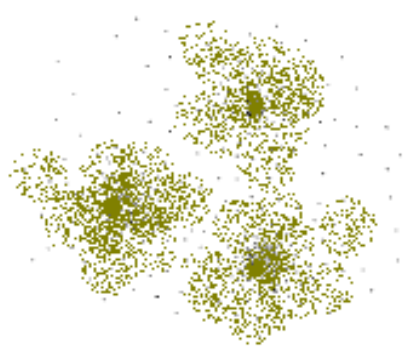
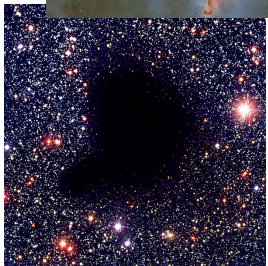


原始惑星系円盤
の光蒸発：
metallicity dependence

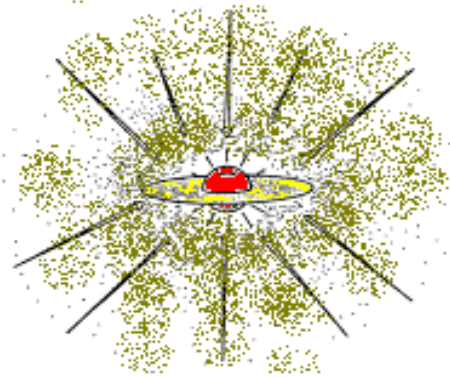
細川 隆史

w/ 仲谷 峻平 (東大D1) 他

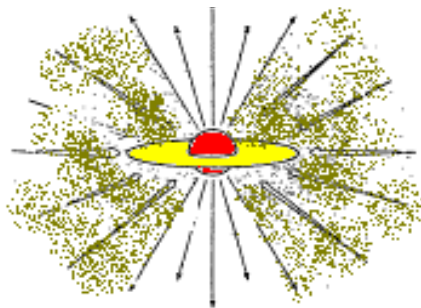
星形成の標準シナリオ



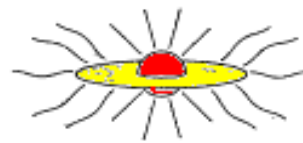
①分子雲中の高密度部分
(~太陽質量)の重力崩壊



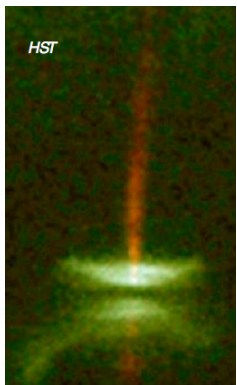
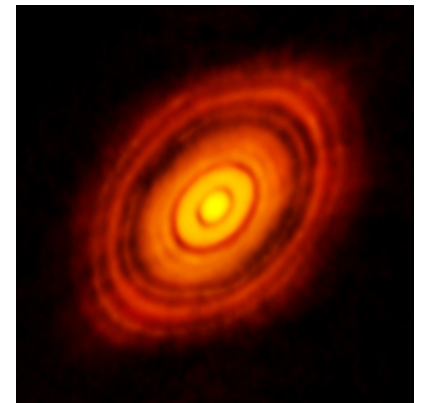
②原始星の形成と
原始星への質量降着



③星からのフィードバック
による降着の終了



④降着円盤の残骸
(原始惑星系円盤)
での惑星系形成

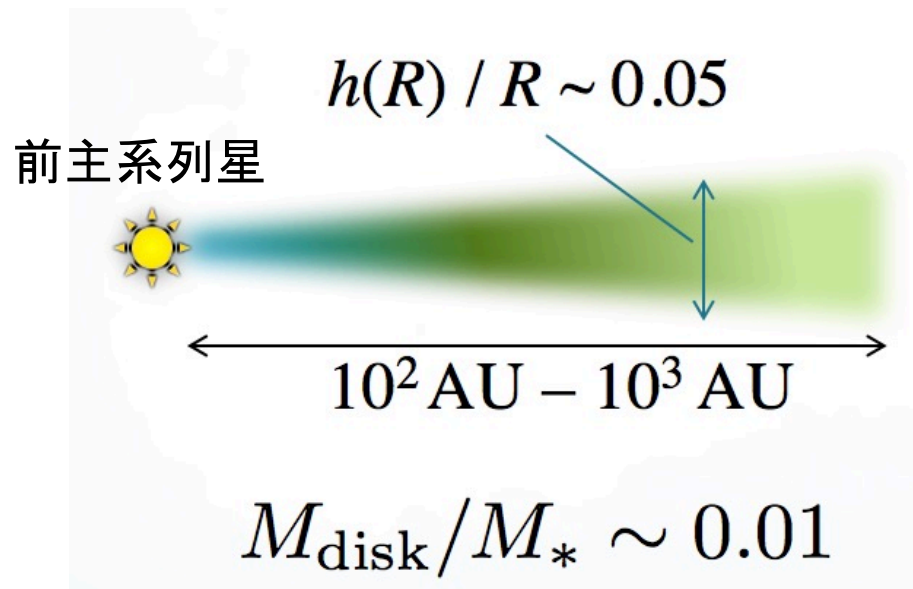


④の最後の段階を考える

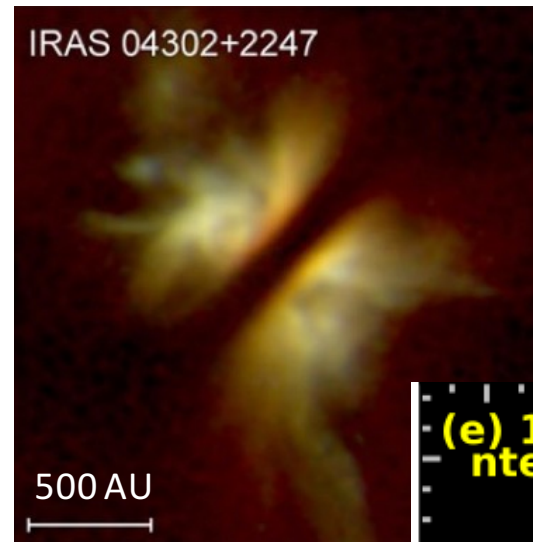
原始惑星系円盤

protoplanetary disk

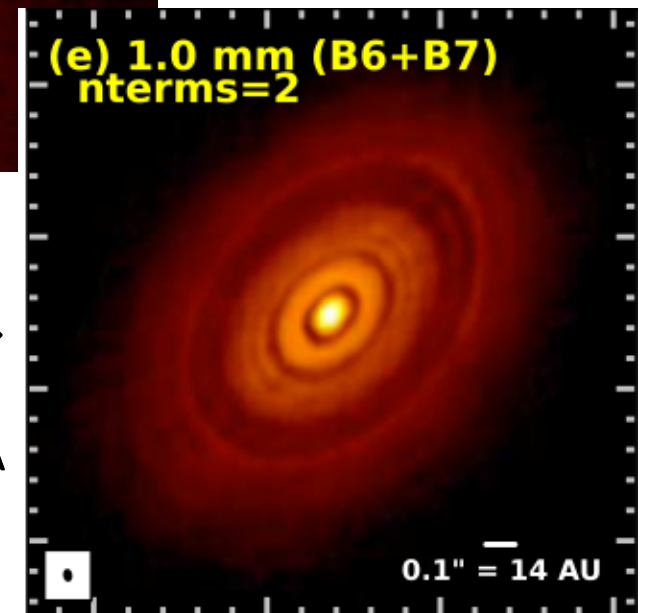
星形成の副産物としてできる。惑星形成の舞台



ガス+ダストからなるケプラー円盤
(ダスト/ガス質量比 ~ 0.01)

