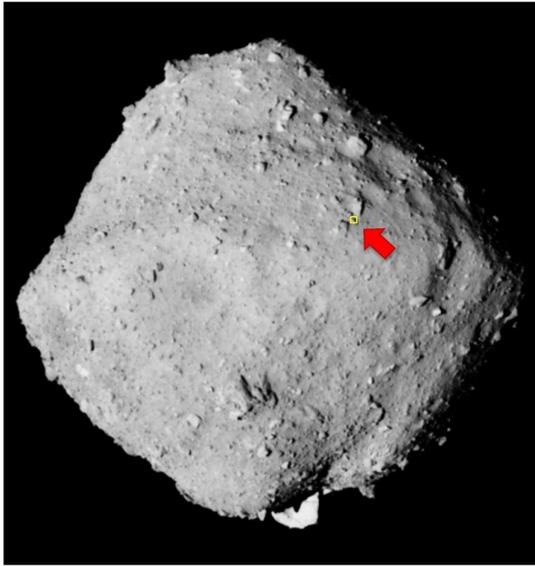
**岩石惑星**  
岩石, 鉄

**ガス惑星**  
岩石, 鉄, 氷 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ )  
+ ガス ( $\text{H}$ ,  $\text{He}$ )

**氷惑星**

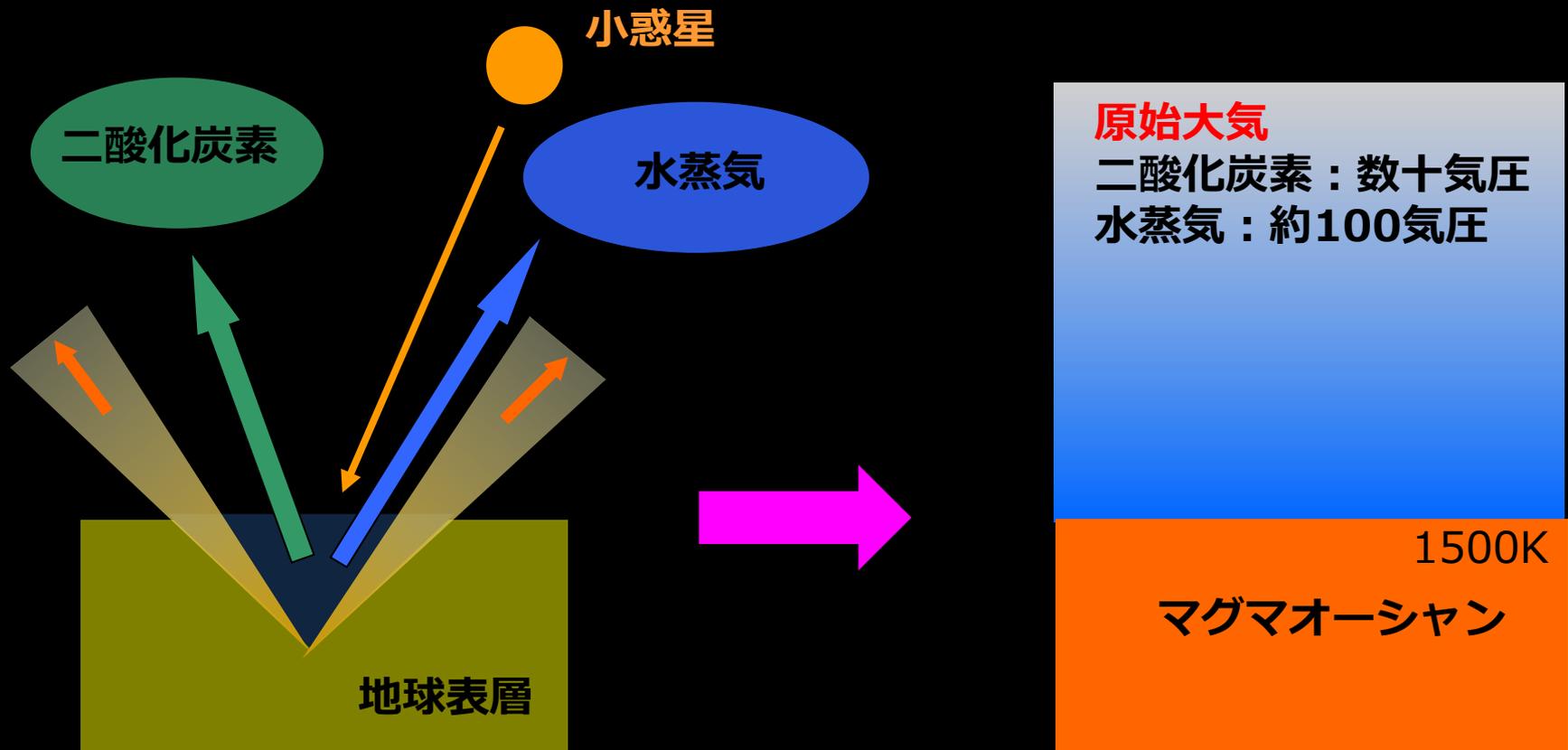
