

Planetary Sciences 13.4.3

秋葉 洋哉

13.4.3 円盤の化学

- どんな材料物質が惑星の形成に使われるのか

- 円盤の進化 (図)

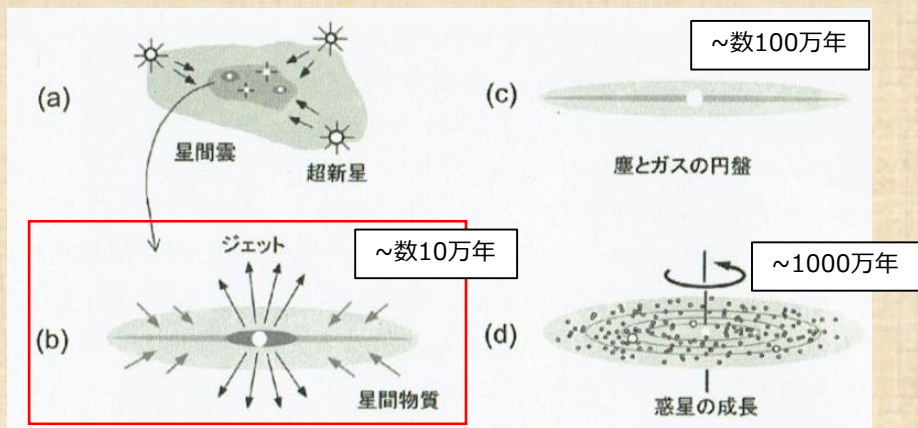
 - 中心星への集積

 - 円盤内物理と化学組成の進化

 - As cooling...

 - 微惑星と惑星の形成 + 円盤ガスの消失

- 彗星とコンドライト隕石が微惑星形成時代の化石となる



図：宇宙・惑星化学 (培風館) より, Chap. 13.4は(b)に相当し、(c)で集積する材料物質の組成に着目する



ハレー彗星, Image Credit : NASA/NSSDC/W.Liller



L4-6普通コンドライト, Image credit: jp.Wikipedia.org

13.4.3 円盤の化学

- 円盤の化学組成の初期状態は星間物質のダストとガスの組成と、続いて起こる重力崩壊での過程に依存する
 - 時間, 中心星からの距離によって組成が変わる。

希薄物質の気体や微粒子などの総称. 低密度下に存在

- 太陽は円盤と同様の材料から形成
→太陽から円盤の本来の元素存在度を知ることができる

- いわゆる宇宙存在度

- 太陽中の元素は高温のため不安定状態
→円盤中にて元素がどのような形態で存在していたかはわからない。

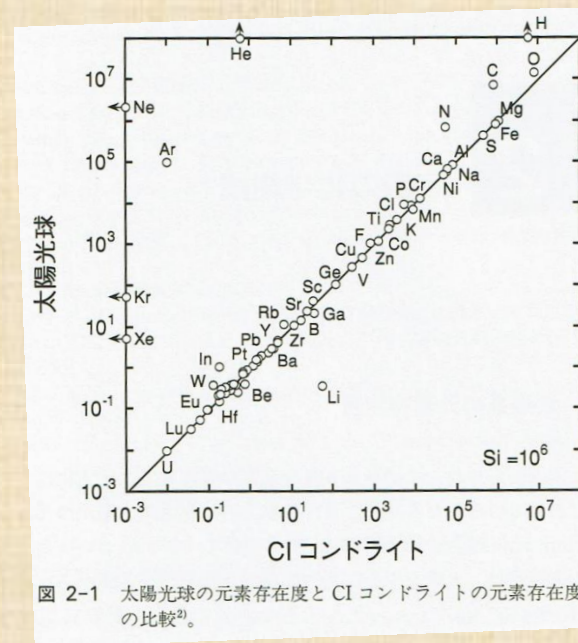
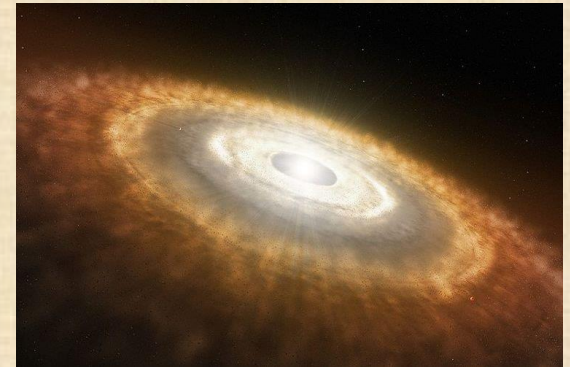


