

原始惑星系円盤における 光蒸発の金属量依存性

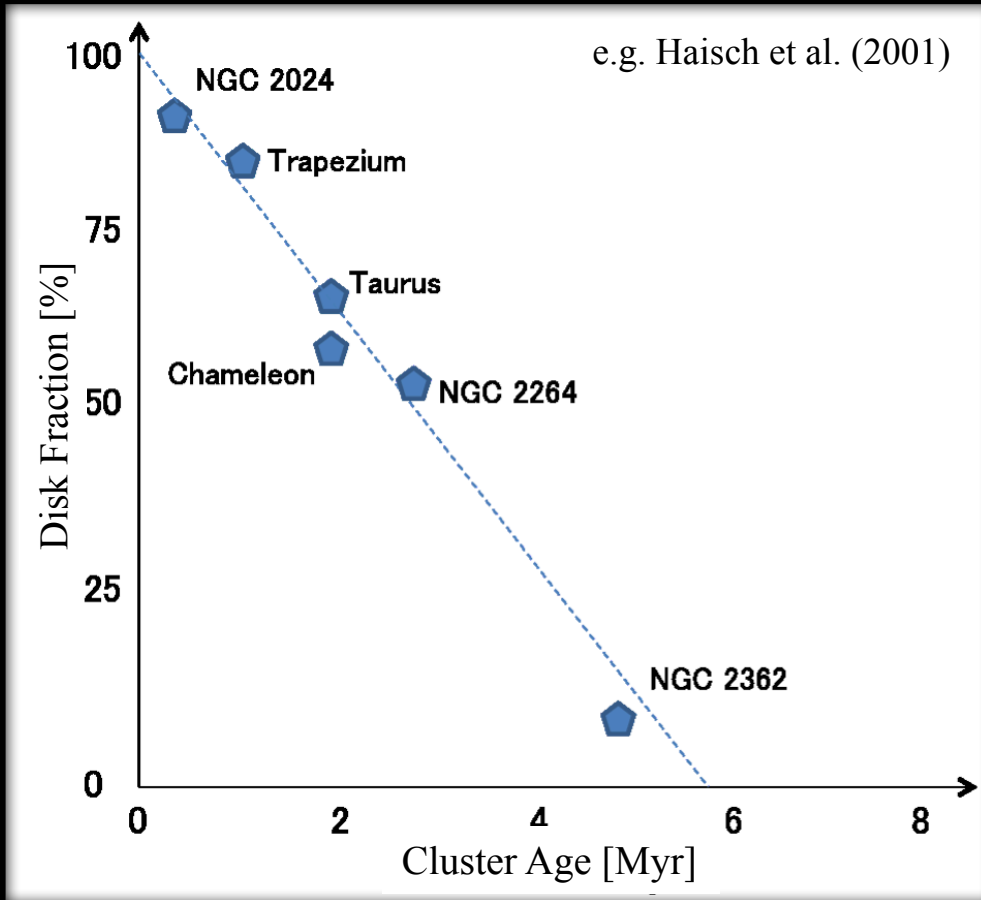
仲谷 峻平¹, 細川 隆史², 吉田 直紀¹, 野村 英子³, Rolf Kuiper⁴

1: 東京大学, 2: 京都大学, 3: 東京工業大学, 4: テュービンゲン大学

(Nakatani et al. submitted to ApJ; arXiv:1706.04570)

基研研究会「原始惑星系円盤」於 京都大学 7/10 – 7/12

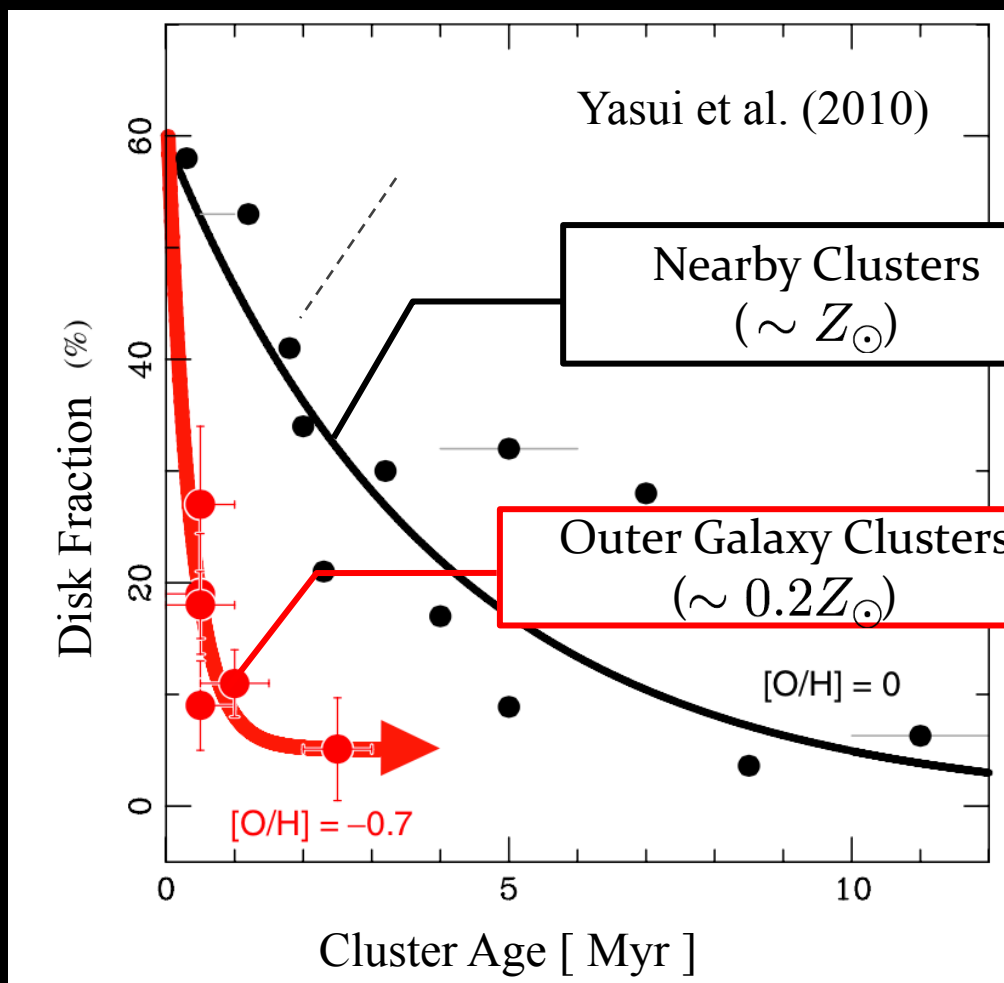
原始惑星系円盤の寿命



古い星：
円盤少ない

有限の時間で円盤が消失、
~ 3-6 Myr

寿命の金属量依存性



低 Z (金属量):
早い/速い消失

(低 $Z \rightarrow$ 少量の金属/ダスト)