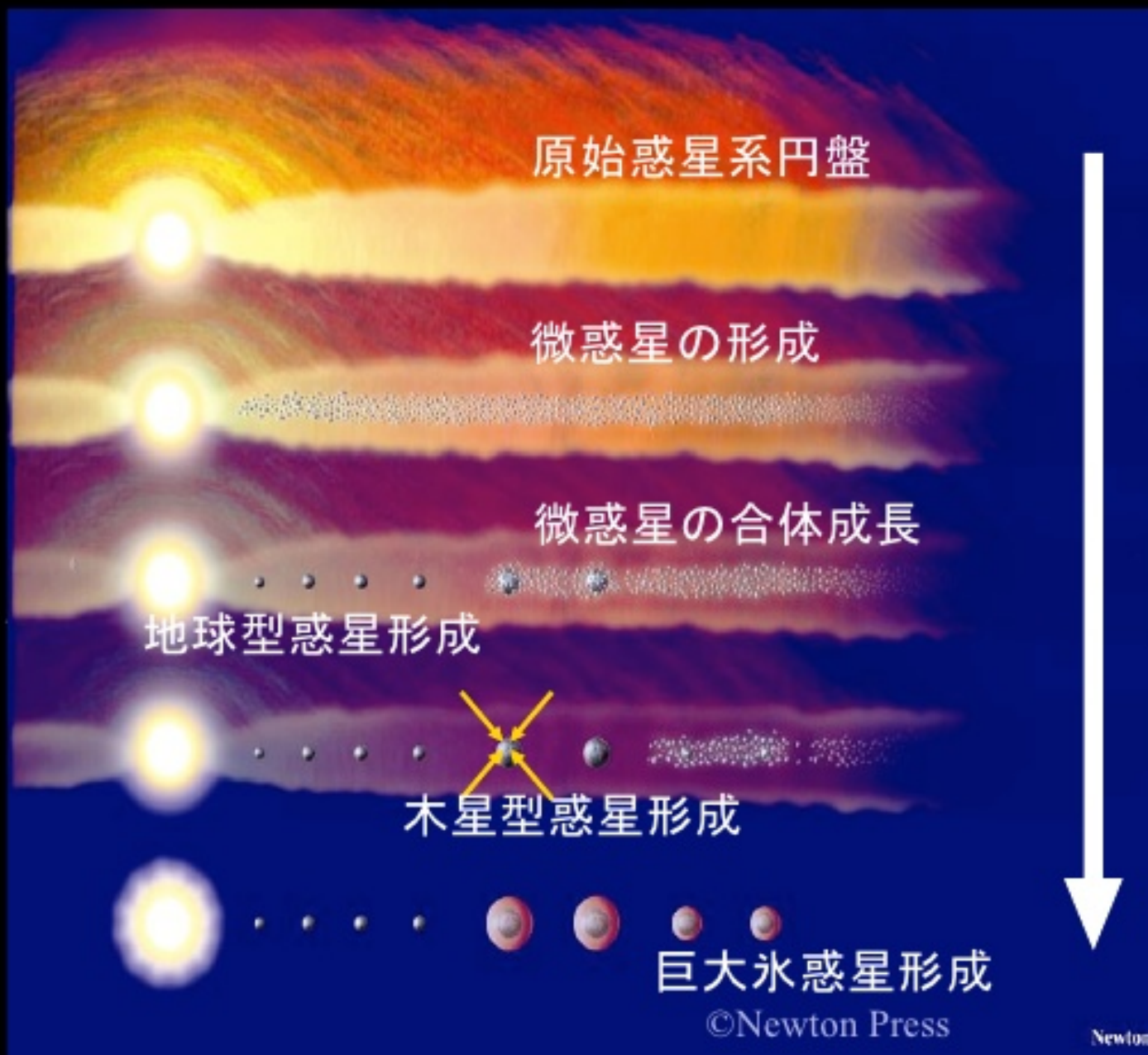


←
@near-IR,
w/HST



→
@sub-mm,
w/ALMA

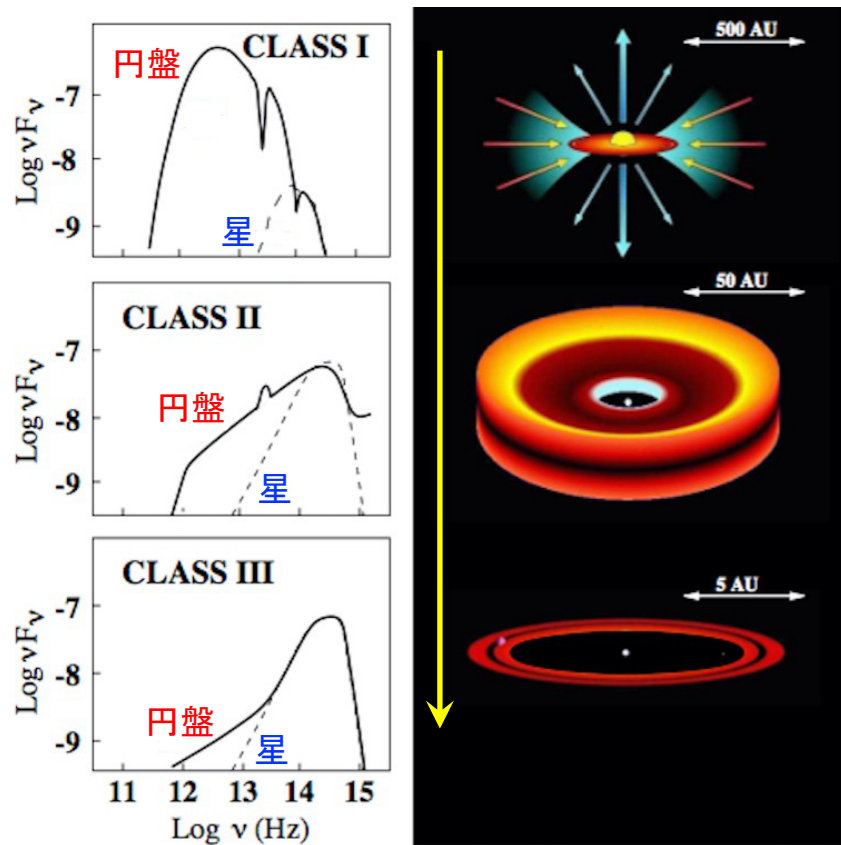
太陽系形成標準理論 (林モデル)