図 2-1 太陽光球の元素存在度と CI コンドライトの元素存在度の比較²⁾。

13.4.3 円盤の化学

- 円盤の冷却に伴う化学の進化は分かっていることが多い。
 - 分かっている確かなことは、**シリケートと富金属**の凝縮物は円盤に広く存在していたが、**氷**は外側の領域にしかなかった
 - 太陽・円盤では、(難揮発性元素) < (氷を作る元素) [存在度]
+ 水星よりも内側の領域は固体は存在できない
→ 初期円盤は、**外側領域の方がよりたくさん**の材料を含んでいた



円盤のイメージ図, IMAGE CREDIT:
ESO/L. CALÇADA

複雑な非平衡物質と難揮発性・揮発性粒子を同時に含む**プレソーラー粒子**の存在は上記のような簡単な平衡凝縮モデルでは円盤内の記述はできないことを示唆

13.4.3.1 平衡凝縮

- 惑星形成の理解のためには、**微惑星**に含まれる材料物質の化学進化を追うことが基本

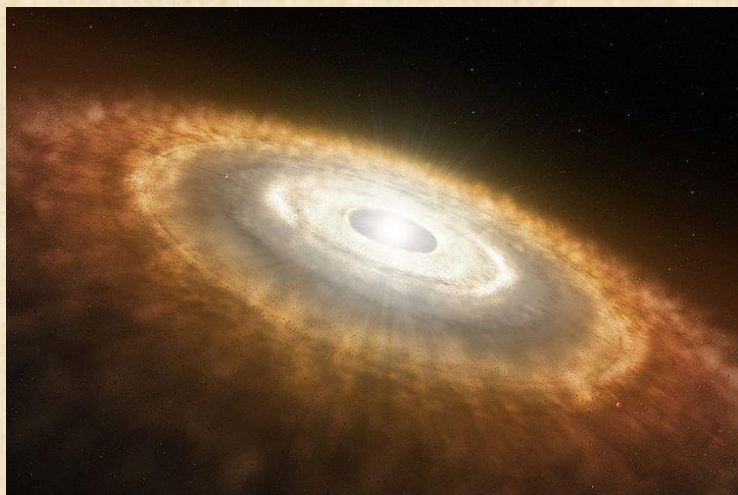
10kmオーダーの初期天体

- 平衡が維持され続けられれば、凝縮する物質を予測できる。
(実際には非平衡が存在し複雑化される (cf.次の章))

13.4.3.1 平衡凝縮

- ガスは衝撃波を乗り越えた後冷却する
 - 円盤に入る時に衝撃波と遭遇する (?)
 - 原文 : Gas cools after passing through the shock front that it encounters while entering the protoplanetary disk,

⇔物質がガスに足される, もしくは力学的な進化に伴う中心星への接近により加熱される



円盤のイメージ図, IMAGE CREDIT: ESO/L. CALÇADA

- 最内領域の化学組成
 - 熱力学平衡にあると考えられる
 - ∵円盤の冷却速度よりも早く化学反応が為される (冷却速度 < 反応速度)