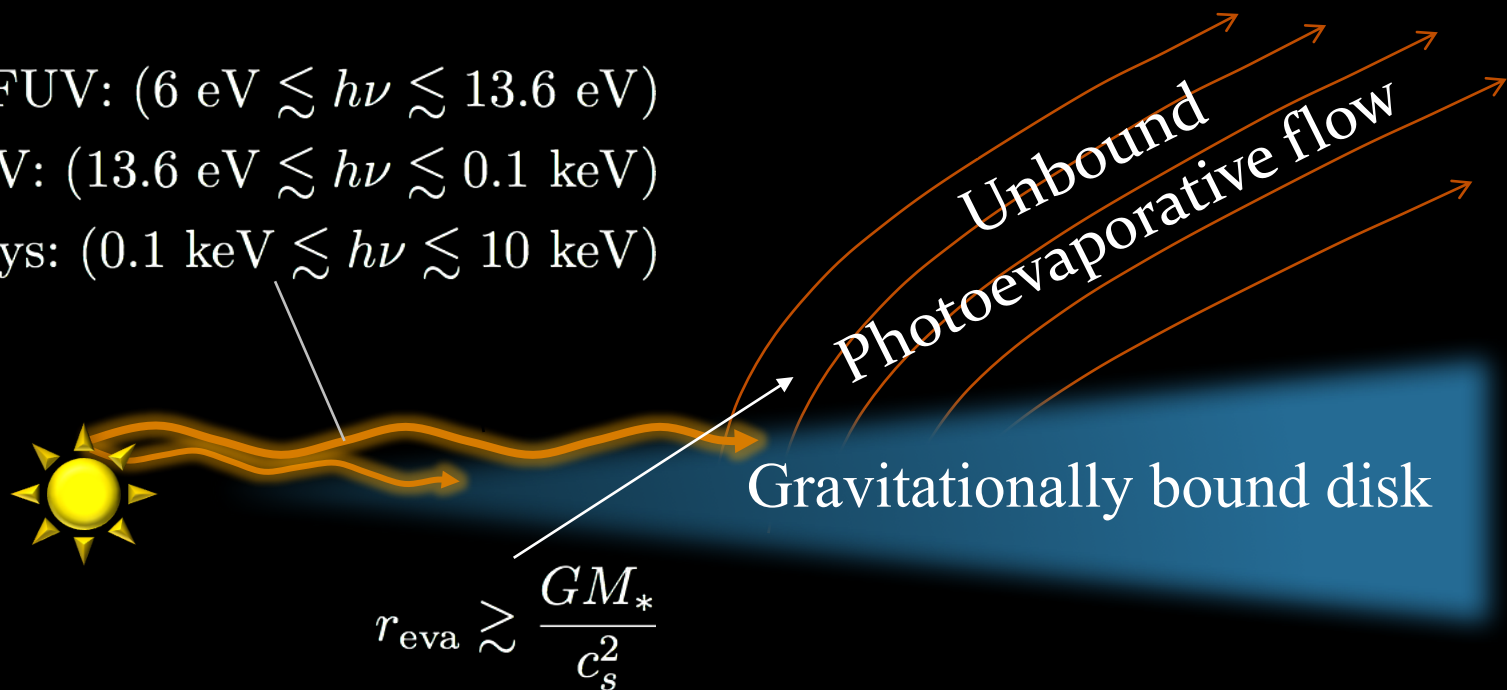
~ 1 Myr

低 Z 環境が影響?

どのように円盤は消失するか —光蒸発—

e.g., Bally & Scoville (1982); Shu et al. (1993), Hollenbach et al. (1994)

FUV: ($6 \text{ eV} \lesssim h\nu \lesssim 13.6 \text{ eV}$)
EUV: ($13.6 \text{ eV} \lesssim h\nu \lesssim 0.1 \text{ keV}$)
X-rays: ($0.1 \text{ keV} \lesssim h\nu \lesssim 10 \text{ keV}$)



遠紫外線 (FUV), 超紫外線 (EUV), X線加熱は
物理的に異なるタイプの光蒸発流を駆動する。

光蒸発の種類

e.g., Hollenbach et al. (1994); Richling & Yorke (1997, 2000); Font et al. (2004); Alexander et al. (2004); Ercolano et al. (2008, 2009); Gorti & Hollenbach (2008, 2009); Owen et al. (2010, 2012); Tanaka et al. (2013, 2017);

	FUV	EUV	X-rays
Photon energy	$6 \text{ eV} \leq h\nu \leq 13.6 \text{ eV}$	$13.6 \text{ eV} \leq h\nu \leq 100 \text{ eV}$	$0.1 \text{ keV} \leq h\nu \leq 10 \text{ keV}$
Main absorber	Dust	Atomic hydrogen	Metal elements
Attenuation column	$N_{\text{H}} \sim 10^{21} \text{ cm}^{-2}$	$N_{\text{HI}} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	$N_{\text{H}} \sim 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
Flow density	$n_{\text{H}} \sim 10^5 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$	$n_{\text{H}} \sim 10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$	$n_{\text{H}} \sim 10^5 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$
Temperature	$\sim 10^2 - 10^3 \text{ K}$	$\sim 10^4 \text{ K}$	$\sim 10^3 - 10^4 \text{ K}$
Flow velocity	$\sim 1-5 \text{ km/s}$	$\sim 10 \text{ km/s}$	$\sim 5 \text{ km/s}$

