

# ガス散逸過程を考慮した 原始惑星系円盤の長期進化

---

國友 正信 (東京大学)

共同研究者：

鈴木建 (東大)， 犬塚修一郎 (名古屋大)，  
竹内拓， 井田茂 (東工大)， Olja Panić (リーズ大学)，  
木村茂生 (ペンシルバニア大)， 高橋実道 (工学院大)

ALMA ワークショップ：円盤から太陽系へ

2018年11月21日

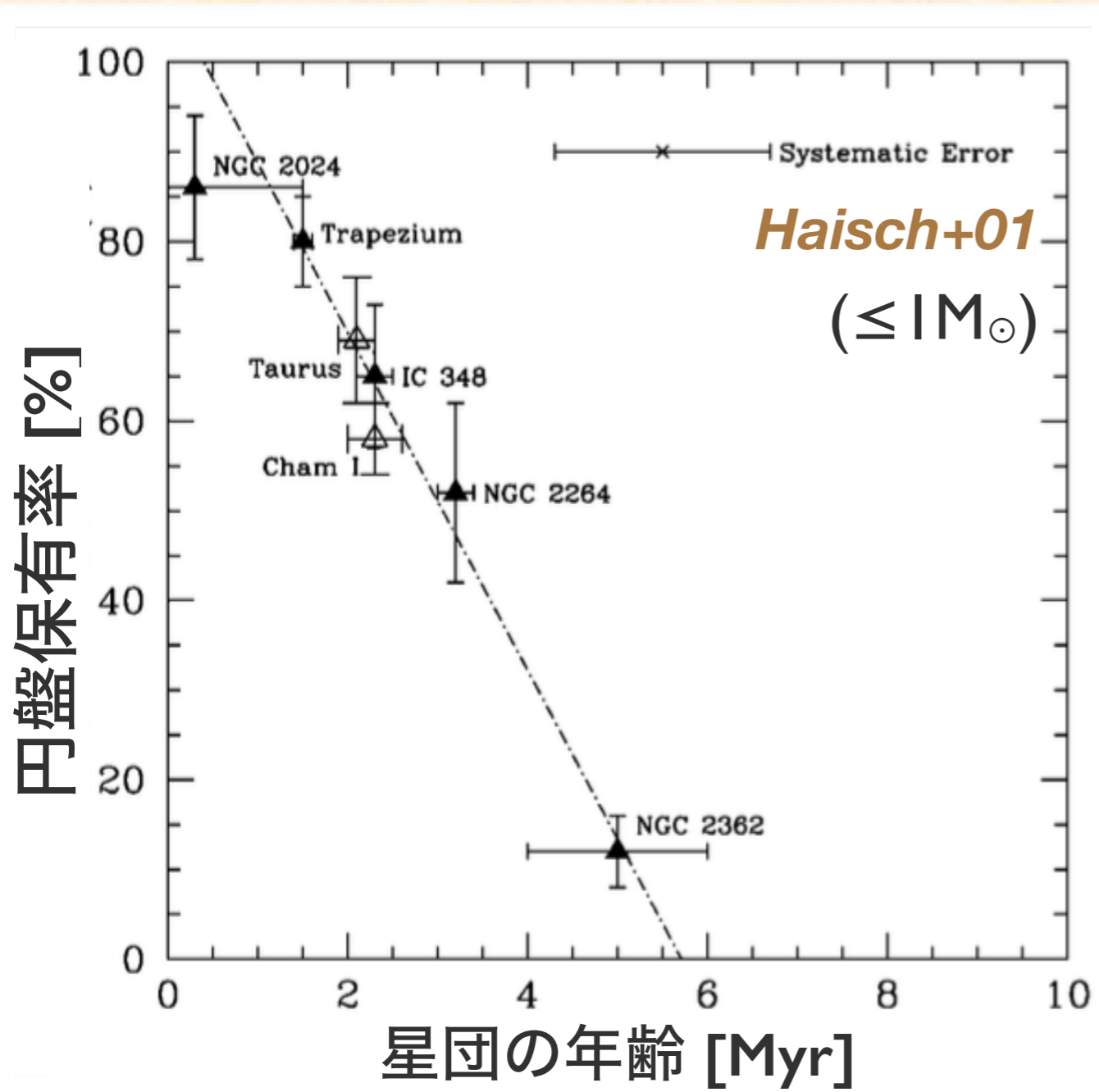
# 内容

- 円盤ガス散逸に関する観測のまとめ
- これまでの標準的な理論モデル：光蒸発＋粘性降着
  - 中心星質量への依存性
- 磁気駆動円盤風・光蒸発の競合

# 円盤散逸に関する観測

# 円盤寿命の観測

(近赤外の超過から)



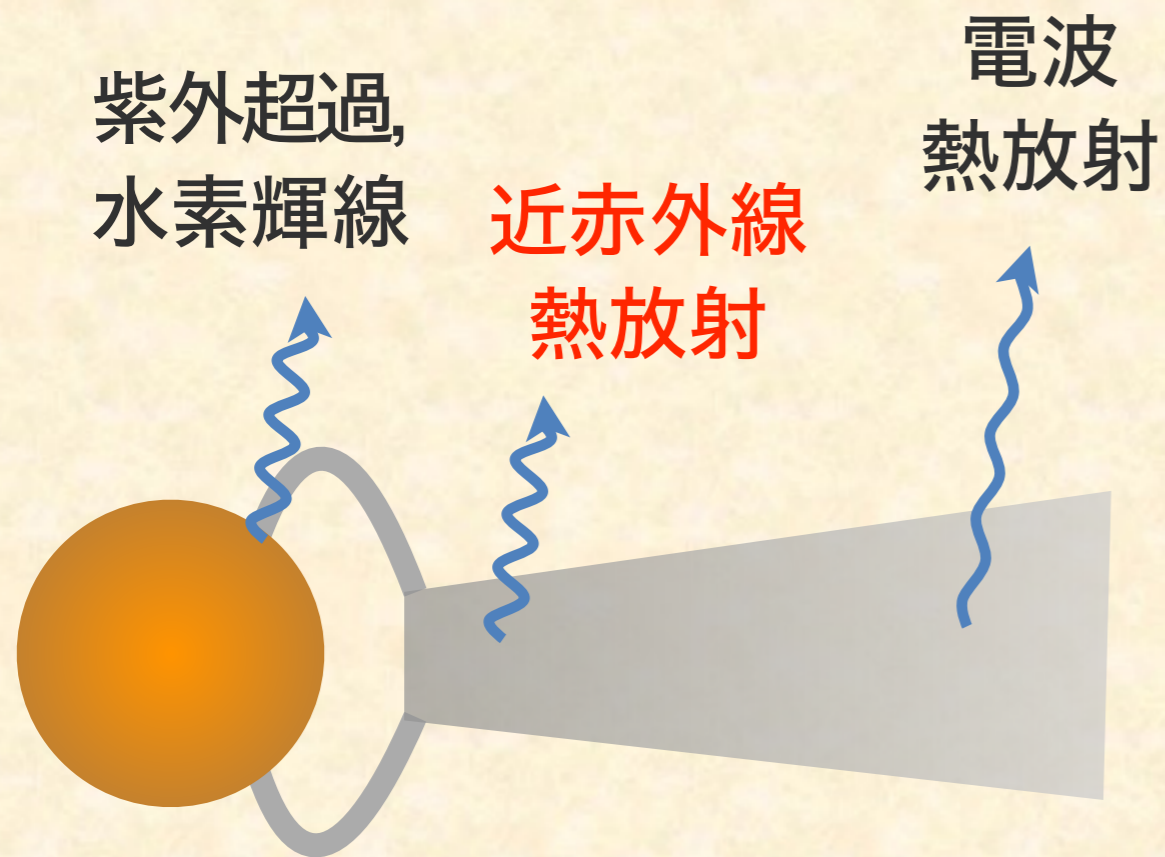
- 円盤保有率が星団年齢とともに減少

→ ほとんどの星は **~3–5 Myr** で **円盤を失う**

※近赤外 → ~1000K のダスト熱放射

see also Hernandez+07, Mamajek09,  
Fedele+10, Kraus+12, Ribas+14

# 円盤寿命の観測



- 円盤保有率が星団年齢とともに減少

→ ほとんどの星は **~3–5 Myr** で **円盤を失う**

※近赤外 → ~1000K のダスト熱放射

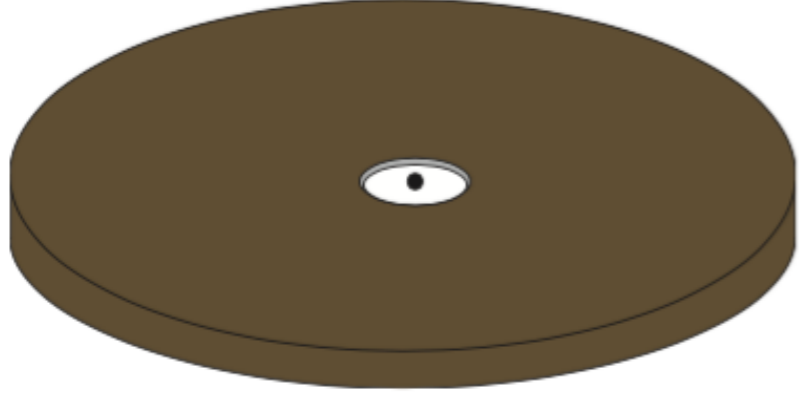
- 中心星へのガス降着, 外側円盤の冷たいダスト (電波観測) もほぼ同時期になくなる

数千回転した後,  
内側から外側まで速やかに散逸

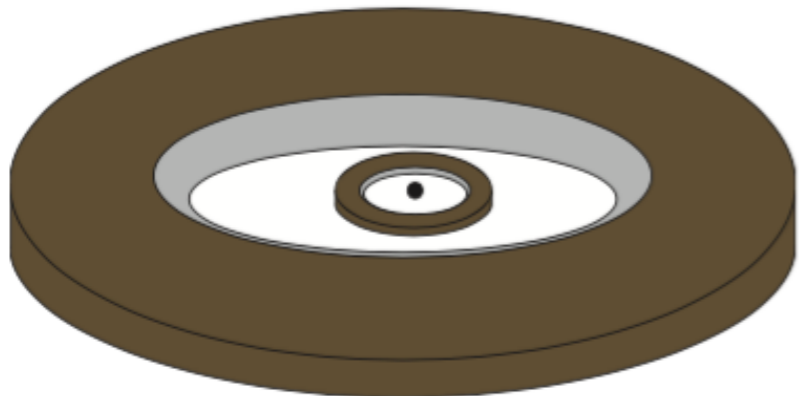
降着 : *Muzerolle+00, Fedele+10, Ingleby+14*  
電波 : *Mathews+12, Andrews+Williams05, 07*