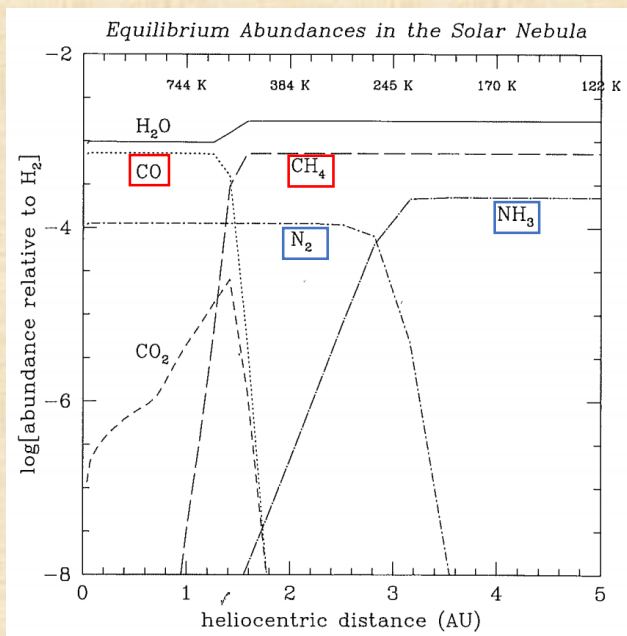
物質が全て蒸発and/or分離するほど高温の領域 (>2000K)

13.4.3.1 平衡凝縮

- (円盤の冷却速度) \approx (化学反応の速度) となる温度以下の時化学はより複雑になる (非平衡を考慮する必要)

もともとは (中性子と陽子の質量比) $\approx 1:6$ になる温度を freeze-out (凍結) 温度と呼んでいた(cf. Chap 13.2)

- 元素の凍結温度 (いわゆるポテンシャル温度) は元素種によって異なる
 - 円盤中の CO/ CH₄比 と N₂/NH₃比は温度と圧力の関数で表わされる



at low P	高温	低温
C 分子	CO ($T \geq 700\text{K}$)	CH ₄
N 分子	N ₂ ($T \geq 300\text{K}$)	NH ₃

13.4.3.1 平衡凝縮

- 一方でN₂氷, CO氷は冥王星やトリトンでも確認されている
→円盤内が必ずしも平衡であったわけではない。

化学平衡に達する十分な時間がなかった

- 彗星では、太陽の存在度に比べてN/C比が低い(Cが多い)
- $T_{NH_3}^{solid} \gg T_{CH_4}^{solid}$

→化学平衡に達していない



冥王星 (Image credit : solarsystem.nasa.gov)