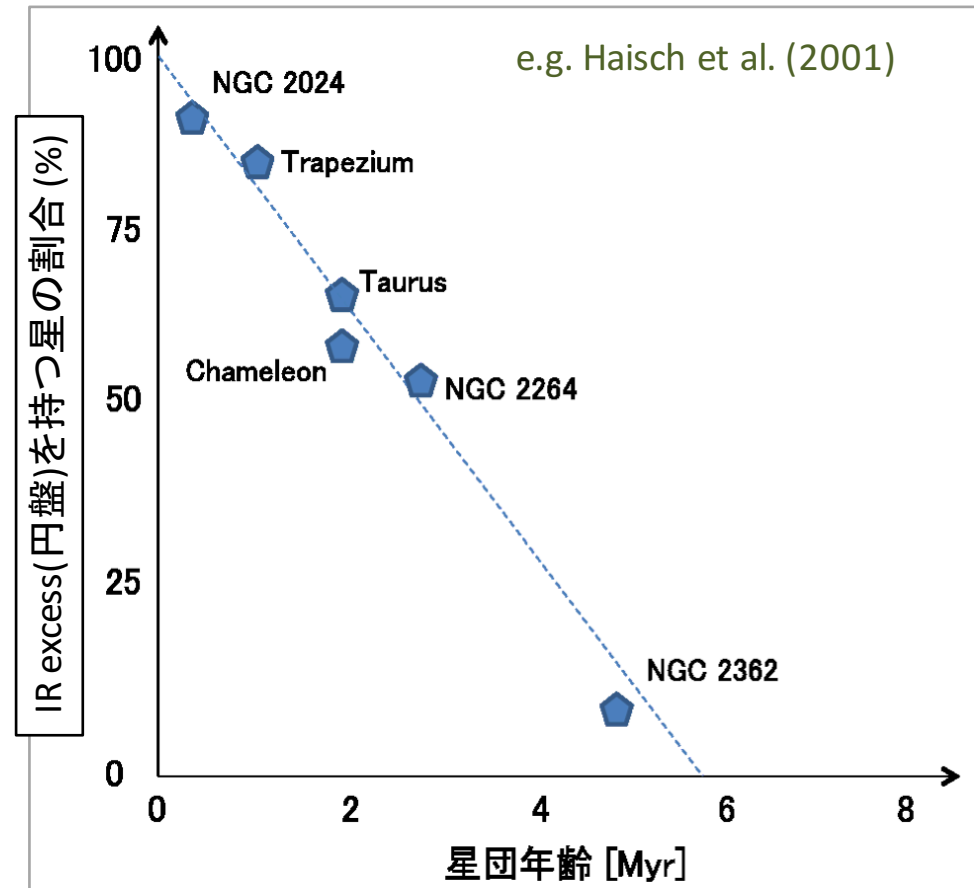
原始惑星系円盤の消失

およそ数Myr程度の時間スケールで円盤が失われる (ガス/ダスト両方)

原始星スペクトルの進化



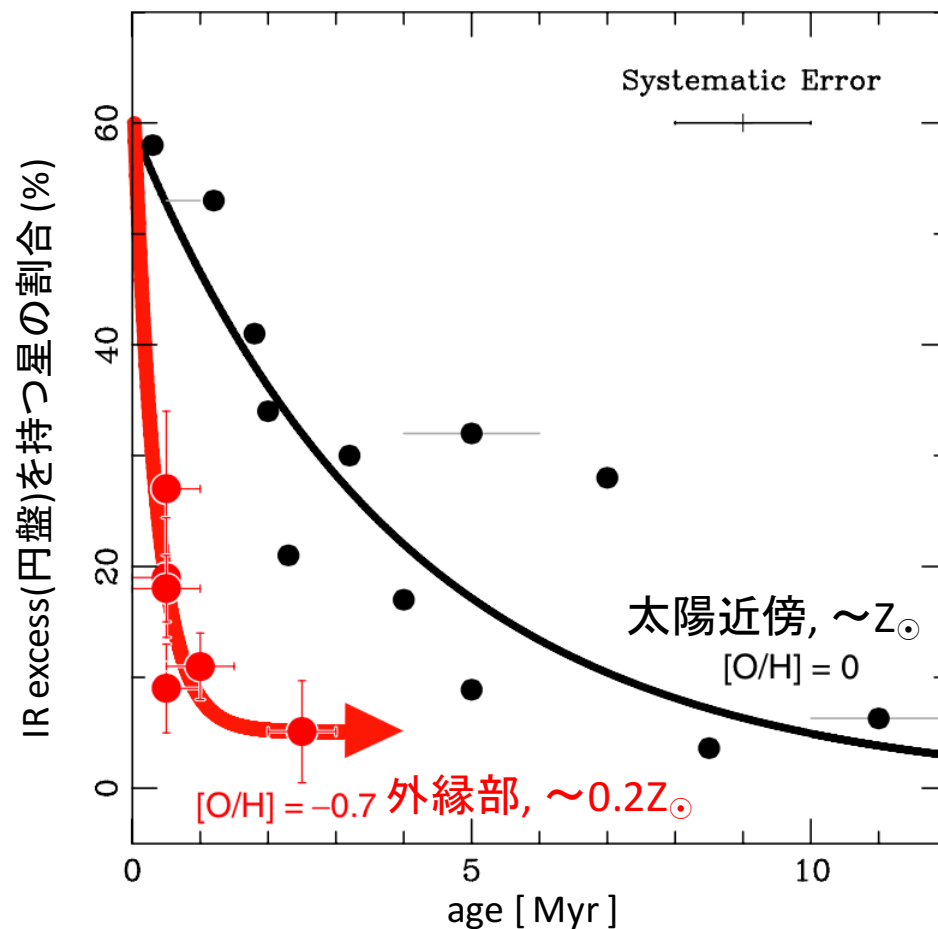
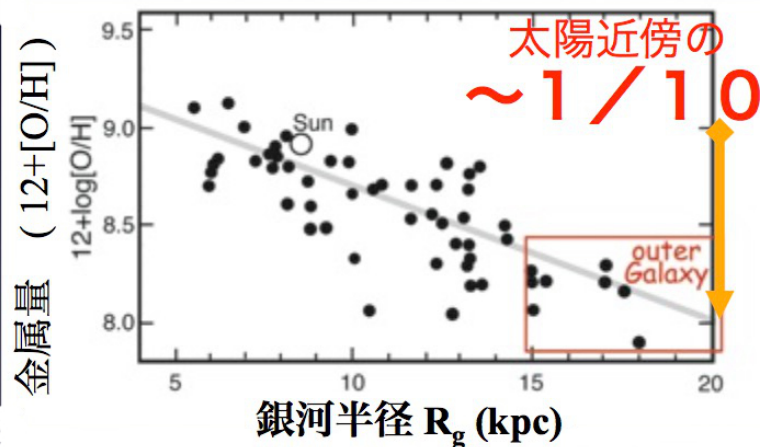
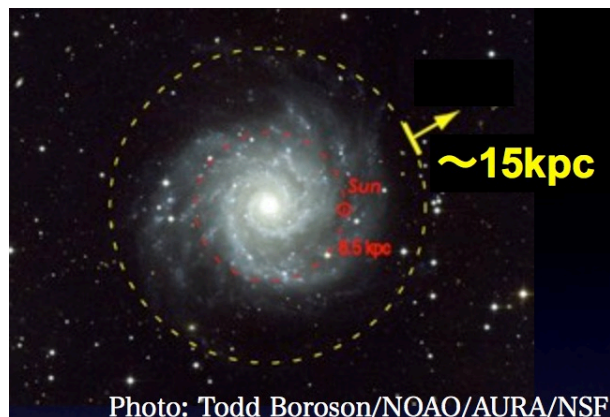
初期: 星自身の放射+低温の円盤成分
時間とともに円盤成分は消えていく