# 短い遷移円盤期

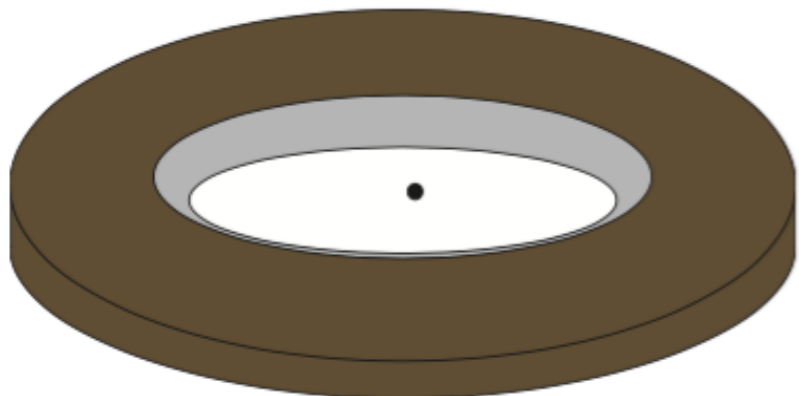
*Espaillet+14, PPVI*



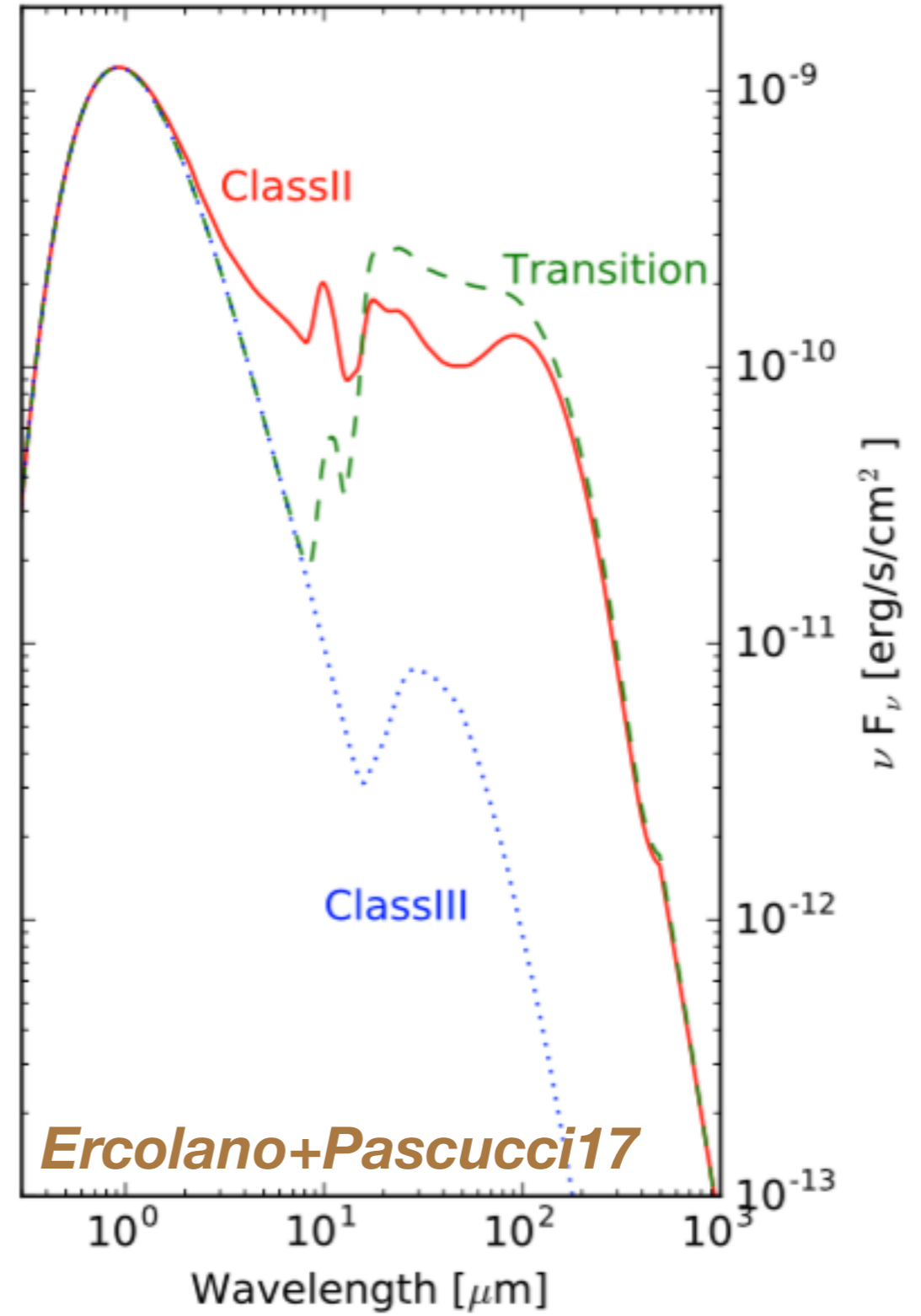
Full Disk



Pre-Transitional Disk



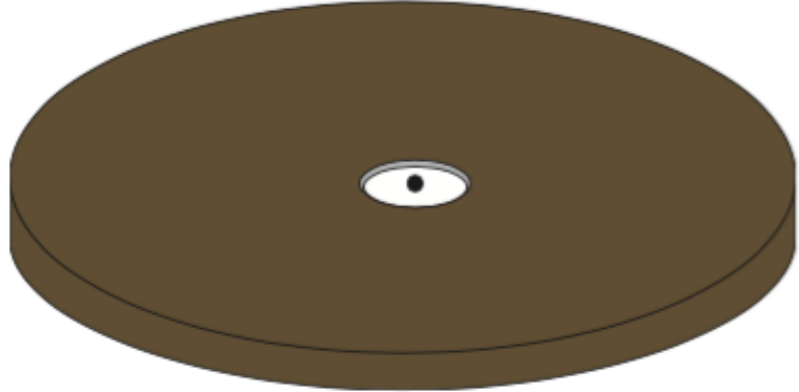
Transitional Disk



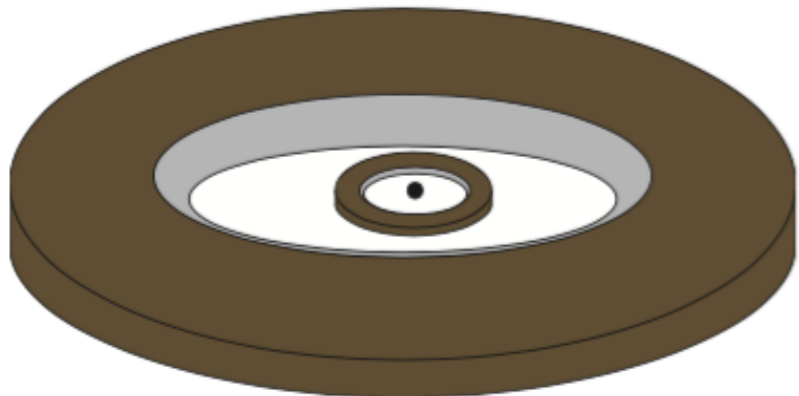
*Ercolano+Pascucci17*

# 短い遷移円盤期

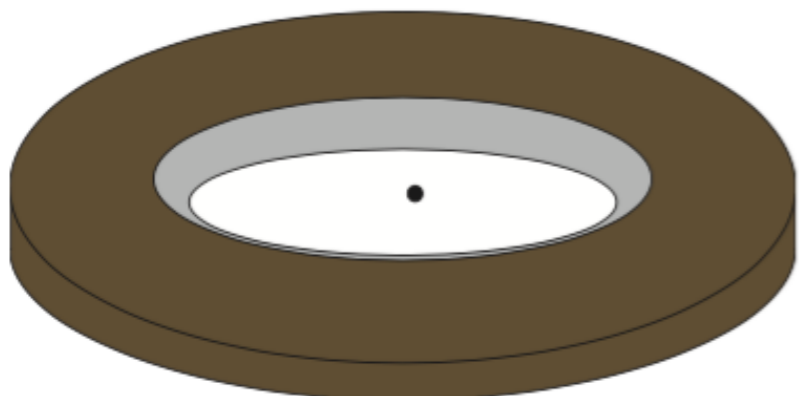
*Espaillet+14, PPVI*



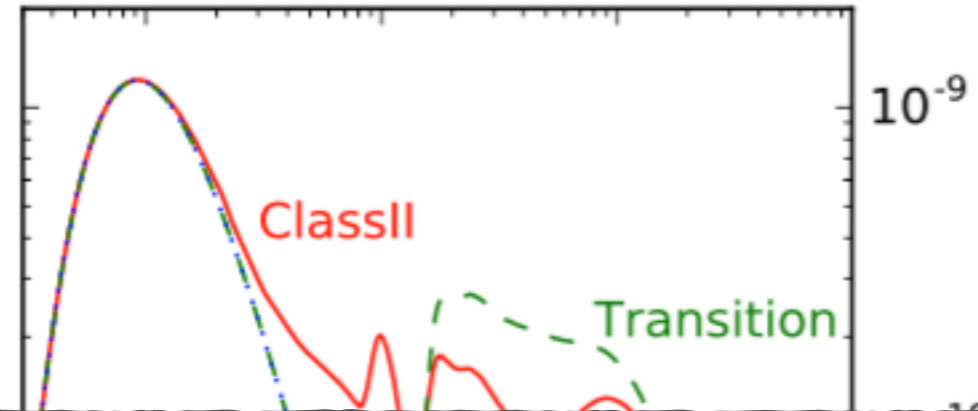
Full Disk



Pre-Transitional Disk



Transitional Disk



- 遷移円盤が検出されている  
→ **inside-out的な散逸**
- 遷移円盤の個数は**~10%**程度  
→ **散逸期は非常に短い (~0.1 Myr)**