本研究目的:

- FUV/EUV光蒸発の金属量依存性
- 観測的寿命の金属量依存性への示唆

計算方法

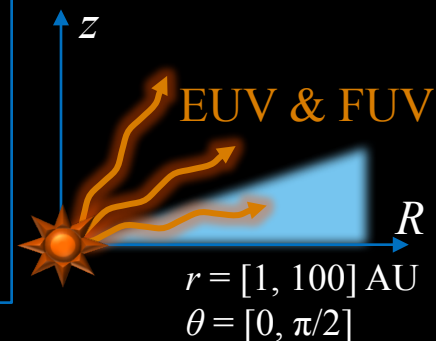
(金属・ダスト量はZに比例する仮定)

Hydrodynamics (PLUTO ver. 4.1)

+ EUV & FUV transfer (developed by RN)

+ dust IR transfer (developed by Rolf Kuiper)

+ non-equilibrium Chemistry (developed by RN)



基礎方程式

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

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \frac{GM_*}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

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

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

$$\frac{d\mathbf{y}}{dt} = R(n_H, \mathbf{y}, T, T_{\text{dust}}, \mathbf{F}_{\text{local}})$$

$$\mathbf{F}_{\text{local}} = \mathbf{F}_{\text{local}}(\mathbf{r}, t)$$

加熱/冷却過程

< 加熱 >

- ・ 電離加熱 (EUV加熱)
- ・ 光電加熱 (FUV加熱)

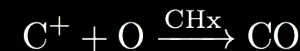
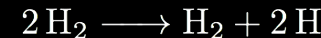
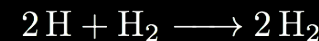
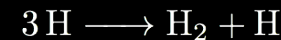
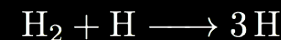
< 輝線冷却 >

- ・ H₂, CO,
- ・ CII, OI, HI(Ly α)

< 他の冷却 >

- ・ 放射性再結合 (HII + e \rightarrow HI),
- ・ ガス-ダスト衝突冷却

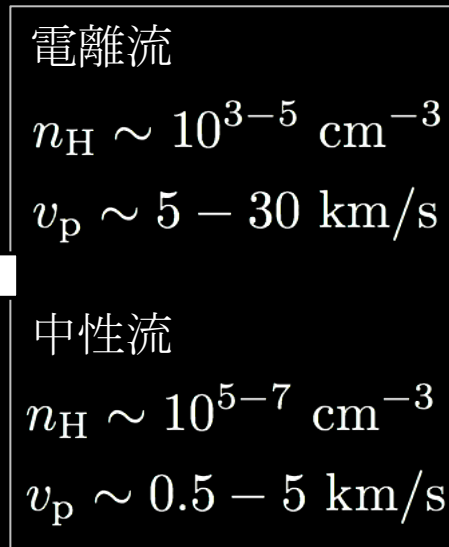
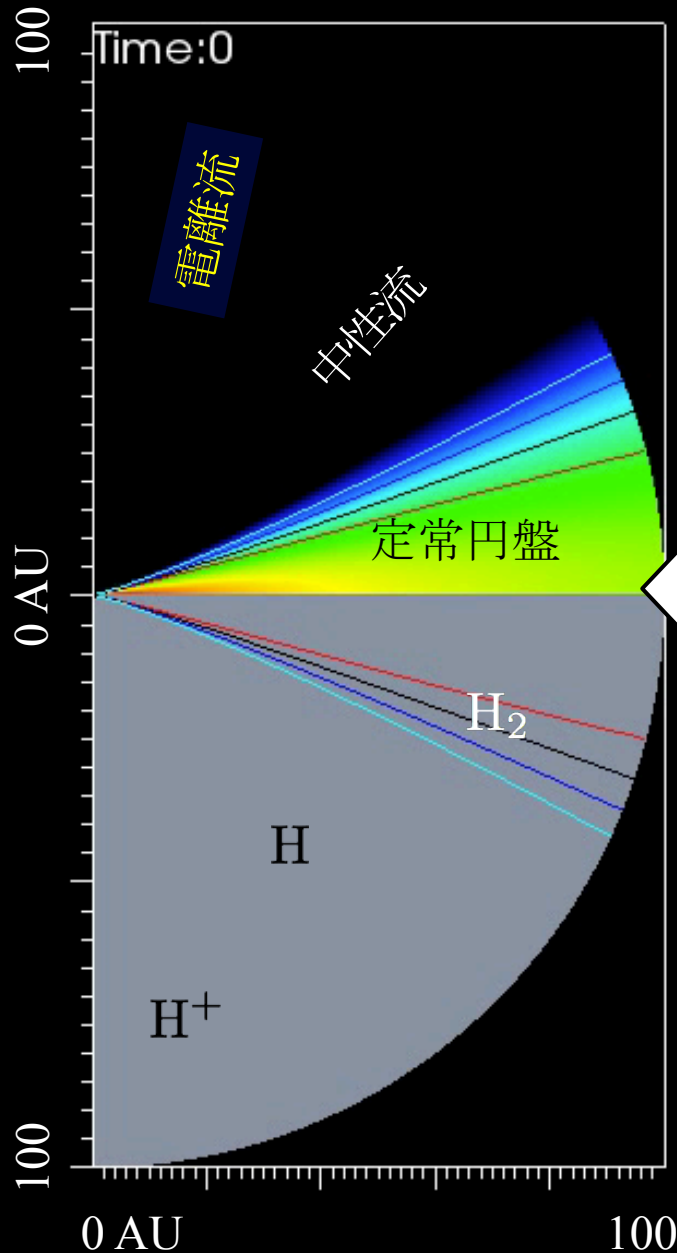
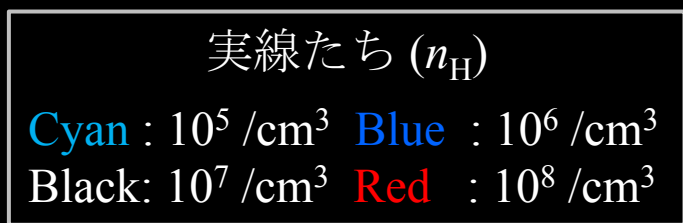
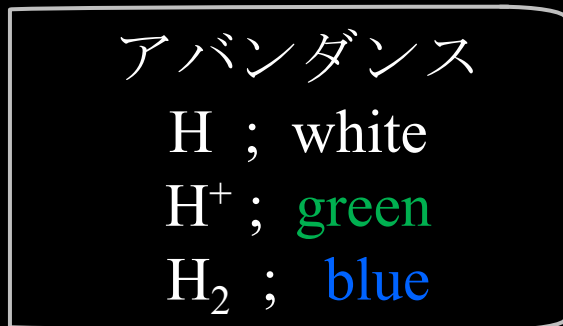
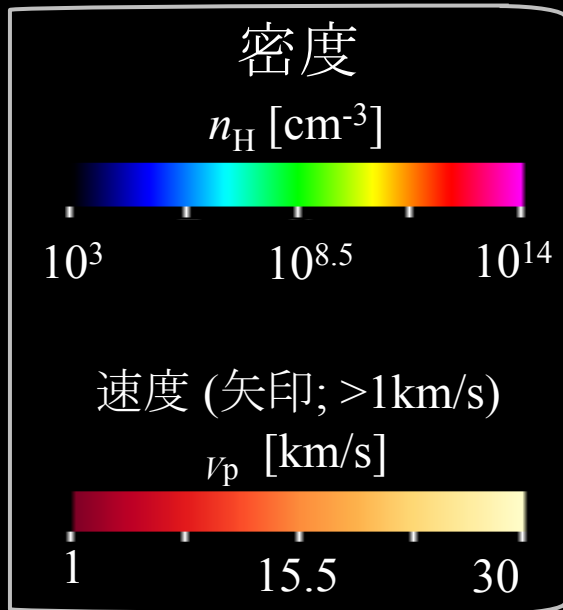
化学反応