巨大ガス惑星(木星型)形成は
この過程でlimitされる

円盤寿命と金属量

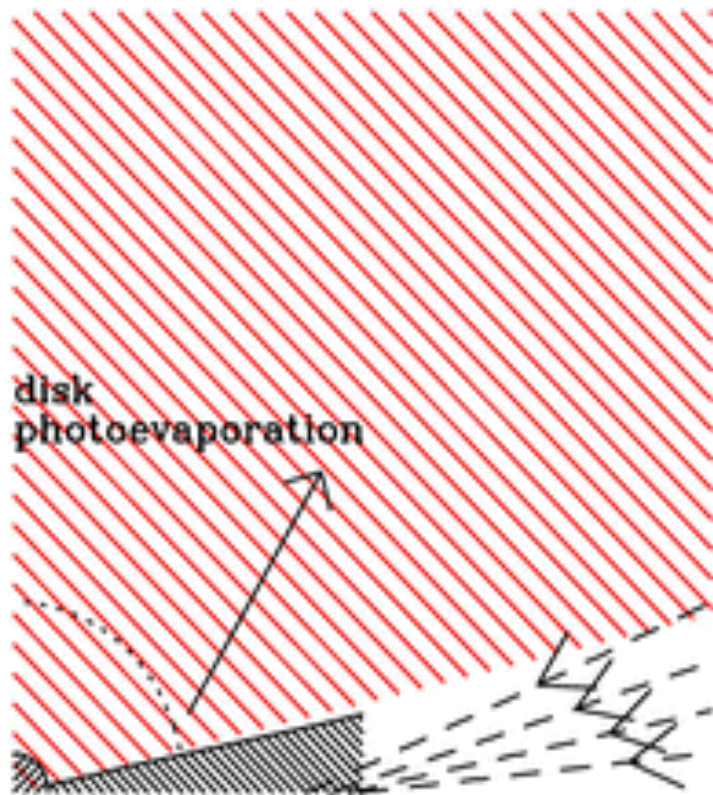
Yasui+10他: 金属量の小さい銀河系外縁部(15kpc以遠)の星団について
円盤成分をもつ原始星の割合を調べた



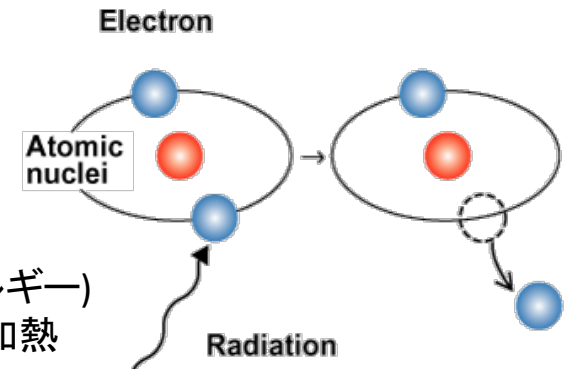
外縁部にある星団6つについて
すばる望遠鏡によるJ/H/K-band deep-imaging

金属量が低い方が早く円盤消失

光蒸発 (photoevaporation)



星からの紫外光(>13.6eV)による
水素原子の光電離



(光子のエネルギー) - (結合エネルギー)
が電子の運動エネルギーとなって加熱

→ 電離ガス温度 $\sim 10^4\text{K}$

質量 M_* の中心星で重力boundする限界半径

$$r_g = \frac{GM_*}{c_s^2} \approx 10\text{AU} \left(\frac{10^4}{T} \right) \left(\frac{M_*}{1M_\odot} \right)$$

これ以遠の電離ガスはboundできず流出

蒸発率の見積: $\dot{M}_{\text{ph}} = 4 \times 10^{-10} M_\odot \text{ yr}^{-1} \left(\frac{\Phi_i}{10^{41} \text{ s}^{-1}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)^{1/2}$ Hollenbach+94

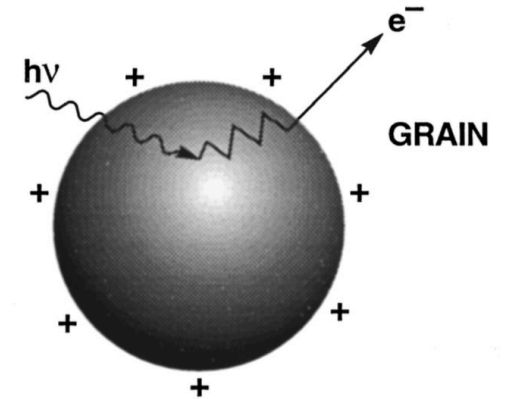
およそ10Myrで $\sim 0.01M_\odot$ の円盤散逸

重元素の効果：FUV光蒸発

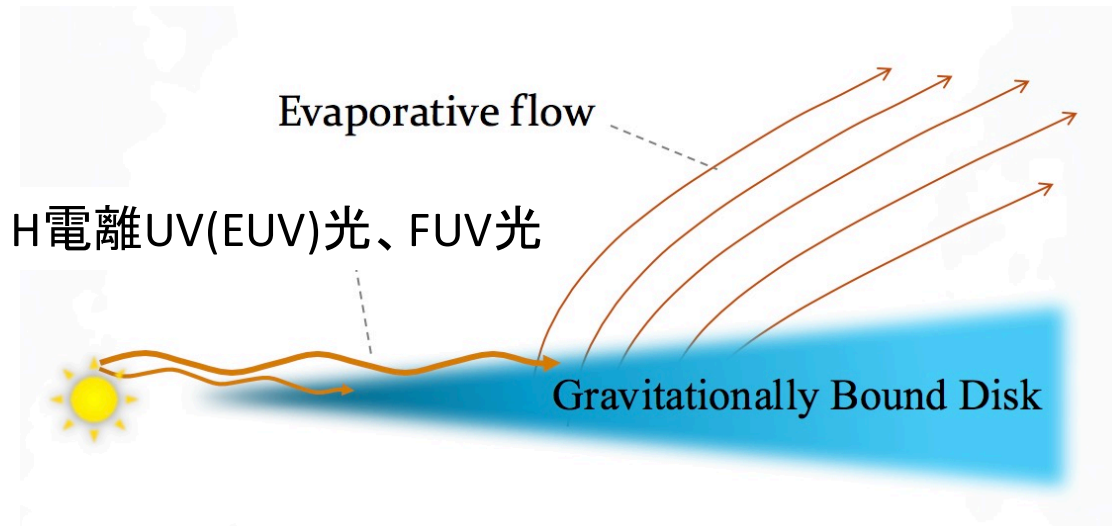
Far UV光: 電離光(>13.6eV)よりやや低エネルギーのUV光
 $6\text{eV} < \sim h\nu < \sim 13.6\text{eV}$