*Ercolano+Pascucci17*

*Espaillet+14, PPVI, Skrutskie+90,  
Muzerolle+10, Koepferl+13*

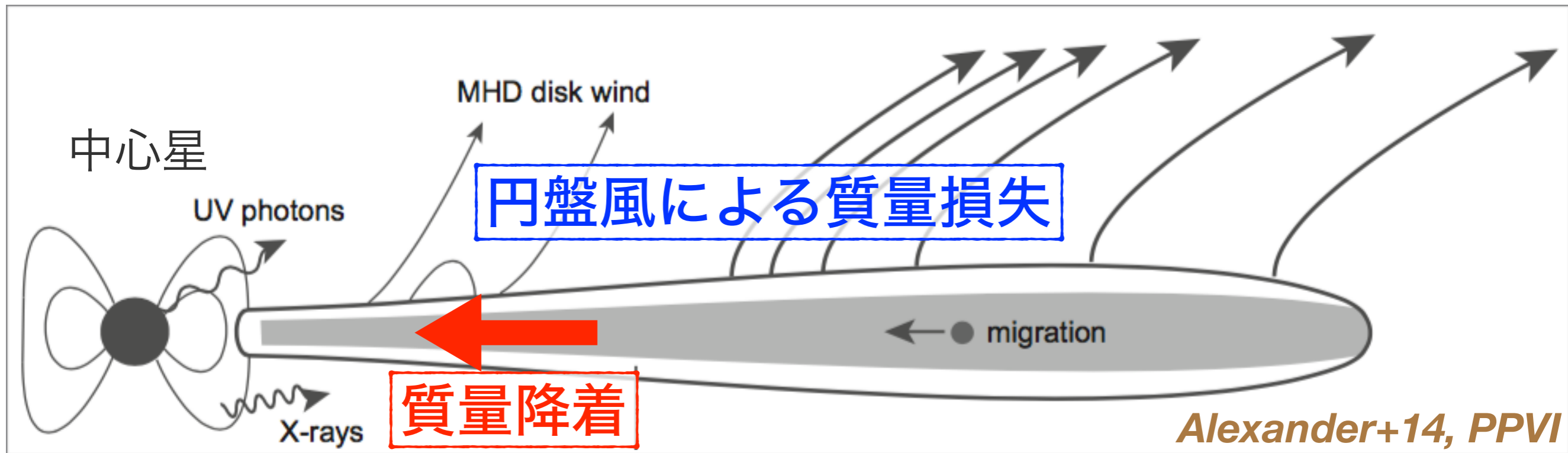
円盤散逸機構に対する観測からの要請

原始惑星系円盤には、  
two-timescale 的, inside-out 的な  
散逸機構が存在するはず



# 円盤進化機構

# 円盤進化過程



## 中心星への降着

- 乱流粘性
- 磁気制動
- 重力不安定

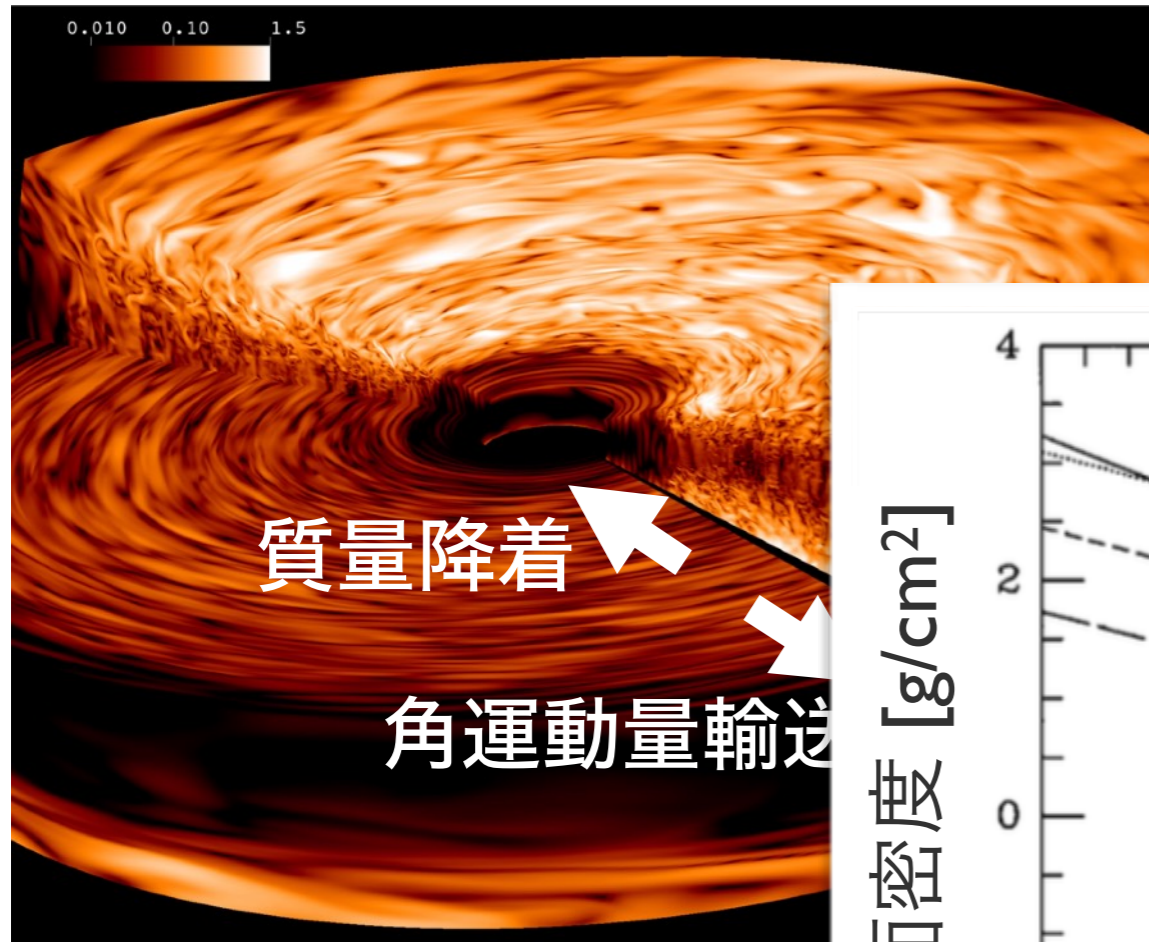
## 円盤風

- 熱的円盤風 (光蒸発)
- 磁気駆動円盤風

# 粘性降着

磁気乱流 → 乱流粘性による角運動量輸送

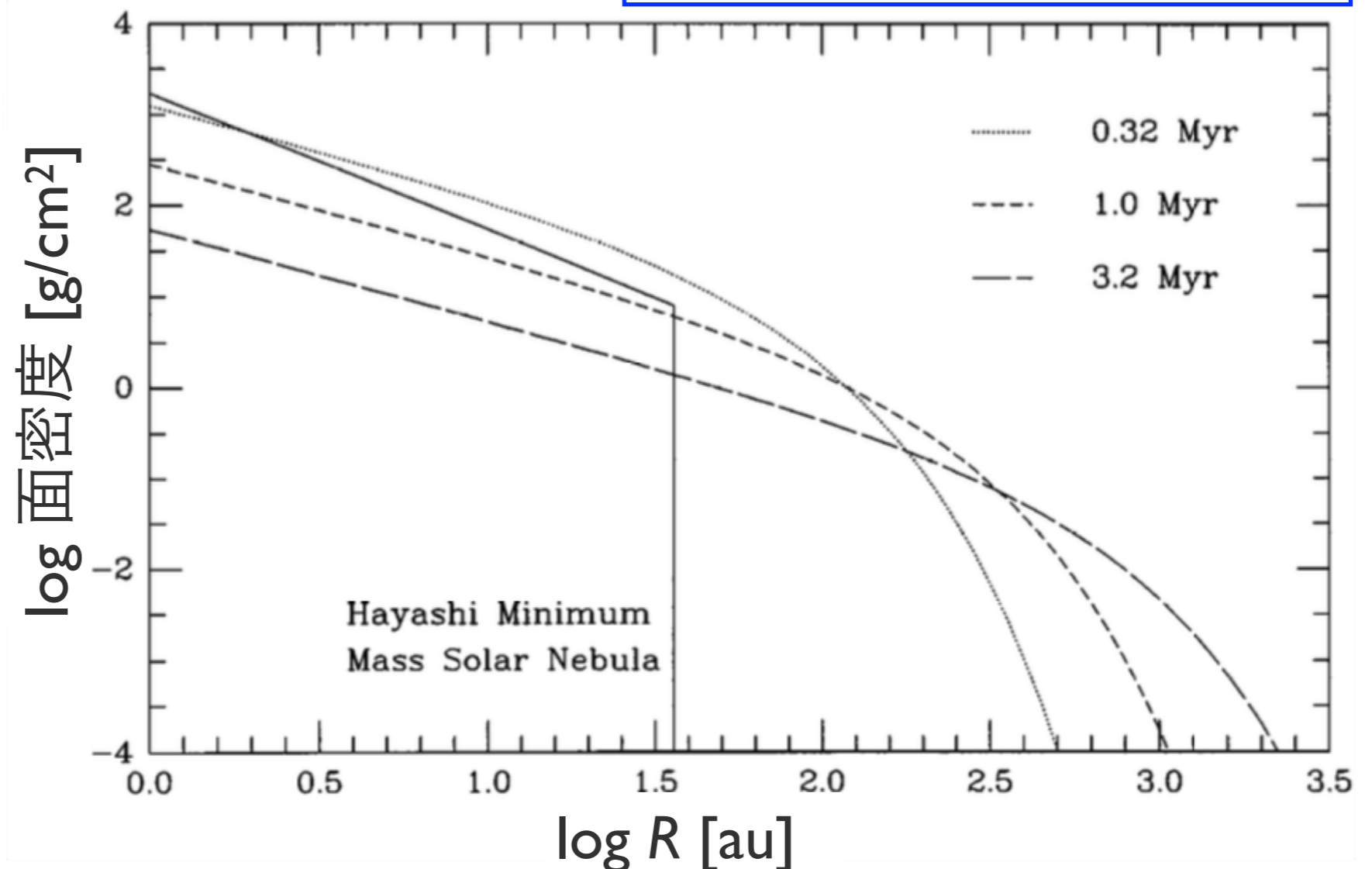
e.g., 磁気回転不安定性 *Balbus+Hawley91*



$$t_\nu \sim \frac{R^2}{\nu} = \frac{1}{\alpha \Omega_K} \left( \frac{H}{R} \right)^{-2}$$