化学平衡に達していない場所もあるが、秩序的な平衡凝縮が為される場所ではどのような物質が凝縮してくるか

13.4.3.1 平衡凝縮

- 円盤が冷えていくことで
気体成分が固体へ凝縮

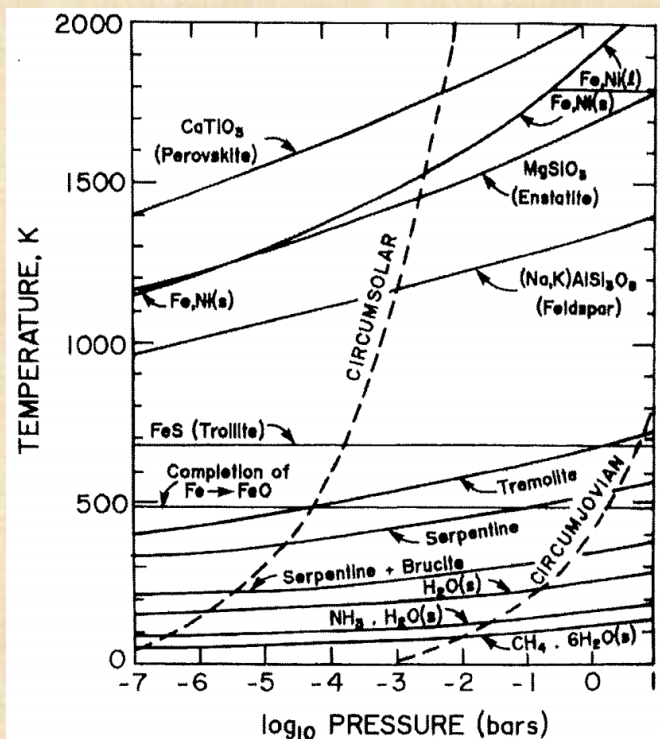


図13.14 圧力-温度に対する各鉱物の凝縮線. 太陽組成を仮定. 下側が固体, 上側が気体. (Prinn, 1993)

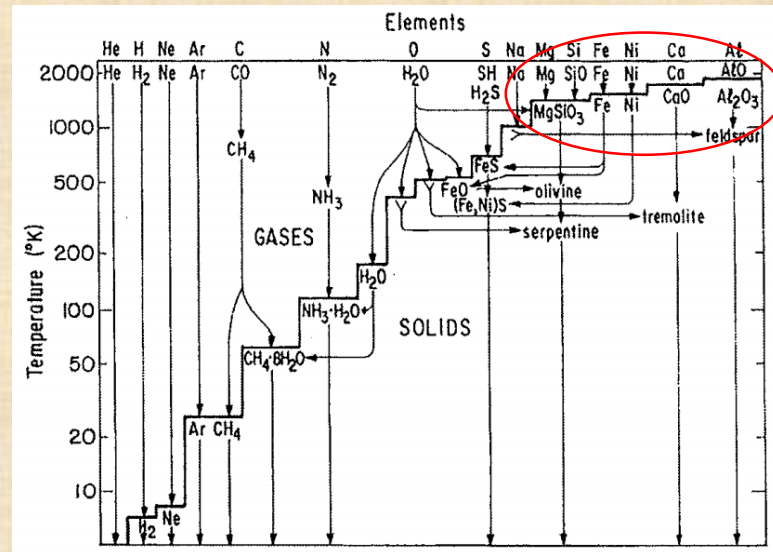


図13.13 円盤圧力における平衡凝縮で生じる相 (Barshay and Lewis, 1976)