ダスト粒子に吸収→光電効果によって電子放出

(光子のエネルギー) - (仕事関数)
が電子の運動エネルギーとなって加熱



→ 中性/分子Hガスを数100-1000Kまで加熱



[cross sections]
H電離光: 10^{-17} cm^2
FUV光: $10^{-21} \text{ cm}^2 (Z/Z_{\odot})$

FUV光は円盤の奥の方まで
達しやすい

(local evaporating mass flux) $\propto n_0 c_s$

円盤内は赤道面に近づけば急激に密度が上がるため、FUV光の寄与が dominantになりえる (ダスト量に依存)

目的

- 原始惑星系円盤の消失があらゆる金属量下でどのように起こるかを知りたい
- 特に有力過程とみなされている光蒸発がどのような依存性を持つか
- 観測の依存性を説明できるか

手法: 2D rad.-hydro simulations

連続: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0$

EOM: $\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \frac{GM_* \mathbf{r}}{r^3}$

Energy: $\frac{de}{dt} = -P \frac{d}{dt} \frac{1}{\rho} + \Gamma - \Lambda$

Chemistry: $\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{R}(\rho, T, T_{\text{gr}}, \mathbf{F}_{\text{photon}})$

EOS: $e = \frac{P}{\rho(\gamma - 1)} = \frac{kT}{\mu m_u (\gamma - 1)}$

Radiation: $\mathbf{F}_{\text{ph}} = \mathbf{F}_{\text{ph}}(t, \mathbf{r})$

+ 初代星形成のときと同様だが、重元素の効果追加
chemistry, heating/cooling process, dust absorption

+ EUV/FUV transfer: radial ray-tracing

dust thermal emission: hybrid w/ FLD + ray-tracing

+ 中心星重力が卓越 (自己重力off)

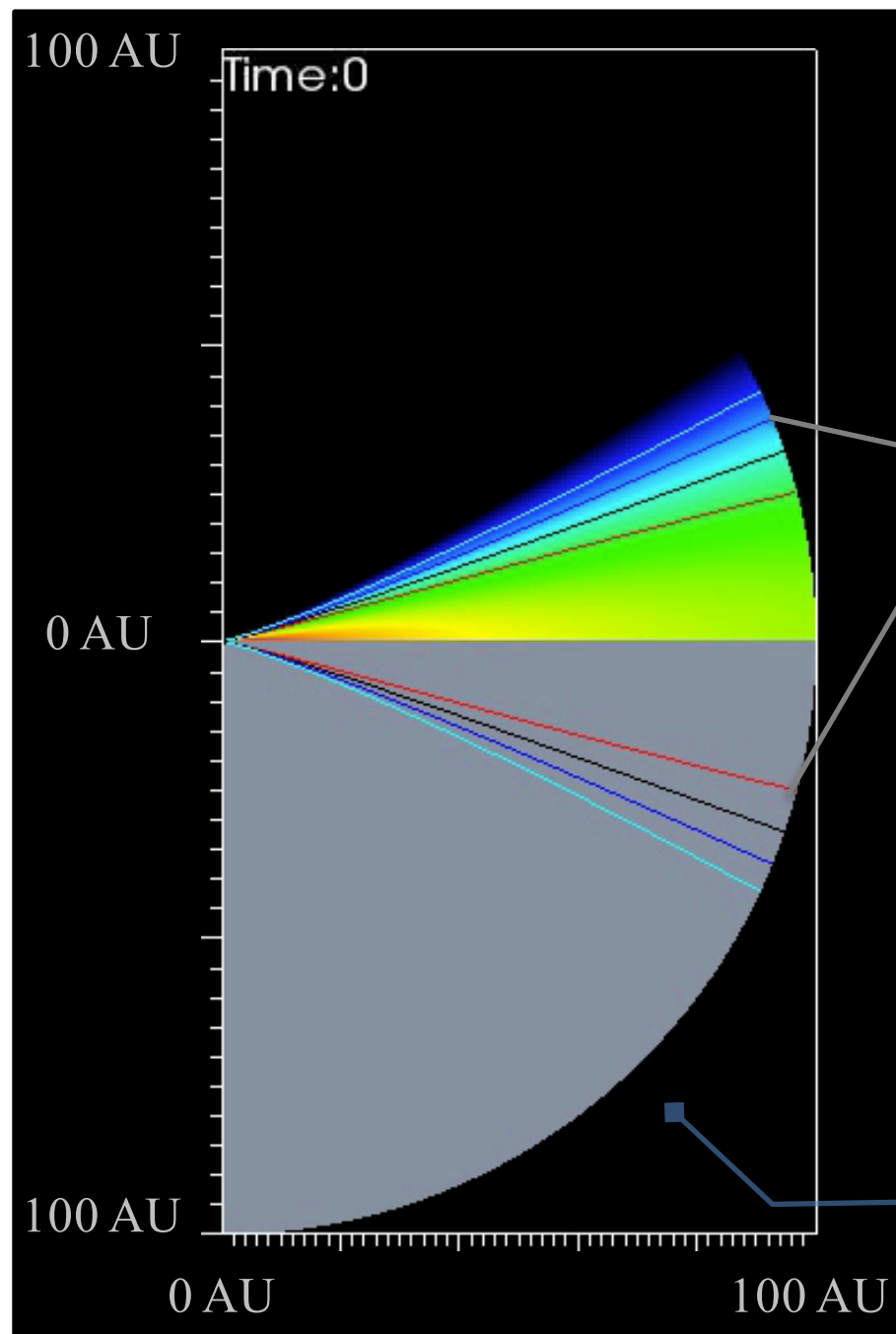
+ dynamical time $\ll 10\text{Myr}$ のため、準定常になったら終

※ 太陽金属量下でももっと荒い計算しかない

@ $Z = Z_{\odot}$

密度構造

化学構造



Contour (n_H)