~1 Myr for  $R=100\text{AU}$ ,  
 $\alpha=0.01$ ,  $H/R=0.1$

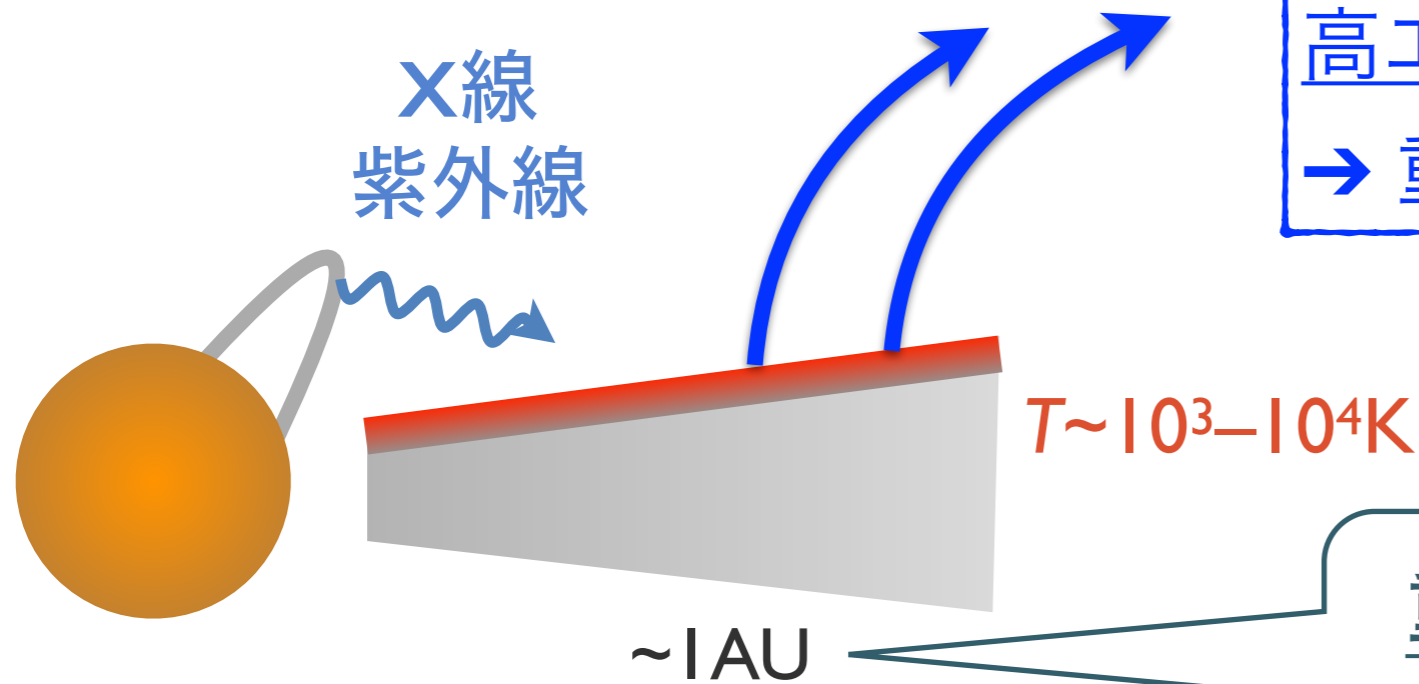
拡散現象なので速やかな散逸にはならない



*Shakura+Sunyaev73*

*Lynden-Bell+Pringle74*

# 光蒸発



光蒸発：

高エネルギー光子が円盤表層を加熱  
→ 重力を振り切って系外に流出

## 高エネルギー光子

- FUV (遠紫外線; 6–13.6eV)
- EUV (極端紫外線; 13.6–100eV)
- X線 (0.1–10keV)

重力半径  $R_g$

*Shu+93*

⇔ 熱エネルギー = 重力ポテンシャル

$$\rightarrow R_g \equiv \frac{GM_\star}{c_s^2} \sim 8 \text{au (for } 1M_\odot, 10^4 \text{K)}$$

臨界半径  $R_c$  *Liffman03, Font+04*

圧力勾配による寄与などを考慮  
すると  $R_c = 0.2R_g$

**$R > R_c$  でガスは流出可能**

# 光蒸発率のまとめ

光蒸発率  $\dot{\Sigma} = \text{密度} \times \text{速度(音速)}$

**EUV** :  $\sim 10^4\text{K}$  のほぼ等温の電離層 (cf. HII領域)  $\rightarrow R_c \sim 1\text{AU}$

- 水素の電離  $\rightarrow$  電子が周囲を加熱. 放射冷却の強い温度依存性  $\rightarrow \sim 10^4\text{K}$
- 吸収断面積大, しかし再結合による再放射あり (拡散光)

**X** : EUVに比べ**低温**だが吸収断面積が小さく**密度大**  $\rightarrow \dot{M}$ 大

- 加熱源 : O, C, Feなどの重元素からの光電子 ( $\sim 0.3\text{--}1\text{keV}$ が寄与)

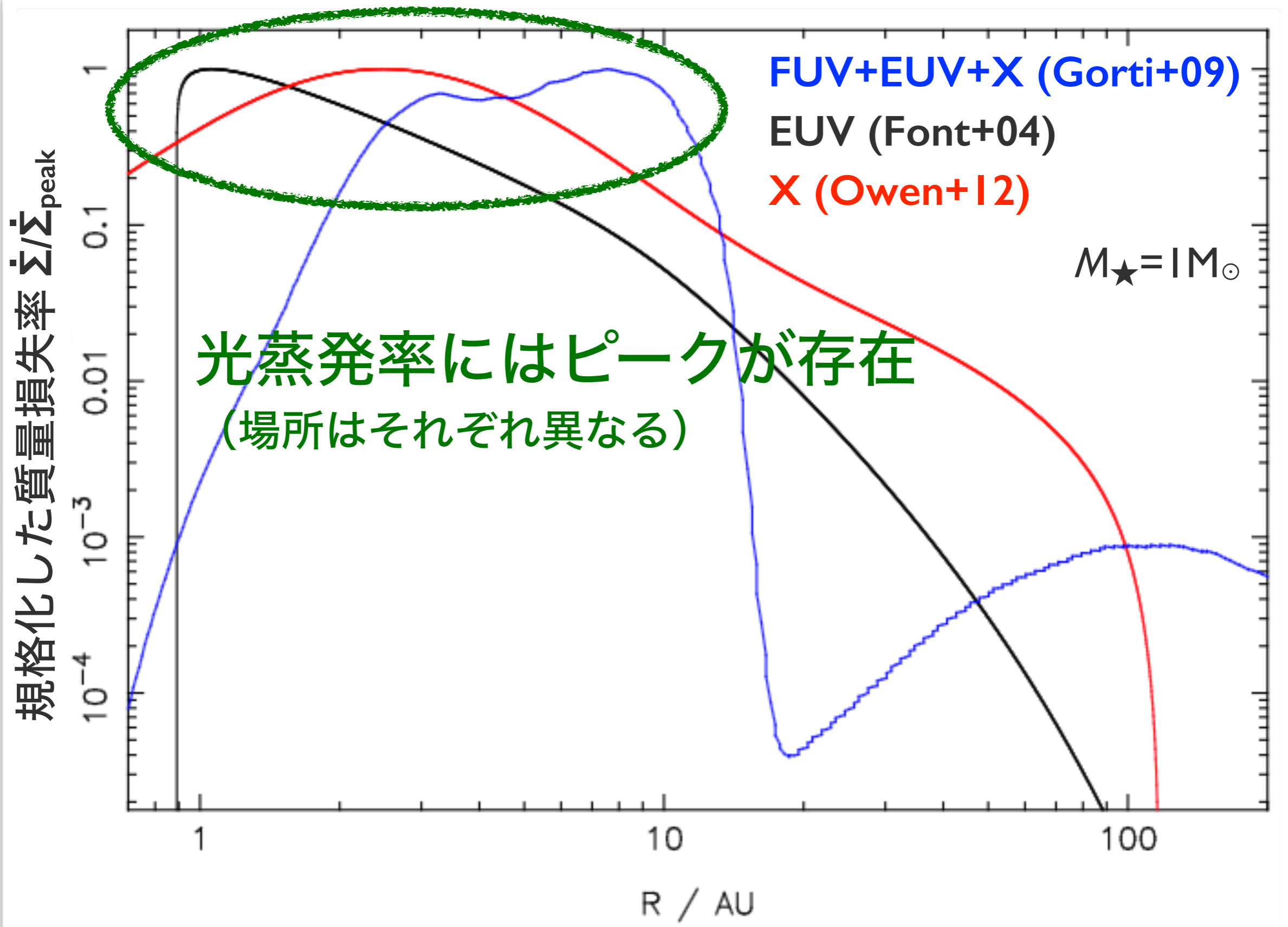
**FUV** : X線と同様に**低温**だが**密度大**で  $\dot{M}$ 大

- 加熱源 : ダスト・PAHsからの光電子,  $\text{H}_2$ 分子の励起・脱励起

$$\dot{M}_X \sim \dot{M}_{\text{FUV}} \sim 10^{-8} M_{\odot} / \text{yr} \\ \sim 100 \dot{M}_{\text{EUV}}$$

see Owen+10,  
Gotri+09,  
Alexander+06

# 光蒸発による質量損失率のプロファイル



# 計算手法

- 1次元の拡散方程式

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sqrt{r} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma \sqrt{r}) \right) - \dot{\Sigma}_{\text{PE}}$$

粘性降着

光蒸発

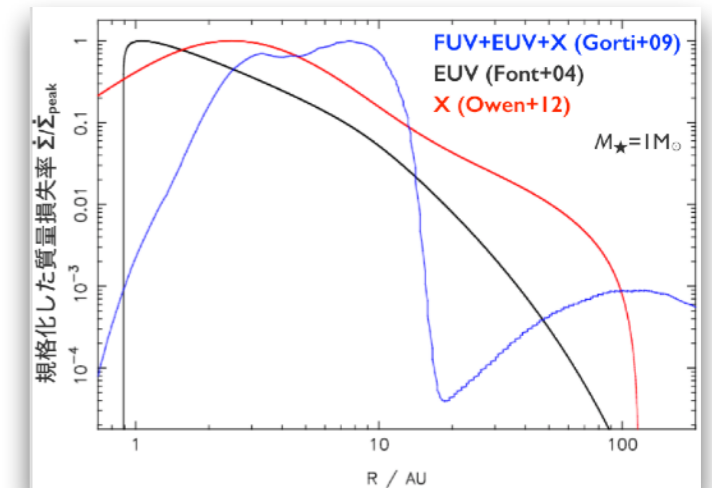
$\Sigma$  : ガス面密度

$\nu$  : 粘性 ( $=\alpha c_s h$ )