化学種

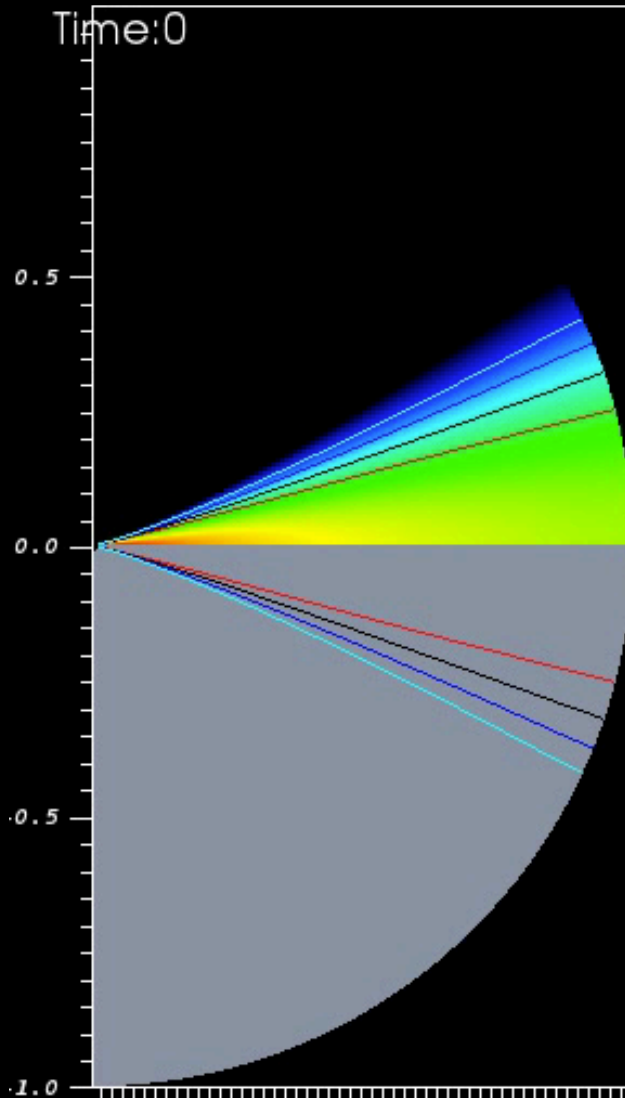
H H⁺ H₂ e CO CII OI

太陽金属量円盤



高密度な中性流

🕒 FUV switch off: 5



何が中性流を駆動？

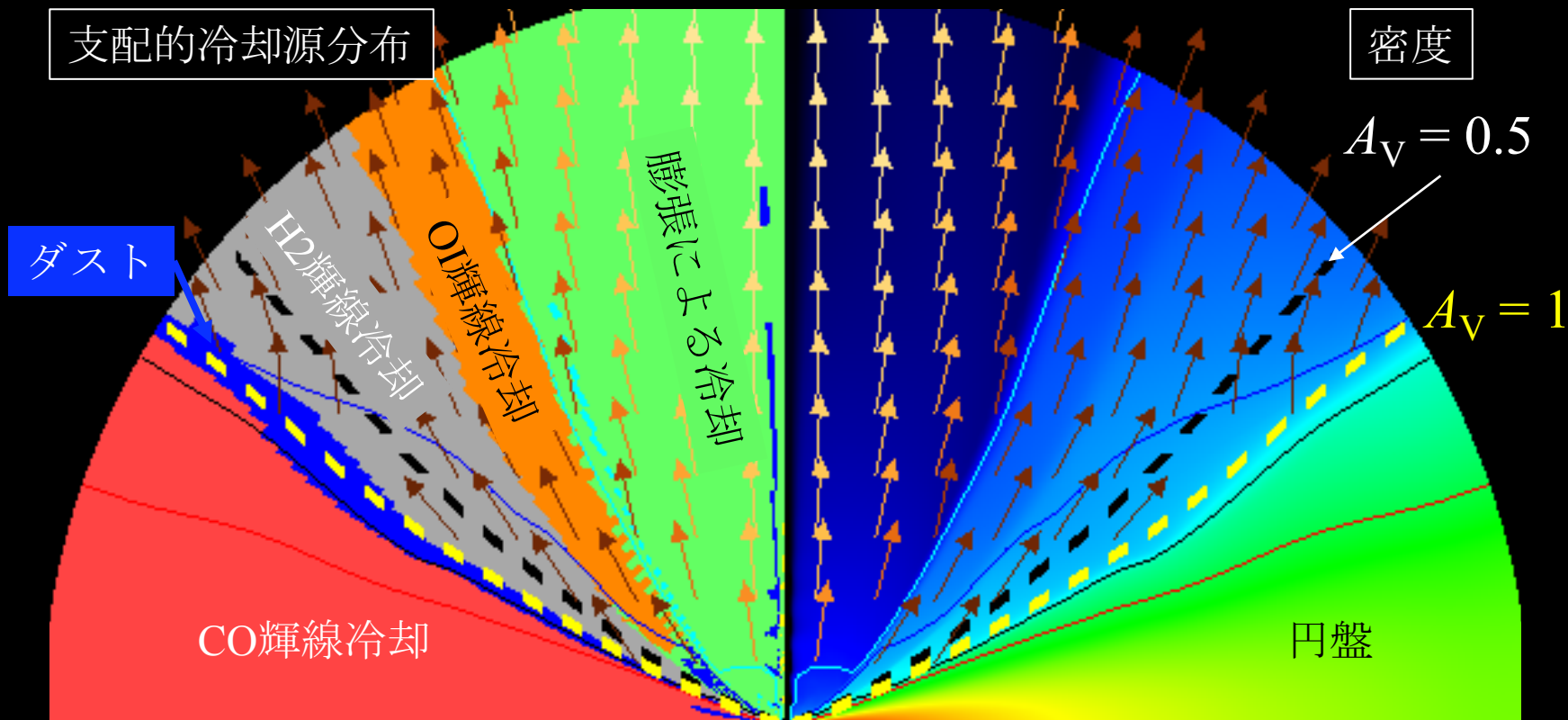