Cyan : $10^5 / \text{cm}^3$

Blue : $10^6 / \text{cm}^3$

Black : $10^7 / \text{cm}^3$

Red : $10^8 / \text{cm}^3$

Abundances

赤道面から

H_2 , H , H^+

の3層構造

Metallicity Dependence

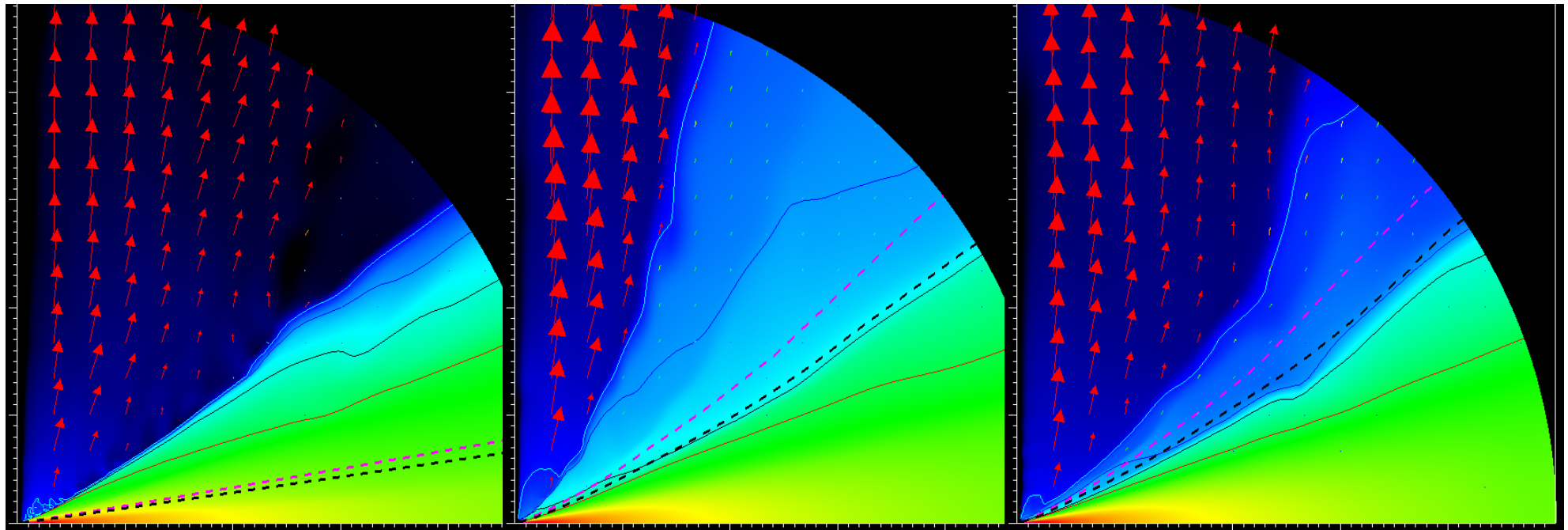
$$Z = 10^{-4} Z_{\odot}$$

$$Z = 10^{-0.5} Z_{\odot}$$

$$Z = 10^{+0.5} Z_{\odot}$$

低金属量

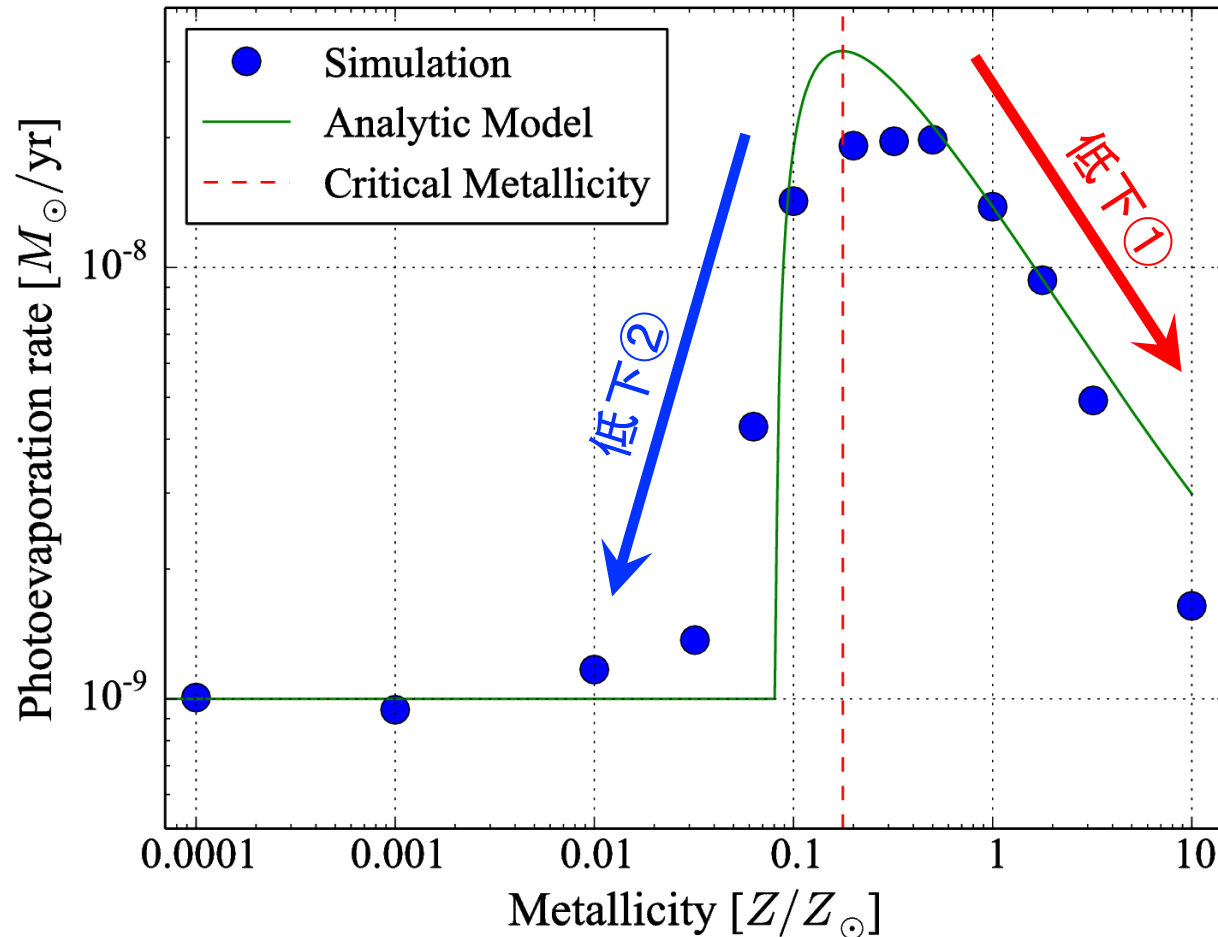
高金属量



蒸発流構造に金属量の依存性がある

solarよりわずかに低い金属量の際に円盤が大きくflare upしている
(このときにFUV光の効果が最も効いているため)

蒸発率と金属量



太陽金属量弱をピークにそれよりhigher/lower metallicityで蒸発率は下がる

- + 低下①: ダスト減光が効いてFUV光が円盤内部まで入り込めない
- + 低下②: FUV光は円盤奥まで達するが、光電加熱の効率が下がって温度が上がらない

(semi-)Analytic Model

- + 蒸発流の根本(base)は中心星から測って $A_V=0.5$ の位置であるとする
ここでの n_H 、 G_0 を見積もる

$$n_H \sim \frac{1}{2\Sigma_d(Z/Z_\odot)r} \quad \Sigma_d = 5.34 \times 10^{-22} \text{ mag cm}^{-2}$$

- + baseでの温度分布を1-zone的に熱平衡を仮定して求める
(photo-electric heating) = (H_2 , OI, dust-gas collisional cooling)

$$\Rightarrow T_{\text{fit}} = T_0(Z) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha(Z)}$$