*Shakura+Sunyaev73*

X線 : Owen+10

EUV : Font+04



- パラメータ

- $\alpha = 10^{-3}$

- X線光度 :  $\sim 10^{-30}$  erg/s

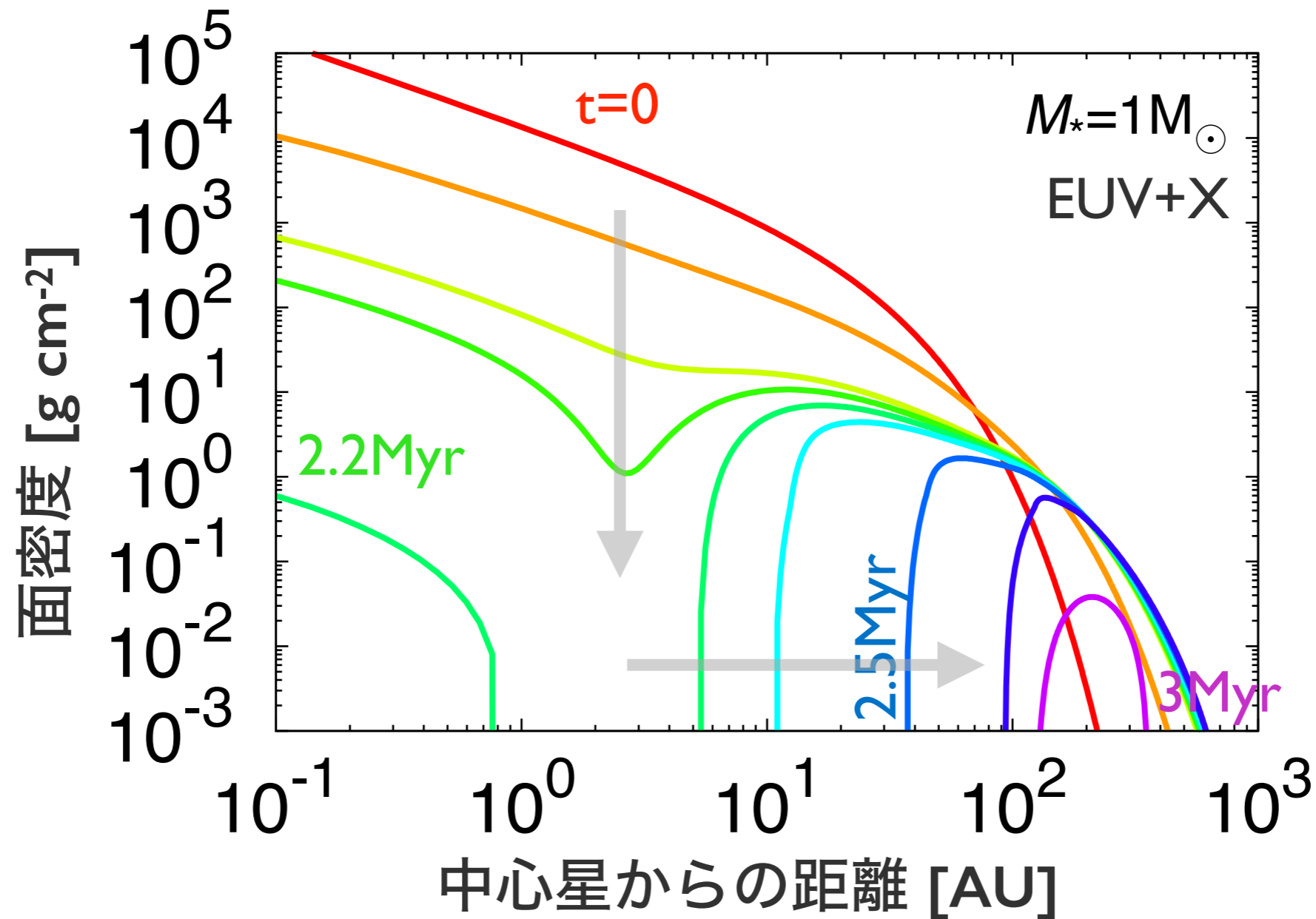
- EUV光度 :  $10^{-41}$  photons/s

- 中心星質量 :  $1 M_{\odot}$

- 温度分布 : 輻射平衡温度

- 初期円盤質量  $0.2 M_{\odot}$

# 粘性降着 + 光蒸発の円盤進化の例

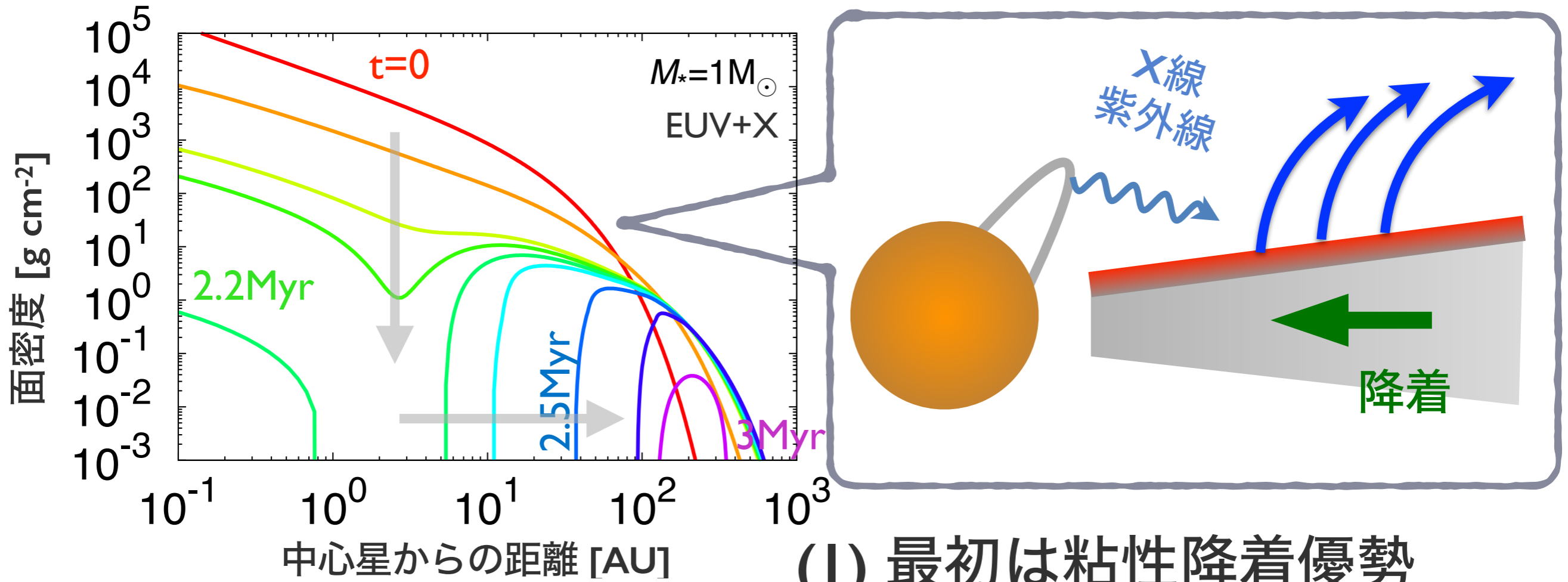


Clarke+01

「 $\sim$ Myrの後にinside-out的な速やかな散逸」  