- 典型的な高温凝縮物

REE, Al_2O_3 , $CaTiO_3$... ~1700K

Fe - Ni 合金 ... ~1400K

$MgSiO_3$, Mg_2SiO_4 ... ~1300K

$CaAl_2Si_2O_8$, feldspars ... ~1200K

$(Na, K)AlSi_3O_8$... ~1100K

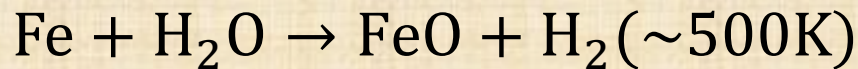
※feldspars中のAlは高温で凝縮した粒子と周囲のガスとの平衡で生成

13.4.3.1 平衡凝縮

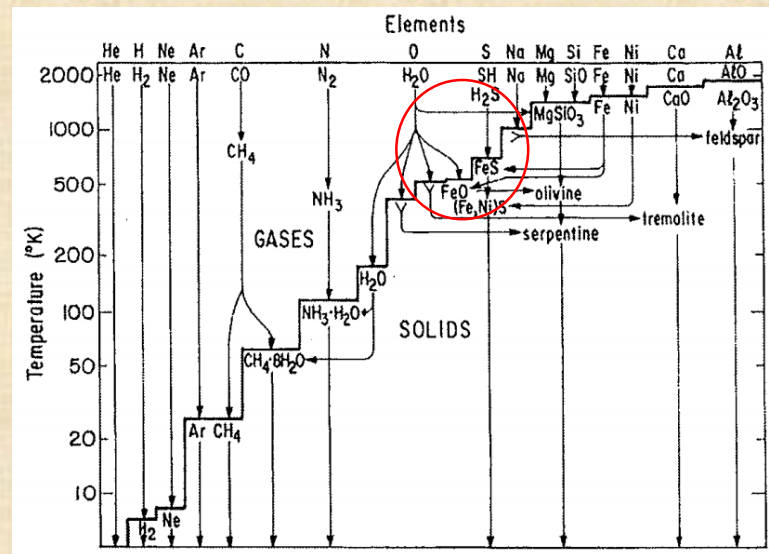
- 粒子の成長が冷却よりも早ければ、異なった鉱物が生成される。

- 中程度揮発性凝縮物

- 化学平衡が維持されるなら、ダスト上やガス中では温度が下がったときに



といった化学反応が起こる

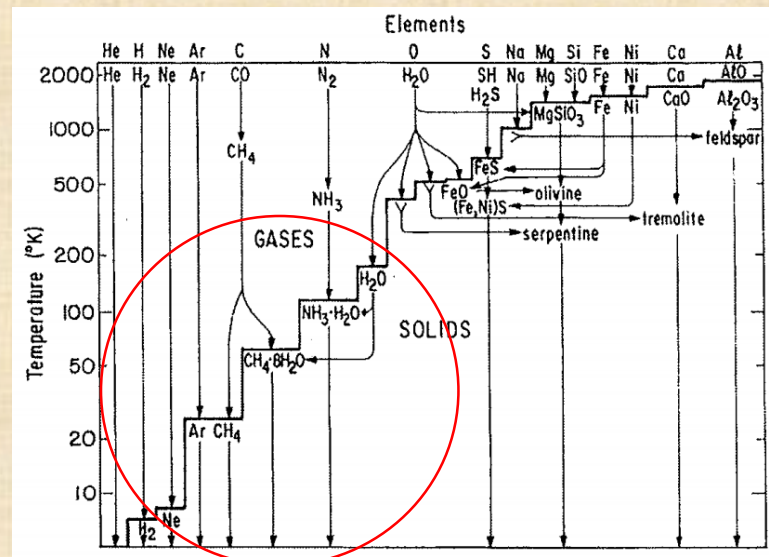


- FeOとMg-Siケイ酸塩との反応も行われる。

13.4.3.1 平衡凝縮

● 低温凝縮物 (揮発性凝縮物)

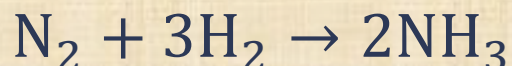
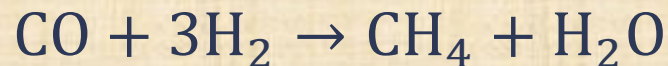
- 500K以下では水の働きが重要
- 水氷は200K以下で凝縮
- それ以下になるとNH₃やCH₄の
ハイドレートやクラスレートが
氷として存在するようになる
- さらに温度が下がり~40KになるとCH₄, Arの氷が形成される



結晶格子によって囲まれた入れ子に分子が取り囲まれ安定に存在する物質
ハイドレートは中に水を含むクラスレートの一種

13.4.3.2 非平衡凝縮

- 低温ほど



といった化学反応が進み、水和物ケイ酸塩が形成

- 上記反応は活動エネルギーが高いため平衡に達するのに円盤進化よりも長い時間が必要

→非平衡のまま形成

低温における凝縮反応は非平衡のため不確かなことが多い

※もし平衡が達成されれば、水和物ケイ酸塩として

サーペンティン($\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), $\text{Mg}(\text{OH})_2$ などが凝縮する

13.4.3.2 非平衡凝縮

変成度1~2の炭素質コンドライトはサーペンティンが主要水和物.