← 光电加熱 (FUV加熱) をTime = 1 で切ってみた

Time = 1の後、中性流 (H, H₂) は駆動されず、電離流 (H⁺) のみが駆動される。

高密度な中性流は、FUV加熱によって駆動された。

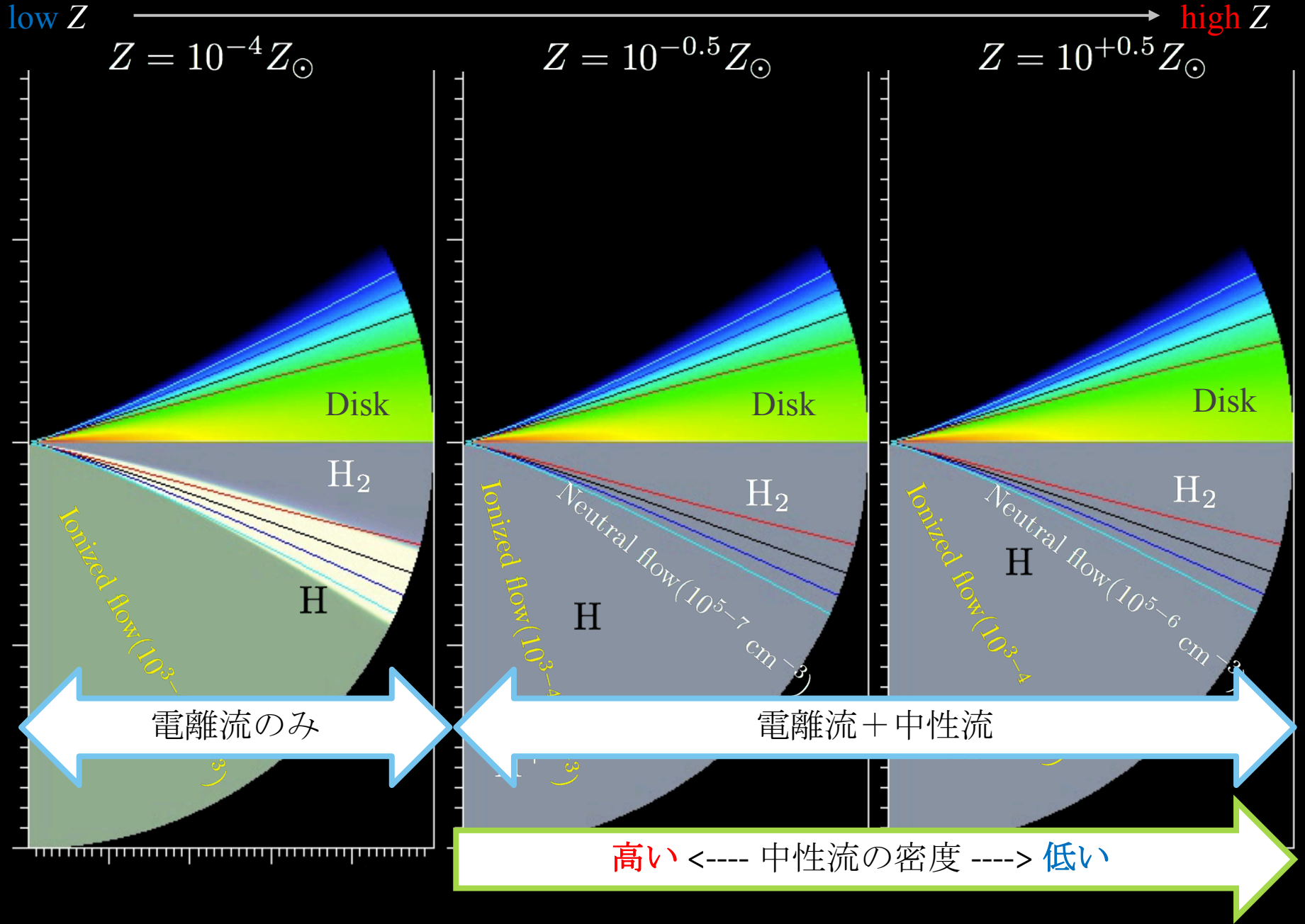
(電離流はEUV加熱により駆動されている。)