→ 観測と整合的



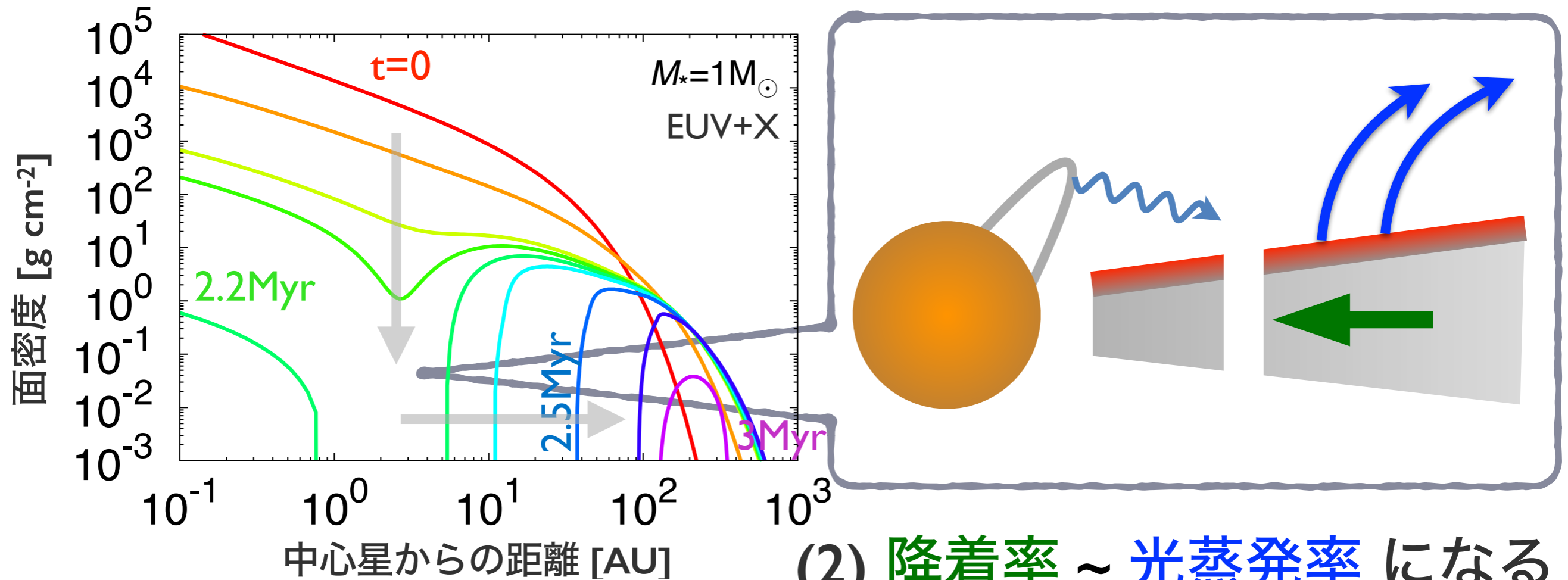
# 粘性降着 + 光蒸発の円盤進化の例



(I) 最初は粘性降着優勢

降着率 > 光蒸発率

# 粘性降着 + 光蒸発の円盤進化の例

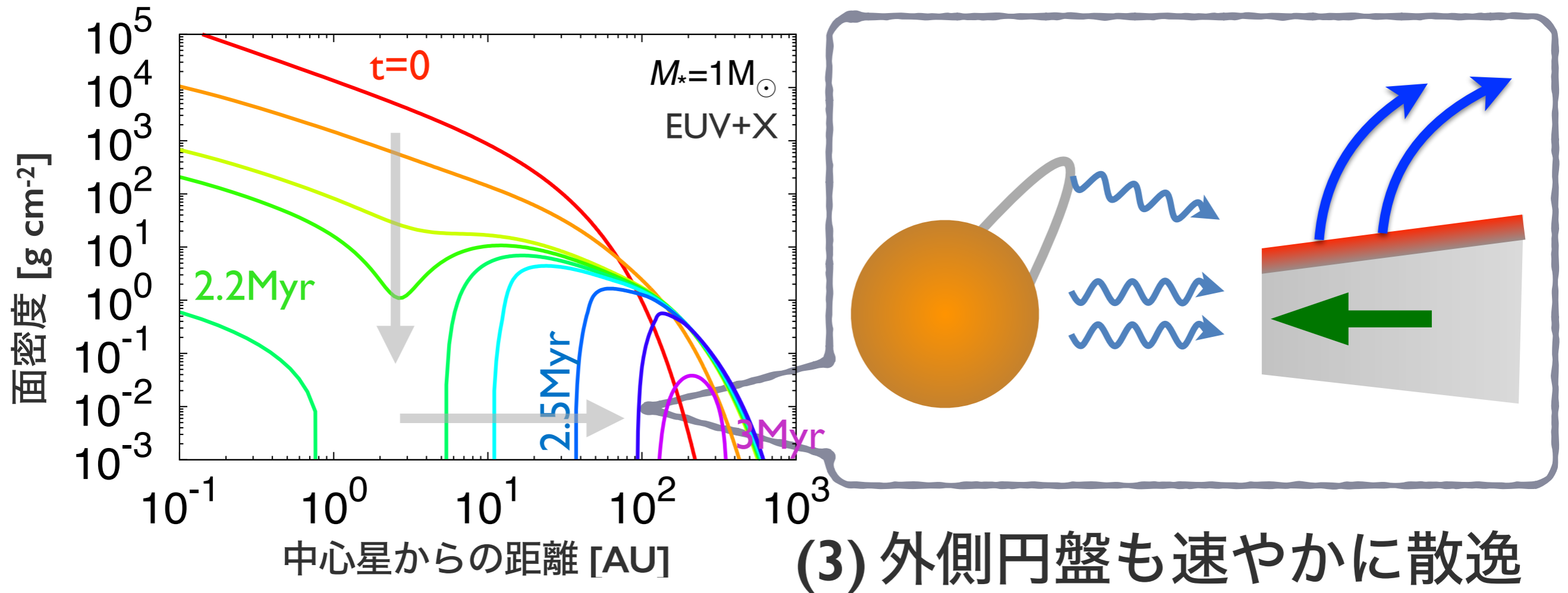


(2) 降着率 ~ 光蒸発率 になるとギャップが空く

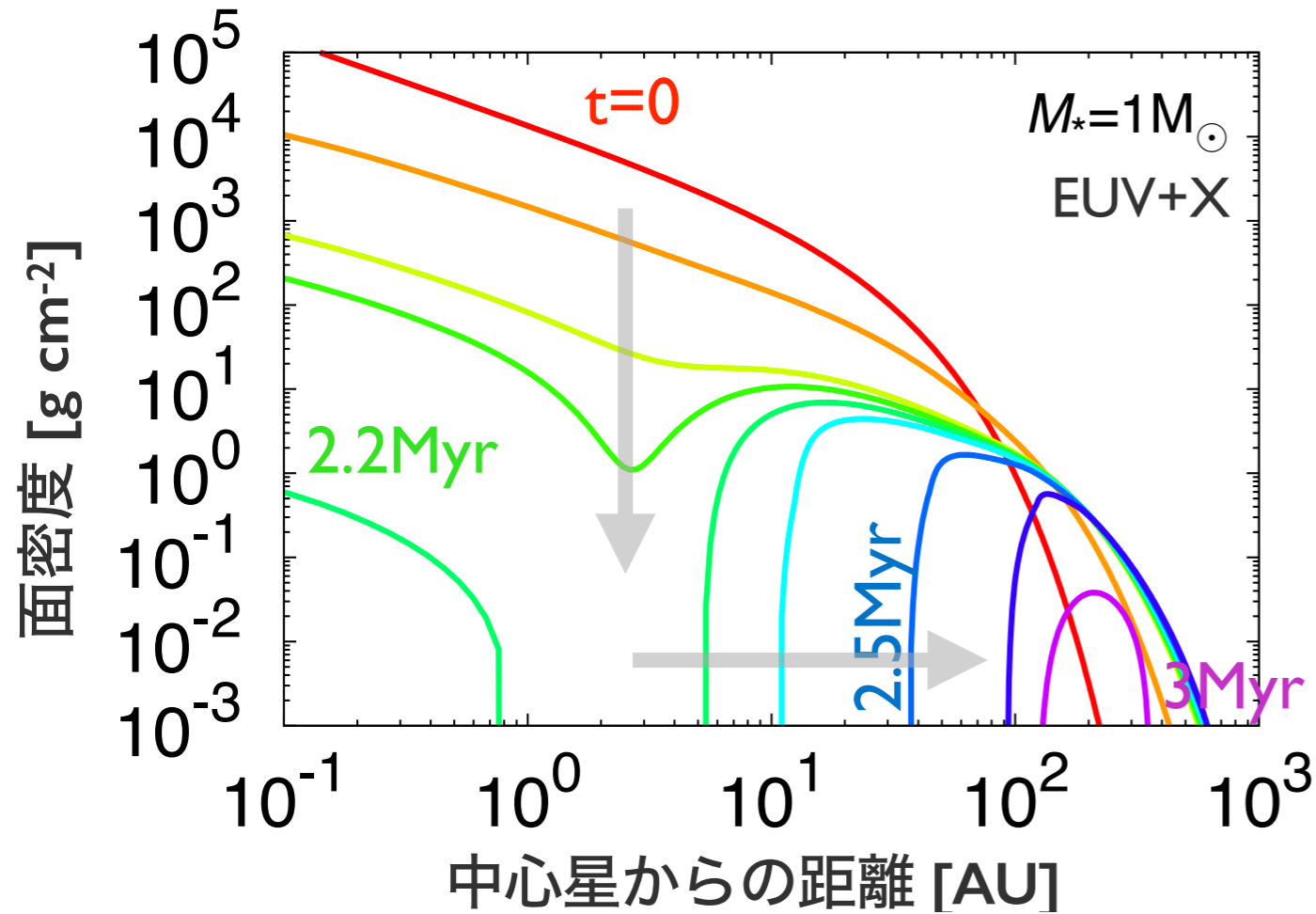
内側円盤は速やかに降着

$t_v \sim 1000 \text{ yr at } 1 \text{ AU}$

# 粘性降着 + 光蒸発の円盤進化の例



# 粘性降着 + 光蒸発の円盤進化の例

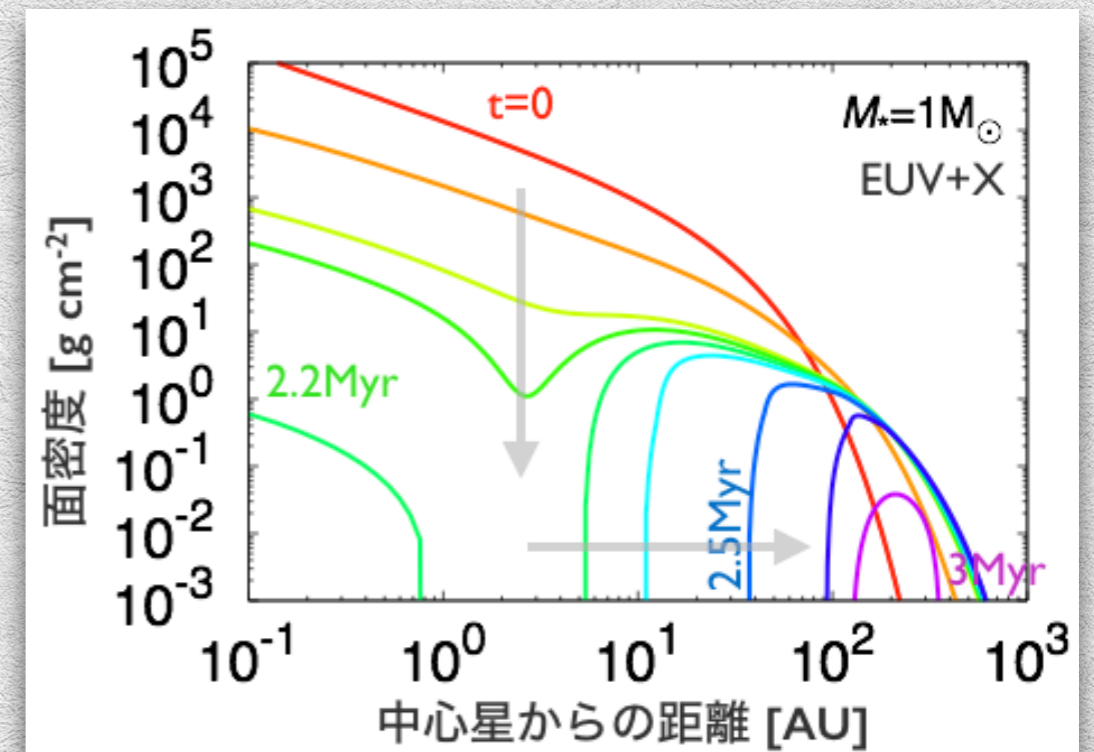