- ある隕石では水和物ケイ酸塩は大量に含まれる
 - それらの水和物は**集積後の氷を含んだ小惑星**で形成されたもので、原始太陽系円盤にて形成されたわけではない。
- “不”平衡種のCO, N₂は~60Kでクラスレートを形成できる

13.4.3.2 非平衡凝縮

- 低密度かつ低温の領域の平衡に必要な時間は冷却や凝縮の時間より長い
 - 円盤の寿命よりも長いかもしれない
 - 化学平衡は速度論的に妨げられる
- さらに星間物質の構成要素によってカインेटクスは変化する
- 重力崩壊から生じる星間物質のcの形態は...
 - 40% ダスト
 - 10% PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons : 多環芳香族炭化水素)
 - 50% CO(gas)
- 星間物質のNは
 - 大部分 NH₃
 - 残り N₂(gas)

希薄物質の気体
や微粒子などの
総称. 低密度下に
存在

=動力学

低温の円盤外側にあるCOとN₂は決してCH₄, NH₃に変わらず(?), 星間物質が円盤進化と共に気化するというのではない

→外側からやってくる彗星中のNH₃, CH₄は星間物質由来かもしれない
(?)

13.4.3.2 非平衡凝縮

- 隕石や彗星中のD/H比は原始太陽の値よりも非常に高い
 - 隕石は $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比も高い

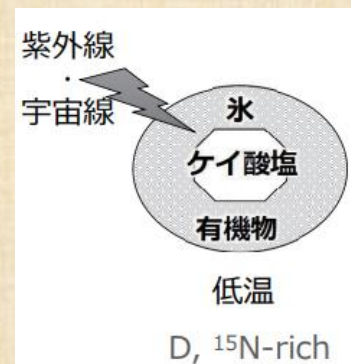
スピン温度：水素原子のスピンの励起状態を表す温度。

- 観測された彗星中の水のスピン温度は $\sim 30\text{K}$ (低い)
→ ガスからの直接凝縮ではなく、**低温粒子上への形成**が示唆

○高いD/H比 と 低いスピン温度

←いくつかの物質が冷たい星間雲の中で形成されることで説明可

- ... $\text{CH}_4:\text{CO}:\text{C}_2\text{H}_6$, $\text{H}_2\text{CO}:\text{CH}_3\text{OH}$ といった分子比率や他の大きな分子の存在
→ 彗星内での形成より先に氷粒子上で、**hydrogenation (水素化)** することで説明される。



癸生川 陽子、2015より引用

13.4.3.2 非平衡凝縮

- ガリレオ探査機による**木星大気**の観測
 - 太陽よりも**3~6倍高い**濃度の**揮発性元素**(C, N, S)と**希ガス**(Ar, Kr, Xe) (at ~10bar地点)
 - これらの元素は広い温度で凝縮するので、木星大気の**特定の範囲の豊**
富さはこれらの元素がH₂O氷にトラップされるか、**固体として十分に**
安定な温度で凝縮した微惑星によって持ち込まれる必要がある。(?)