# 小惑星 リュウグウ

画像：JAXA, 東大ほか



# 大気・海洋の形成

大気形成 : 衝突脱ガス



# 海の形成

空の晴れ上がり ⇒ 冷却

## 原始大気

二酸化炭素：数十気圧  
水蒸気：約100気圧

$T=1500\text{K}$

マグマオーシャン

衝突の減少



大気の温度低下

$T=600\text{K}$

## 水蒸気の凝結

雲

マグマオーシャン

雨 ⇒ 海

# 大気中の二酸化炭素の除去

## 原始大気

二酸化炭素：数十気圧

水蒸気：約100気圧

マグマオーシャン

## 雨

⇒ 二酸化炭素を溶かし込む（酸性雨）

⇒ 地表の岩石を溶かす  
（様々なイオンが供給される）

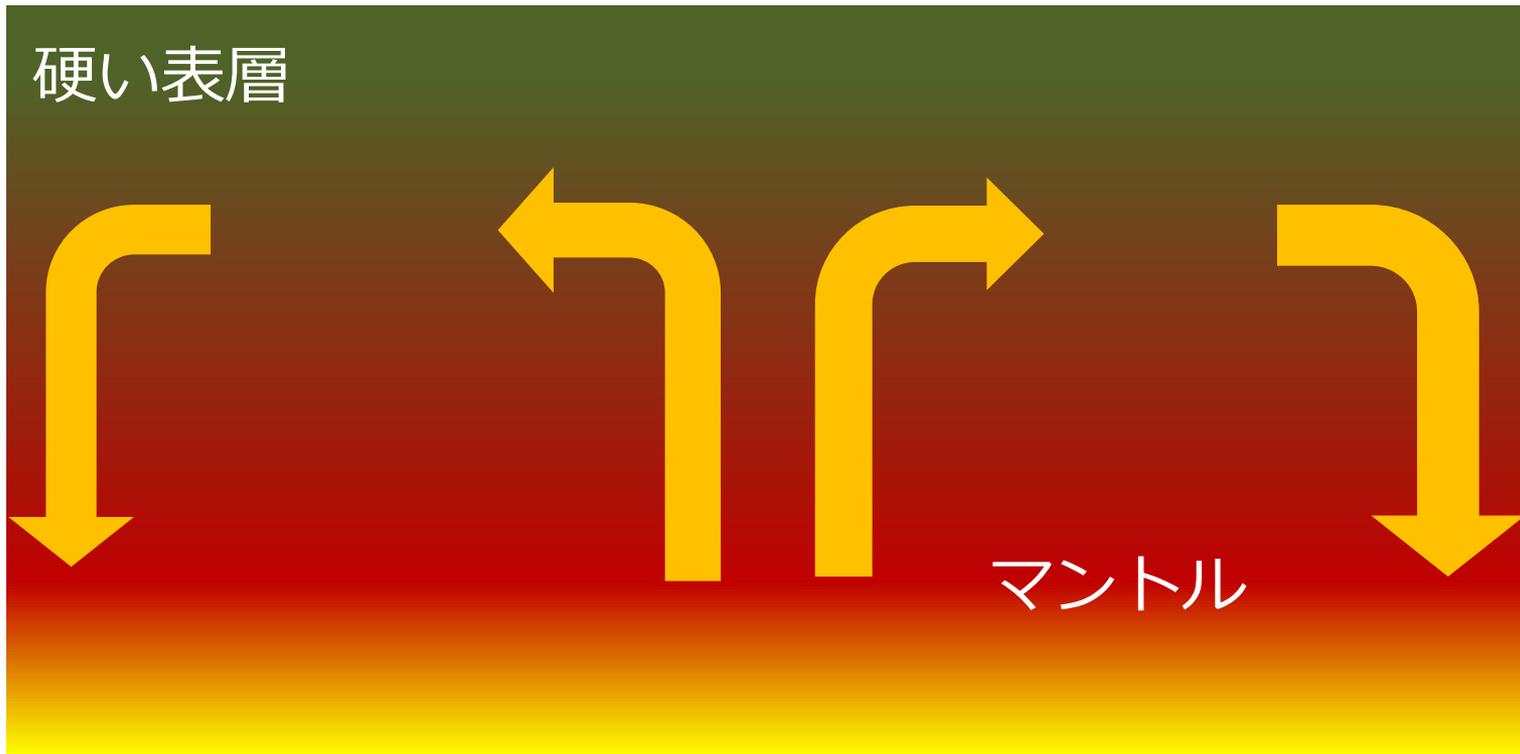
⇒ 炭酸塩鉱物として沈殿  
（二酸化炭素が固定される）

⇒ 冷却がすすむ