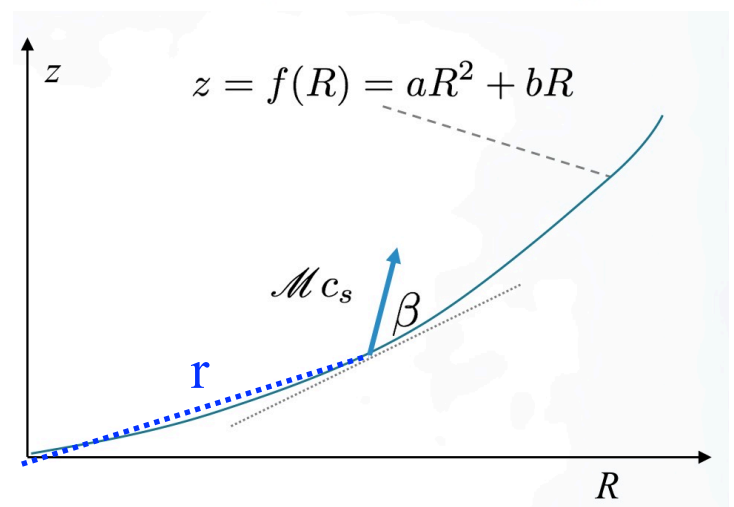
- + 蒸発が起きるのはbaseで
specific enthalpy: η が正の場合

$$\eta = \frac{1}{2} v_p^2 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} c_s^2 - \left(\frac{GM_*}{r} - \frac{1}{2} v_\phi^2 \right)$$

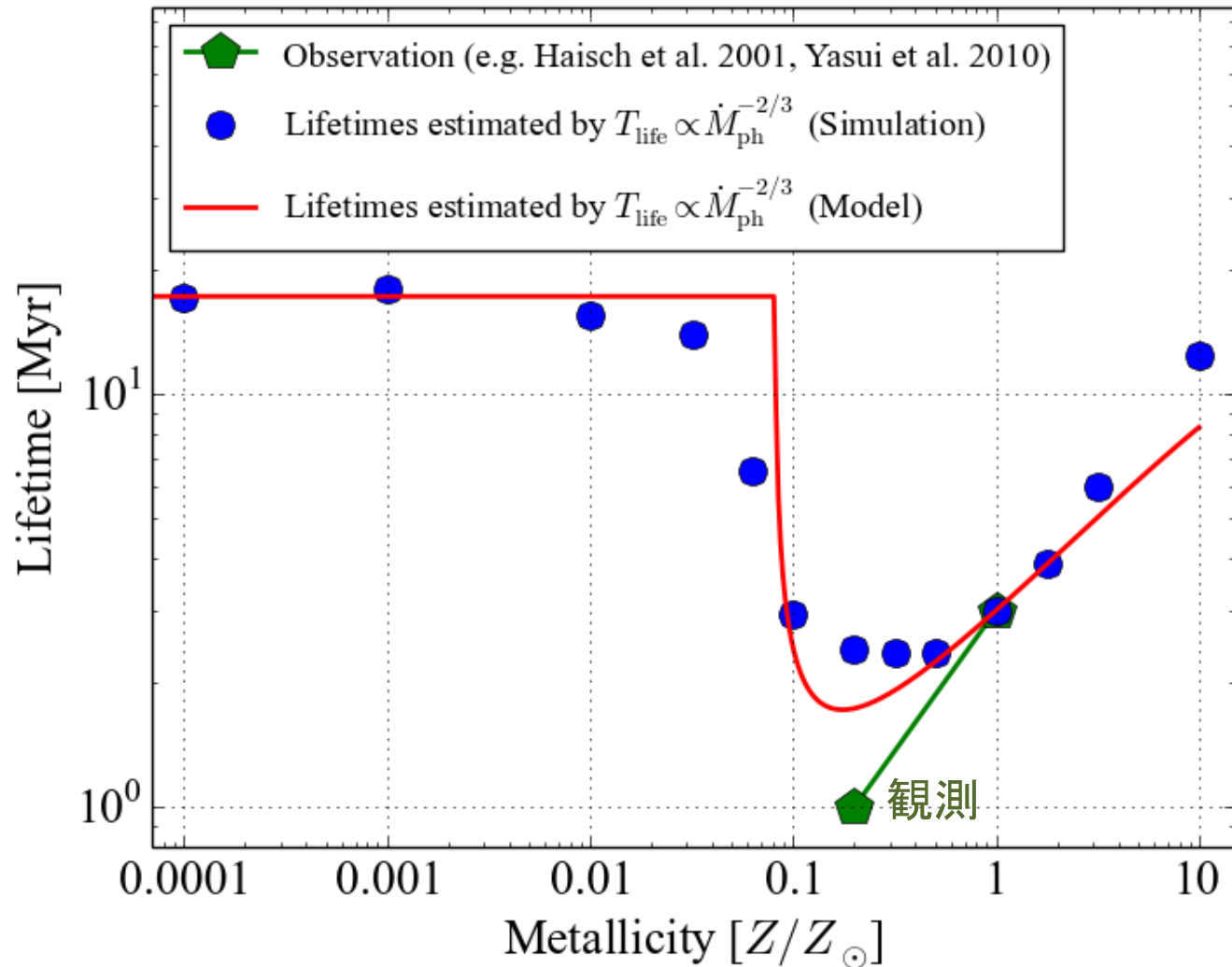
- + 蒸発率:

$$\dot{M}_{\text{FUV}}^{\text{ana}} = 2 \int_{\eta > 0} dR \sqrt{1 + f'^2} 2\pi R \rho \left(\frac{v_p}{\mathcal{M} c_s} \right) \sin \beta$$