光蒸発の“ベース”

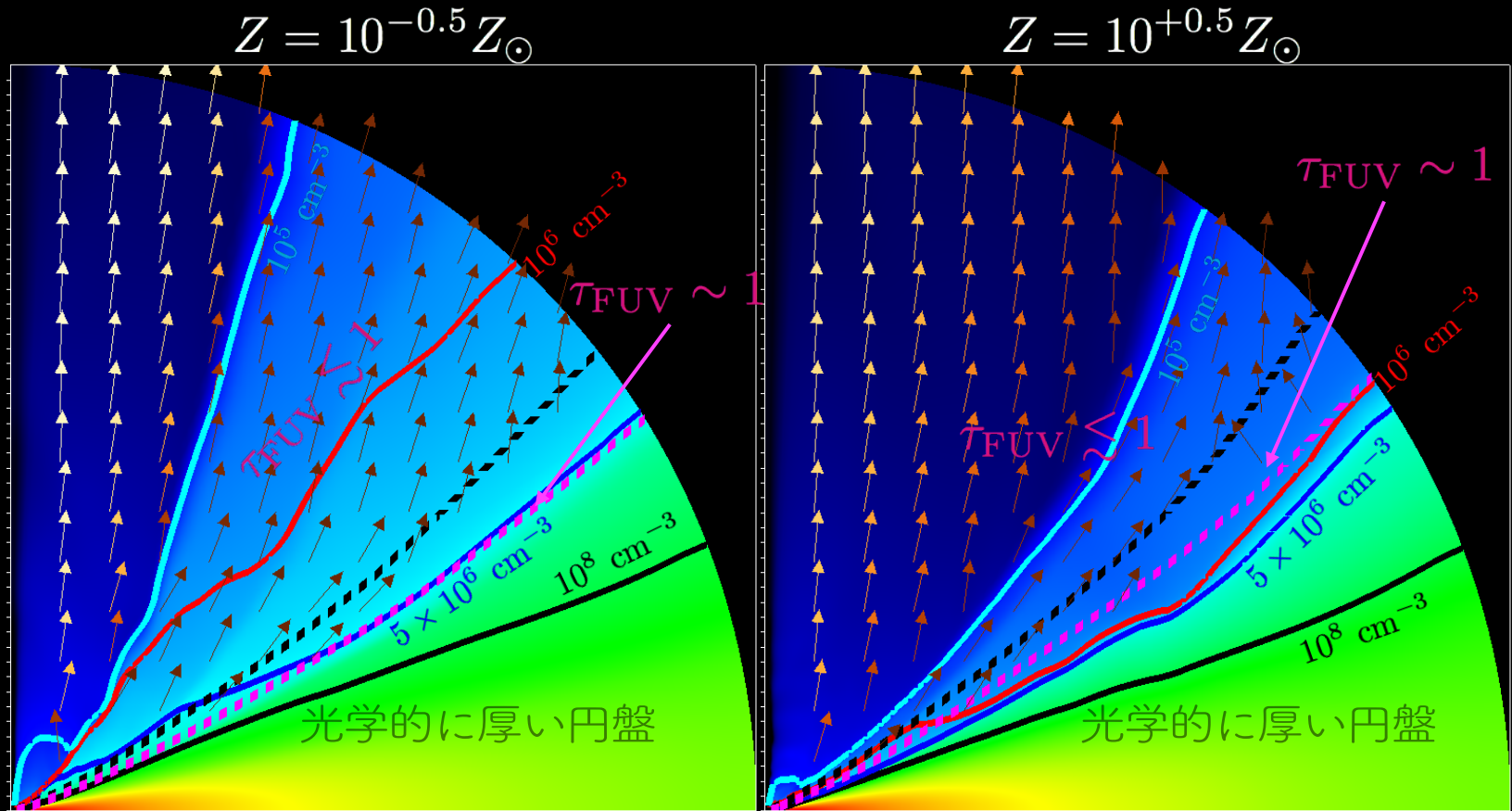


- 蒸発流は、 $A_V = 0.5 - 1$ から打ち上がっている。
- そこで支配的な冷却源は **ダスト冷却** (and/or **H₂ 冷却**)。
 - 典型的温度は、 $T = 10^2 - 10^3$ K.

いろいろな金属量円盤



1. 低金属量ほど中性流密度が低い理由



(FUV 光子が届く領域 = $\tau_{\text{FUV}} \sim 1$ の線よりも上側の領域)