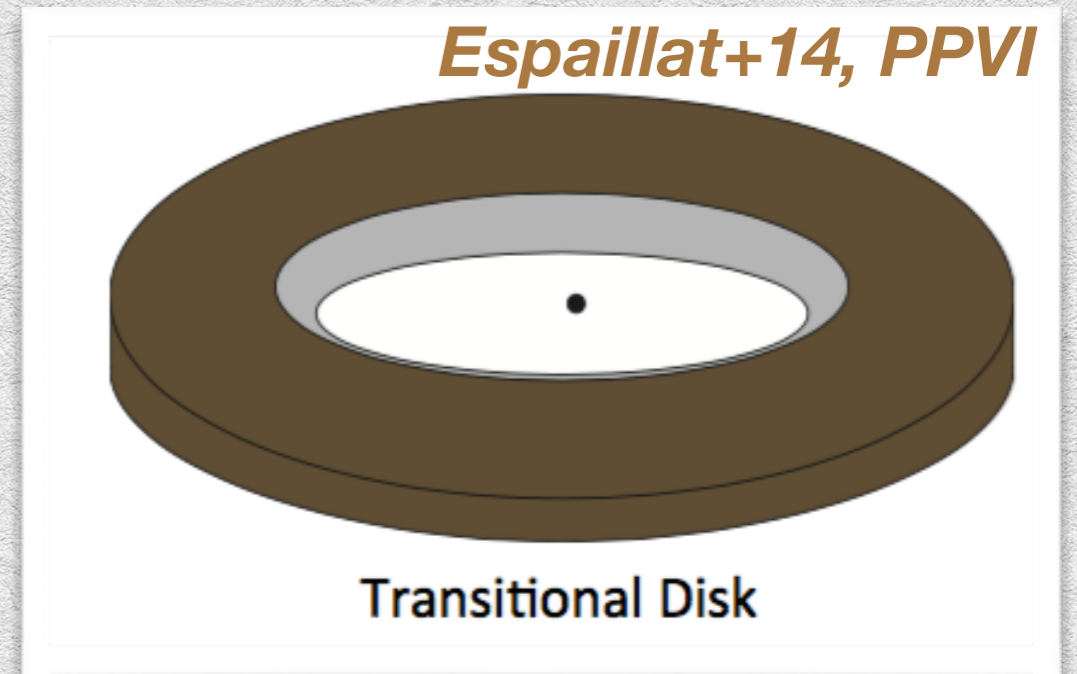
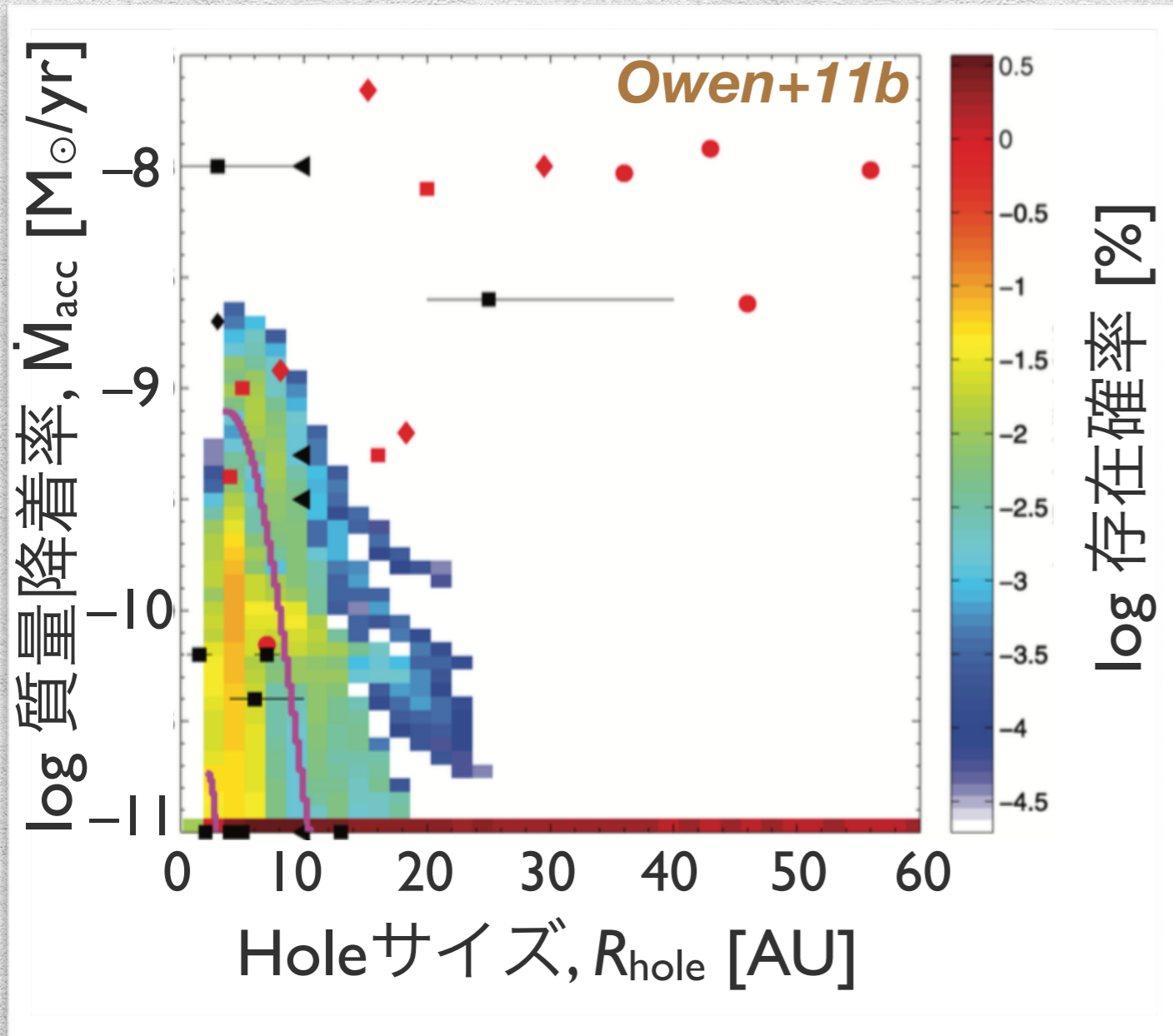


デブリ円盤ガスとのつながり：

ギャップが空いたあとは内側円盤も外側円盤も速やかに散逸

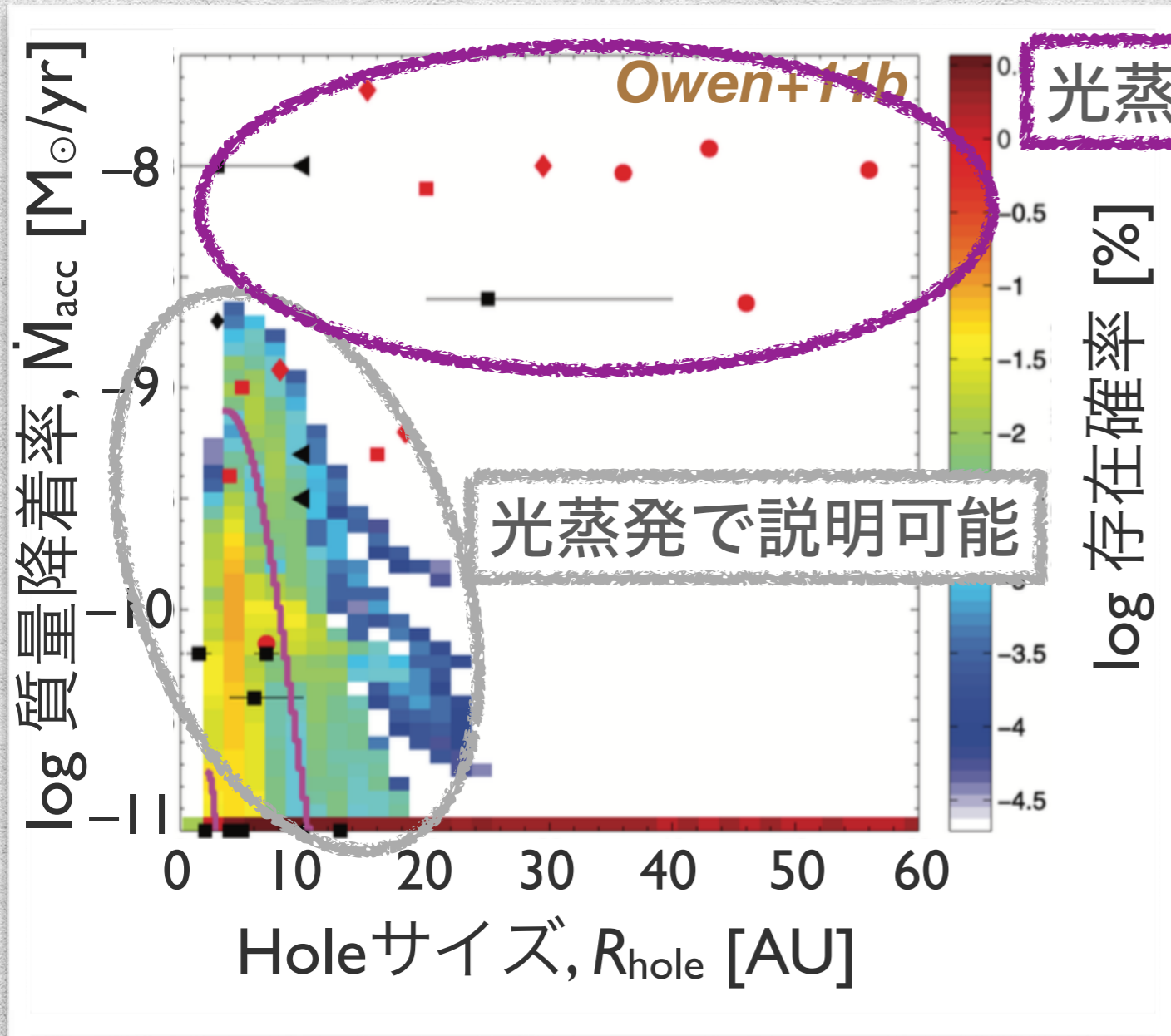
→ ガスの残存は期待しづらい

# 議論：遷移円盤との比較

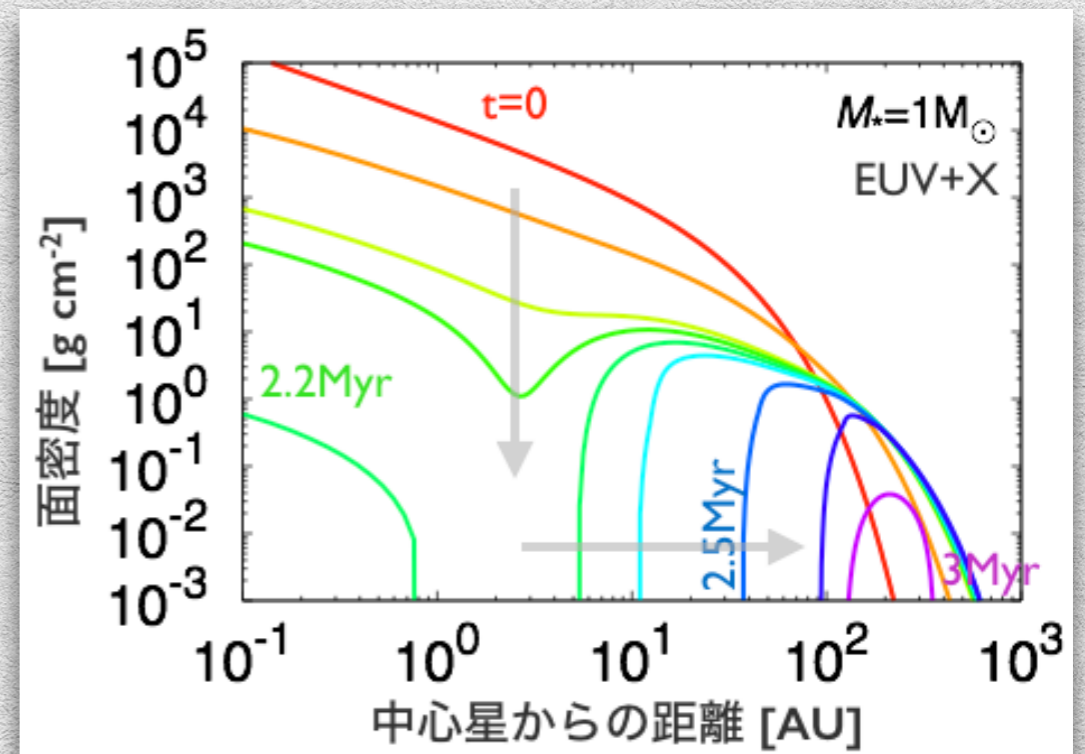


- 点：観測
- 色：滞在時間→検出確率（理論モデル）
- 線： $R_{\text{hole}}-\dot{M}$ 図上での“進化トラック”