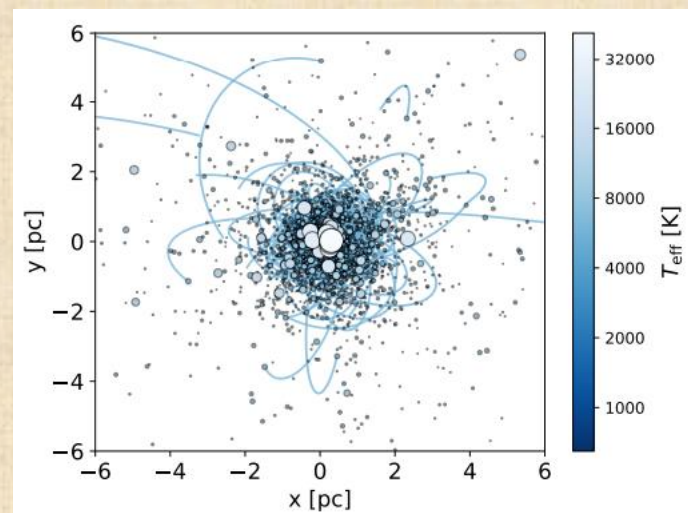
3~6倍という
特定の範囲

13.4.3.2 非平衡凝縮

- 円盤のモデルでは中心星への物質の集積中での、分子の存在度が進化することを説明している。

モデルの説明

- 星間粒子と同様に、CO, N₂やその他のガスは星間物質を由来とし、組成を全体に散りばめる
- 温度が高く恒星に十分近い場所では化学平衡が重要になる
- 太陽から数AU離れた場所では非平衡の化学が重要になる
- 宇宙線やx線で生成されるイオンが分子種を進化させる
- 例えばCOであれば、CO₂, H₂CO, CH₄に変わり、N₂であればNH₃, HCNに変わる
 - 時間が経過して、イオン化率が上がると総CO, N₂量が減り、反応は抑制されていく
 - 十分に低温でガスの分子比が凍結すると、そのガスは粒子中に吸収される
 - そうした氷が内側移動すると再び昇華する



Oberg et al. (2020), Fig 2より引用
これはモデルの概要ではないが、
宇宙線やx線の発生元はこのよ
うな星団である。

13.4.3.2 非平衡凝縮

- 上記のようなモデルによって、彗星中のCH₄, CO, CO₂といった分子種の共存を説明でき、円盤内で星間粒子が生き残ることも説明できる
 - 星間粒子中の大量の水分子は星間由来のものである
- 化学は非常に複雑なので、こうした太陽系形成のモデルはより洗練されたものになってきた

14.4.4 ガスの晴れ上がり

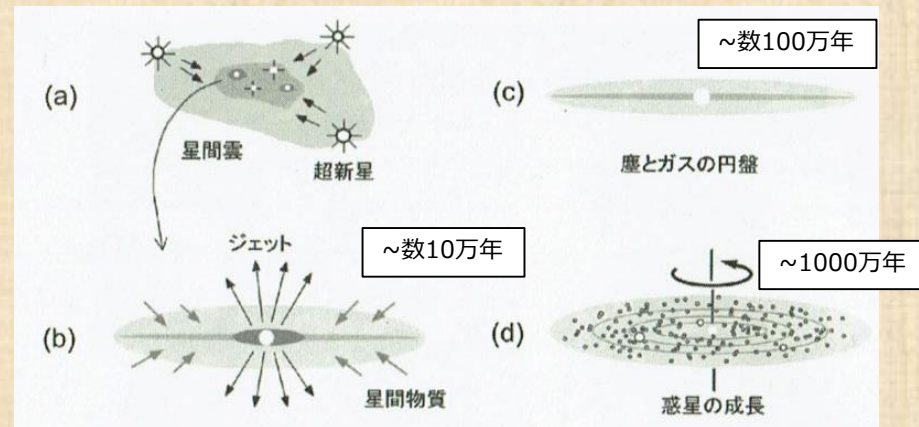
- 現在、惑星間にガスは無い → 円盤進化の過程で消し去る必要がある

○ガスを消し去るアイデア

- (近くの恒星) and/or (活動的T-タウリ星型時の初期太陽) 由来の紫外線による円盤表面からの除去
→ photoevaporation (光蒸発) と呼ぶ

- T-タウリ型星の期間はおよそ原始太陽形成後の $10^6 - 10^7$ 年
- ガス消失のタイミングは**巨大惑星の成長**に関わる

ガス消失の時間スケールは大抵は**若い星の周囲の典型的なダスト円盤の寿命** ($\lesssim 10^7$ yr) と仮定される



14.4.4 ガスの晴れ上がり

- 4つの巨大惑星の岩石, 氷を形成する元素の質量はほぼ等しい
 - 一方でH, Heの存在度は100倍ほど異なる
- この差は円盤内のガスが消えたタイミングと惑星の成長度の兼ね合いで決定される。