# 水が存在することの影響

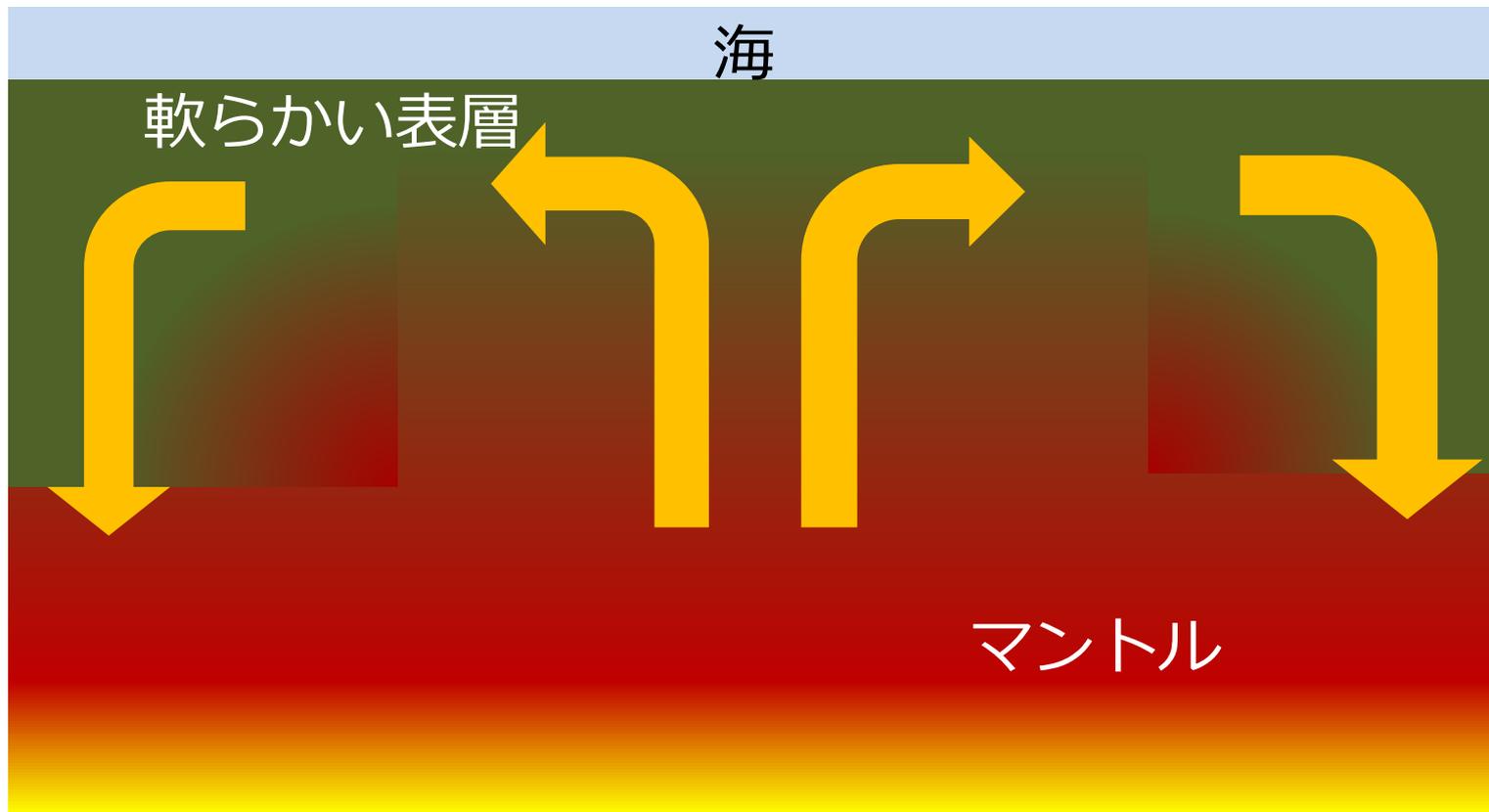
## (1) 物質の軟化

硬い表層は動かない



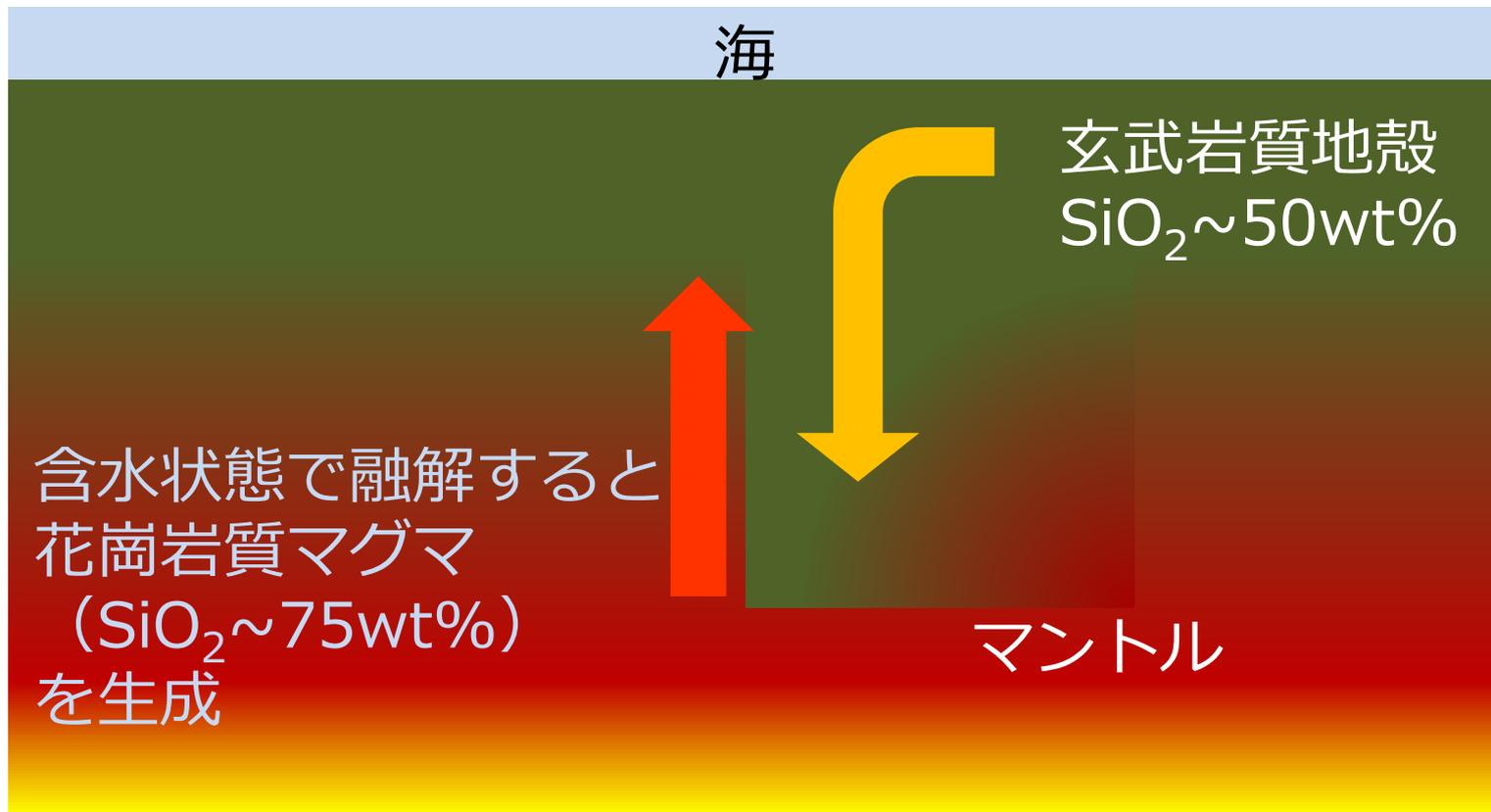
# 水が存在することの影響

(1) 物質の軟化 ⇒ プレートテクトニクス



# 水が存在することの影響

## (2) 花崗岩質マグマの形成



# 水が存在することの影響

## (2) 花崗岩質マグマの形成 ⇒ 大陸地殻の形成