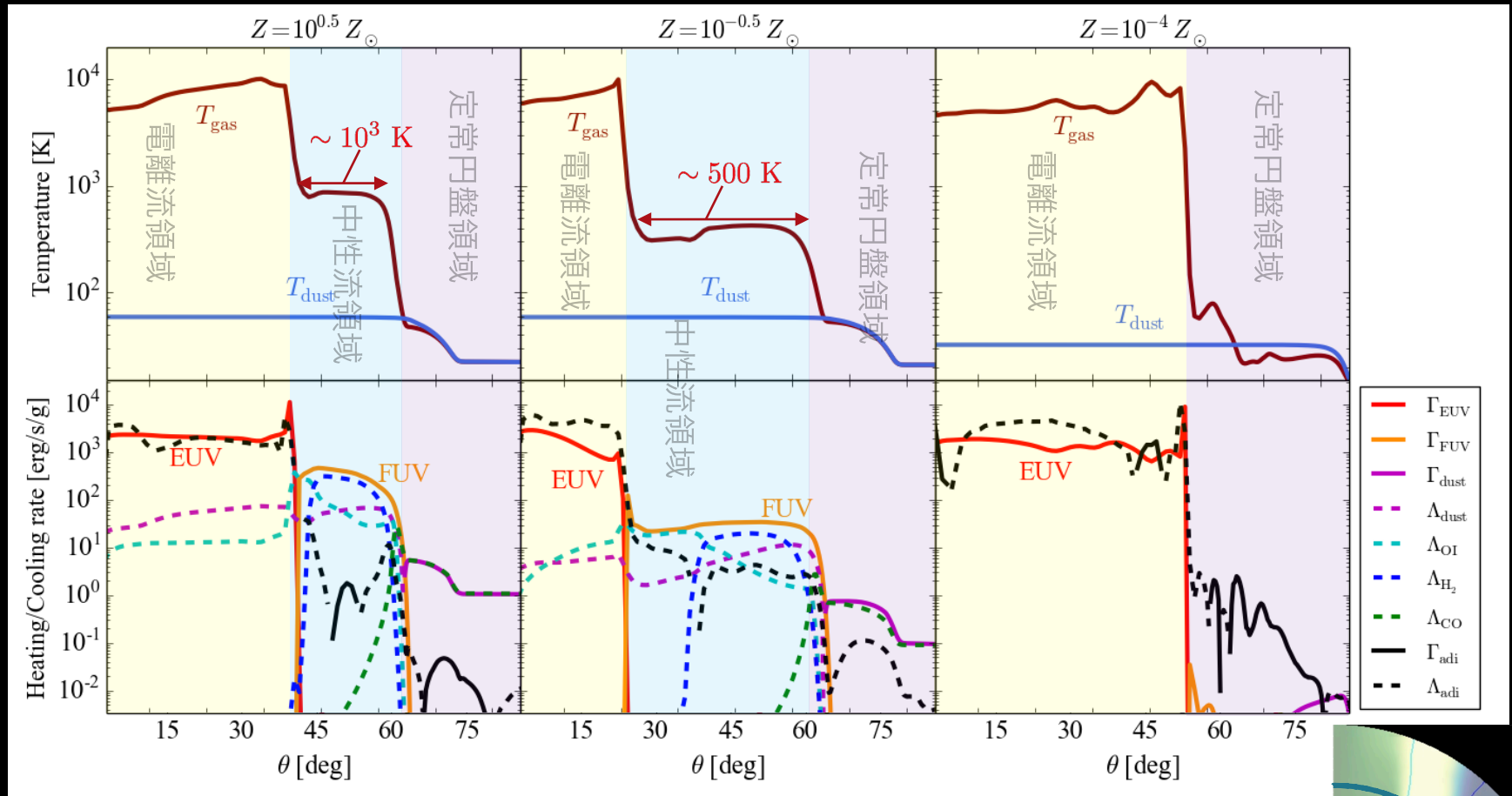
低 Z ほど少ダストなので、高密度領域にFUVが届く。



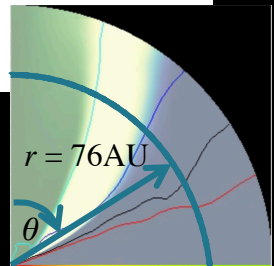
低金属量ほど高密度流になる： $n_{\text{H,base}} \propto Z^{-1}$

2. 極低金属量で中性流が駆動されない

中性流領域は、低 Z ほど低温になる。



「低温になる」というのは、加熱より冷却が効いていることを意味する。



2. 極低金属量で中性流が駆動されない

ベースで支配的な冷却源はダストだった。

ダストによる冷却率：

$$\propto n_d n_H k(T - T_{\text{dust}}) \propto k(T - T_{\text{dust}}) n_{\text{H, base}}^2 \frac{Z}{Z_{\odot}}$$

FUV加熱率：

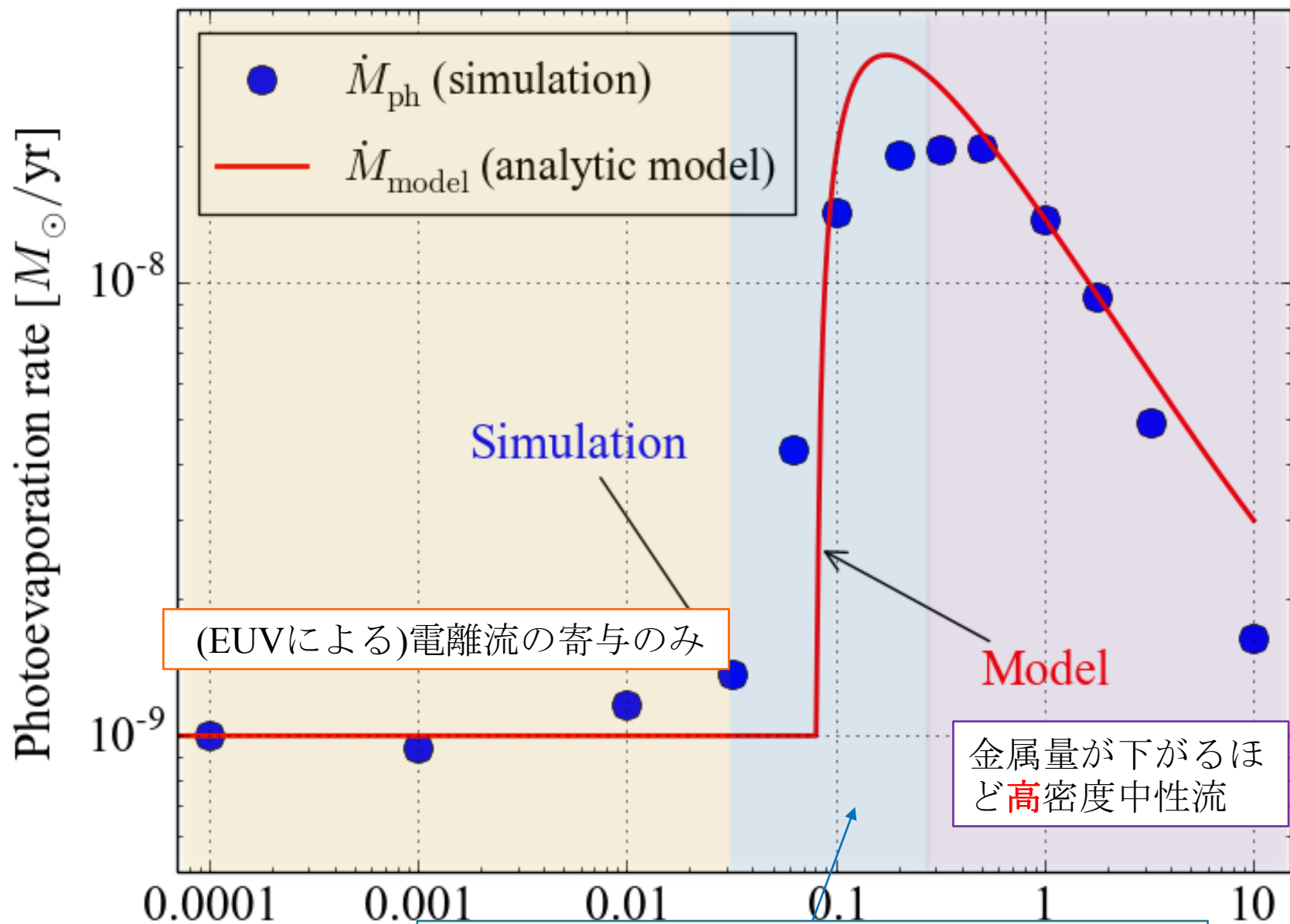
$$\propto L_{\text{FUV}} e^{-\tau_{\text{FUV}}} n_d \propto n_{\text{H, base}} \frac{Z}{Z_{\odot}}$$