ここでbaseの形状: $z=f(R)$, マッハ数: \mathcal{M} , 蒸発流れの方向: β
はsimulationの平均値を用いる



観測との比較



+ 傾向は悪く無さそうに見える

+ simulation/modelともに外部境界の位置に依存性があり、効果を調べている

まとめ

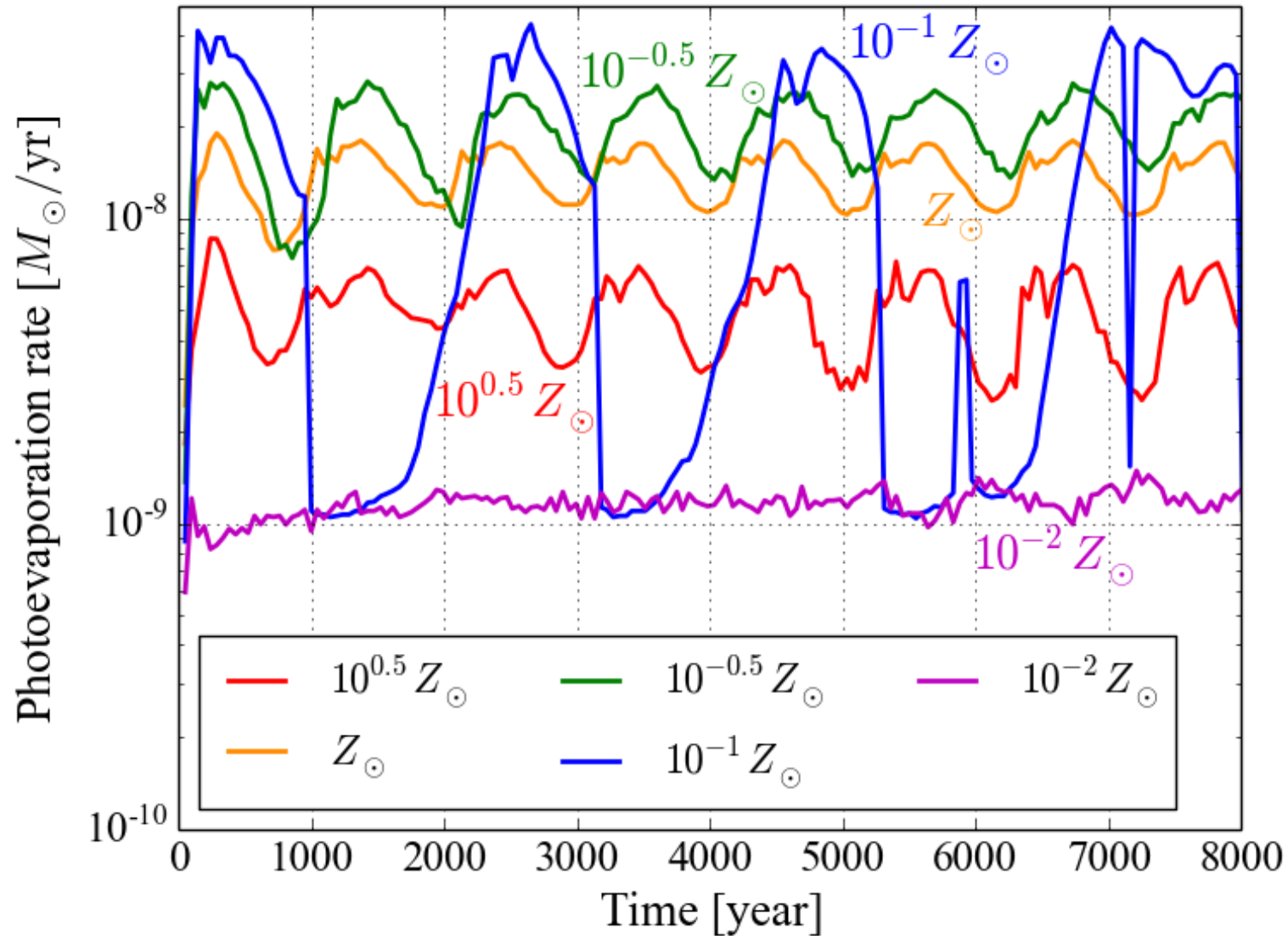
- + 原始惑星系円盤の光蒸発による消失、その金属量依存性;
FUV光の寄与により、solarよりやや低金属量で最も蒸発率大
それより高/低金属量では蒸発率は下がる

[future work]

- + X線による光蒸発: FUV v.s. X-ray
さかんに議論も決着せず。両方入れたRHD simulationないため。
金属量依存性?
- + 大質量星形成の問題に換装 (福島問題)

BACK UP

蒸発率の時間変動

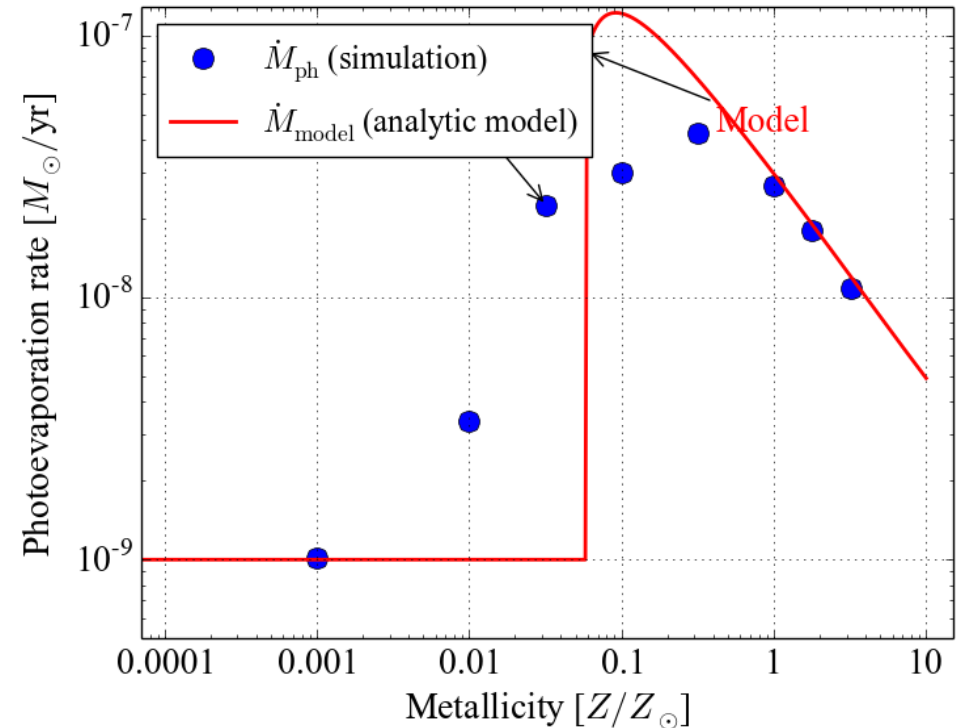
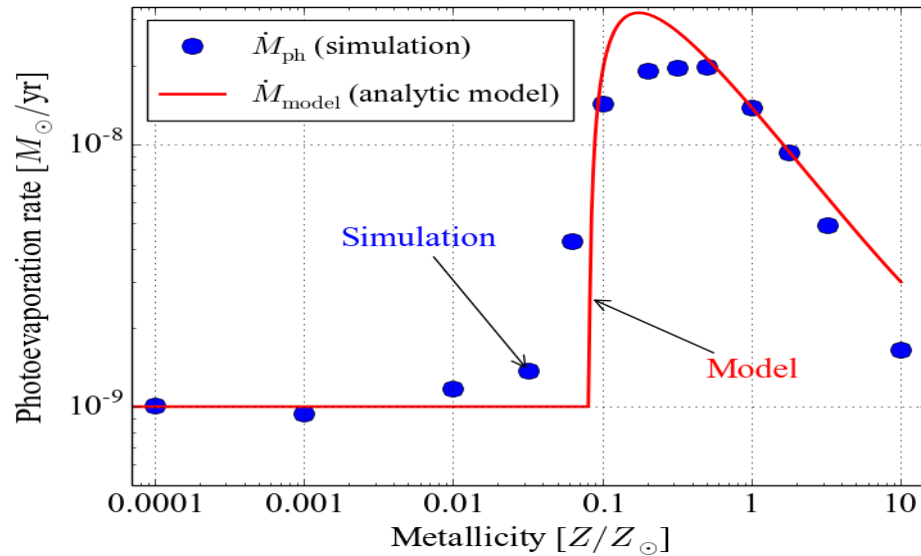


特にFUVがぎりぎり効く場合に大きく変動する。Timescale \sim dynamical time

外部境界の依存性

$$R_{\text{out}} = 180 \text{ AU}$$

$$R_{\text{out}} = 80 \text{ AU}$$



- + $Z > 0.01 Z_{\odot}$ では $R_{\text{out}} = 180 \text{ AU}$ のときの方が蒸発率は2倍程度大きい
- + $Z = 0.001 Z_{\odot}$ では差は見られない