ベース密度の上昇とともにFUV加熱がダスト冷却に対し相対的に弱くなる。

冷却に比べ、

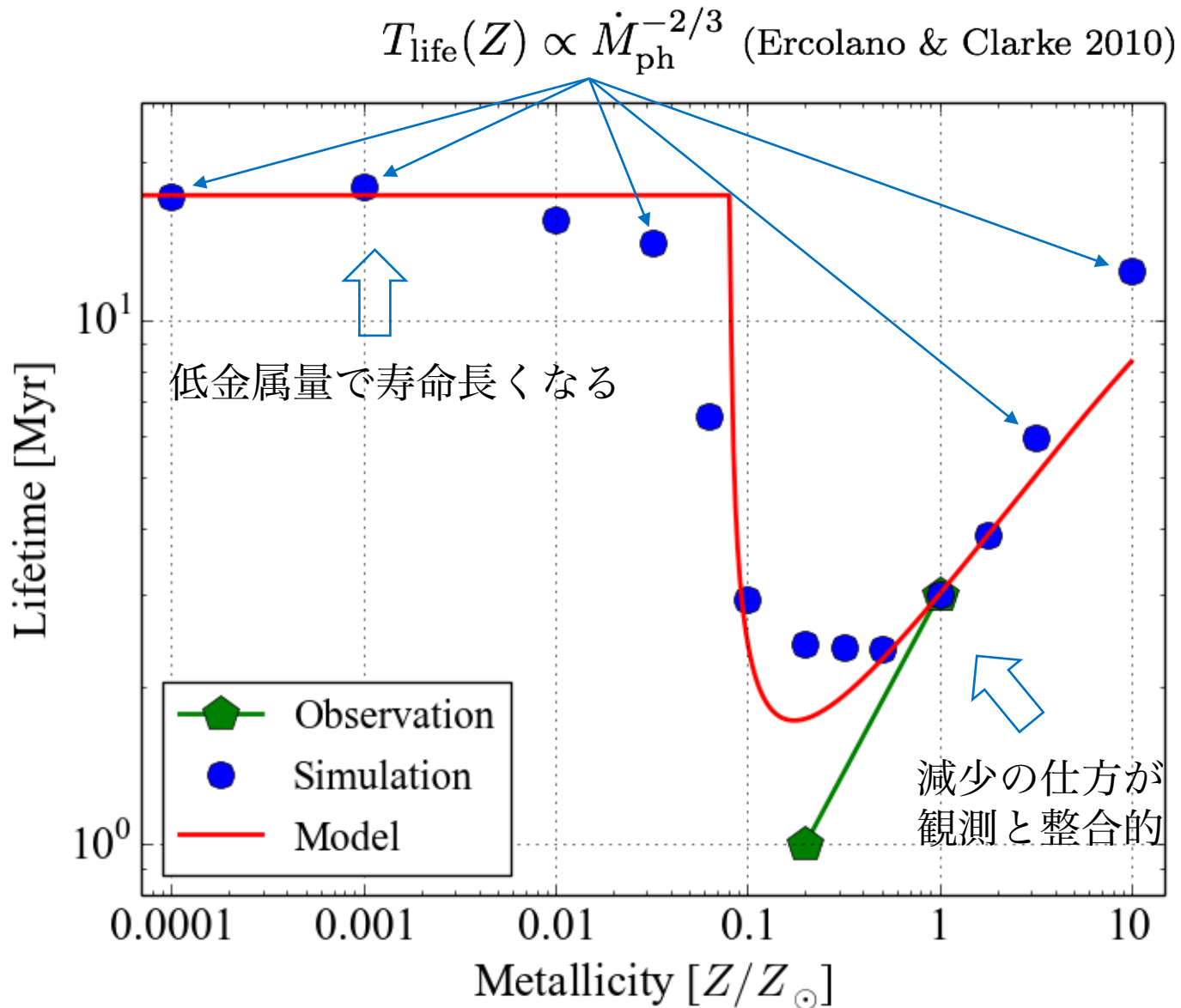
金属量が下がるほどFUV加熱は効かなくなる。

↓
結果、温度が下がり、中性蒸発流が駆動されなくなる。



FUV加熱が**冷却**に比べ効かなくなる。
 結果、中性流の蒸発が駆動されなくなる。

寿命の見積もり



● まとめ

1. 動機：観測的円盤寿命の金属量依存性
方法：非平衡化学反応を取り入れた輻射流体コードにより円盤光蒸発をシミュレーション
2. 結果：蒸発率は $Z \sim 10^{-0.5} Z_{\odot}$ でピークを持つ。これはFUV加熱の金属量依存性を反映している。
3. 結論：光蒸発は観測的寿命を整合的に説明し得る。我々のモデルは、極低金属量環境下 $Z \leq 10^{-2} Z_{\odot}$ で、円盤寿命が長くなることを予言する。

● 次ステップ

1. FUV/EUV/X-ray 光蒸発
2. Chemistryの詳細取扱
3. (ダストの詳細取扱)