# 議論：遷移円盤との比較

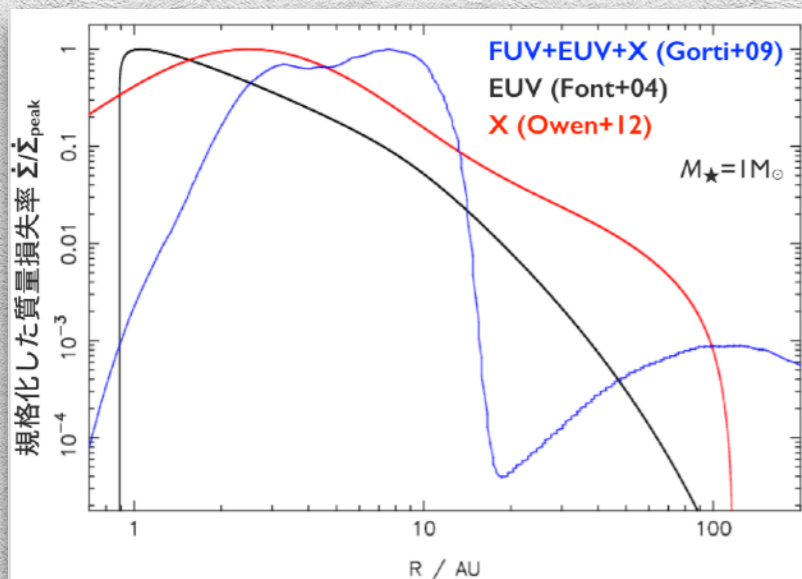


- 点：観測
- 色：滞在時間→検出確率（理論モデル）
- 線： $R_{hole}-\dot{M}$ 図上での“進化トラック”





# 最近の進展：自己無撞着なシミュレーション



これまでの光蒸発率：

簡略化した温度推定，流体の運動を解いていない  
などの問題点

see Owen+10,  
Gorti+09, Font+04  
Alexander+06



Nakatani et al. (2018a,b), Wang et al. (2018a, b) で熱化学・輻射輸送・ダイナミクスを自己無撞着にシミュレーション

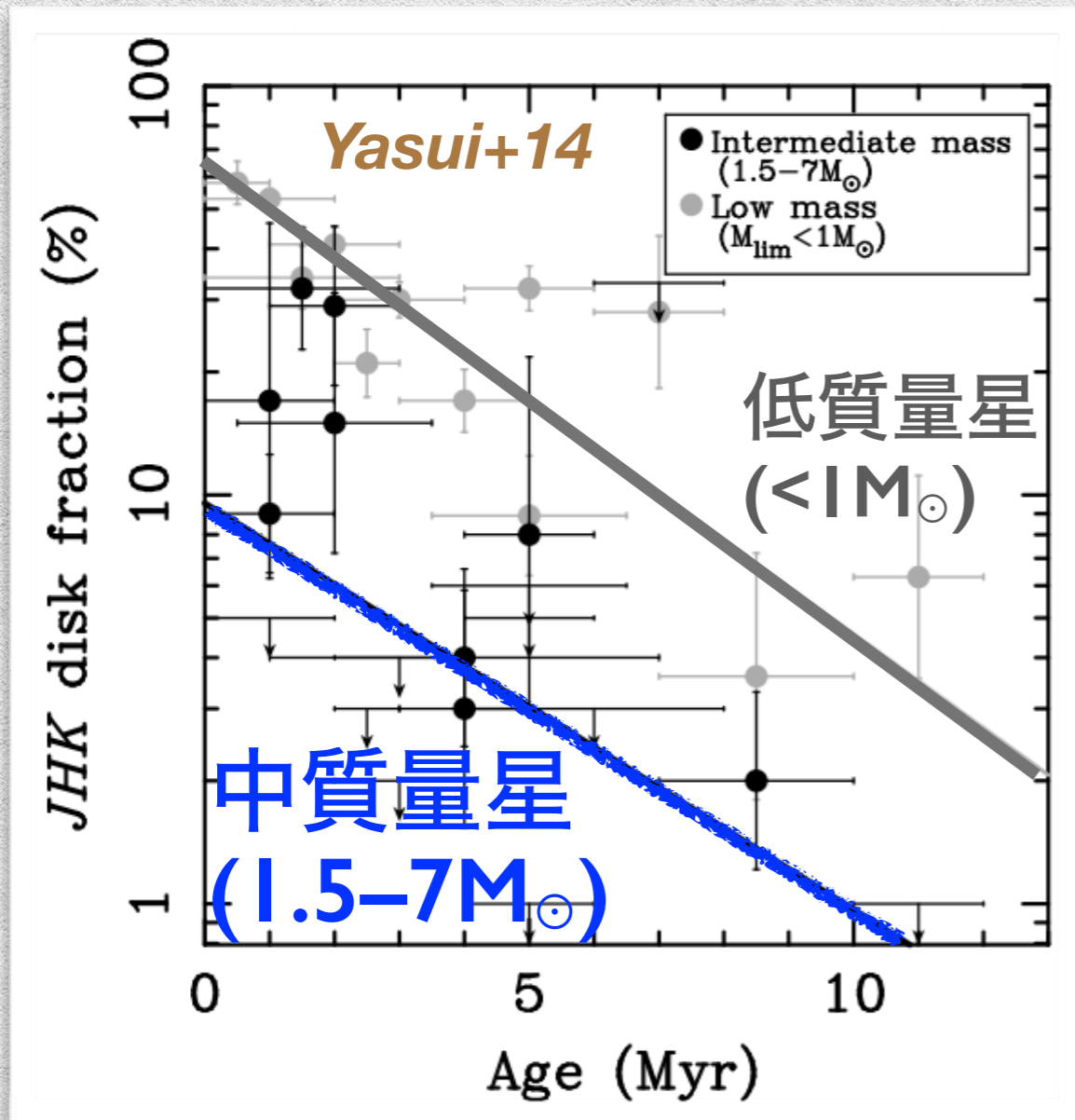
- FUV, EUVが主要な駆動源
- 光蒸発率は  $\sim 10^{-9} - 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$
- 質量損失プロファイルはおおよそ  $\dot{\Sigma} \propto R^{-2}$

# 中心星質量への依存性

*Kunitomo+, in prep.*



# 円盤寿命の観測

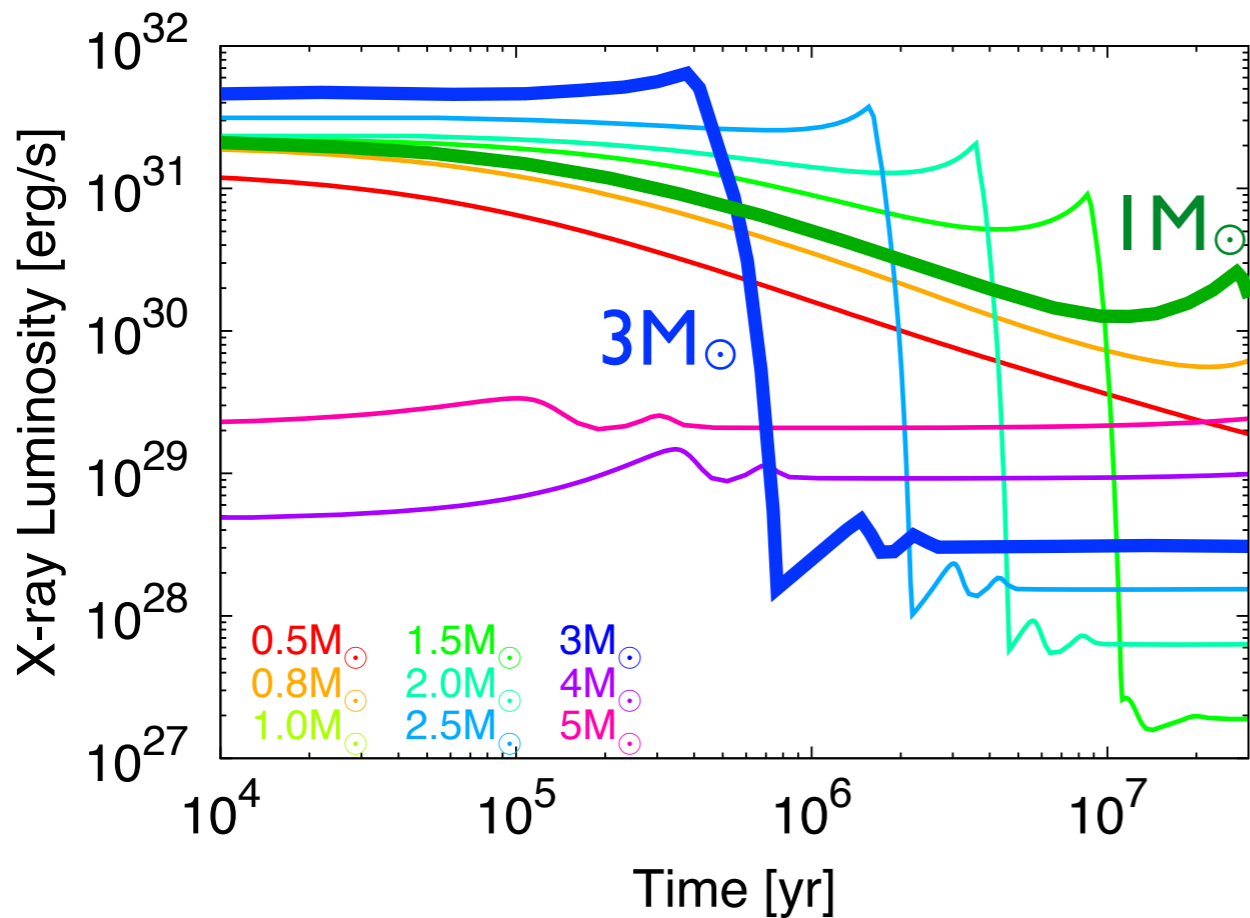


中質量星 (Herbig Ae/Be星) は  
低質量星に比べ円盤寿命が短い

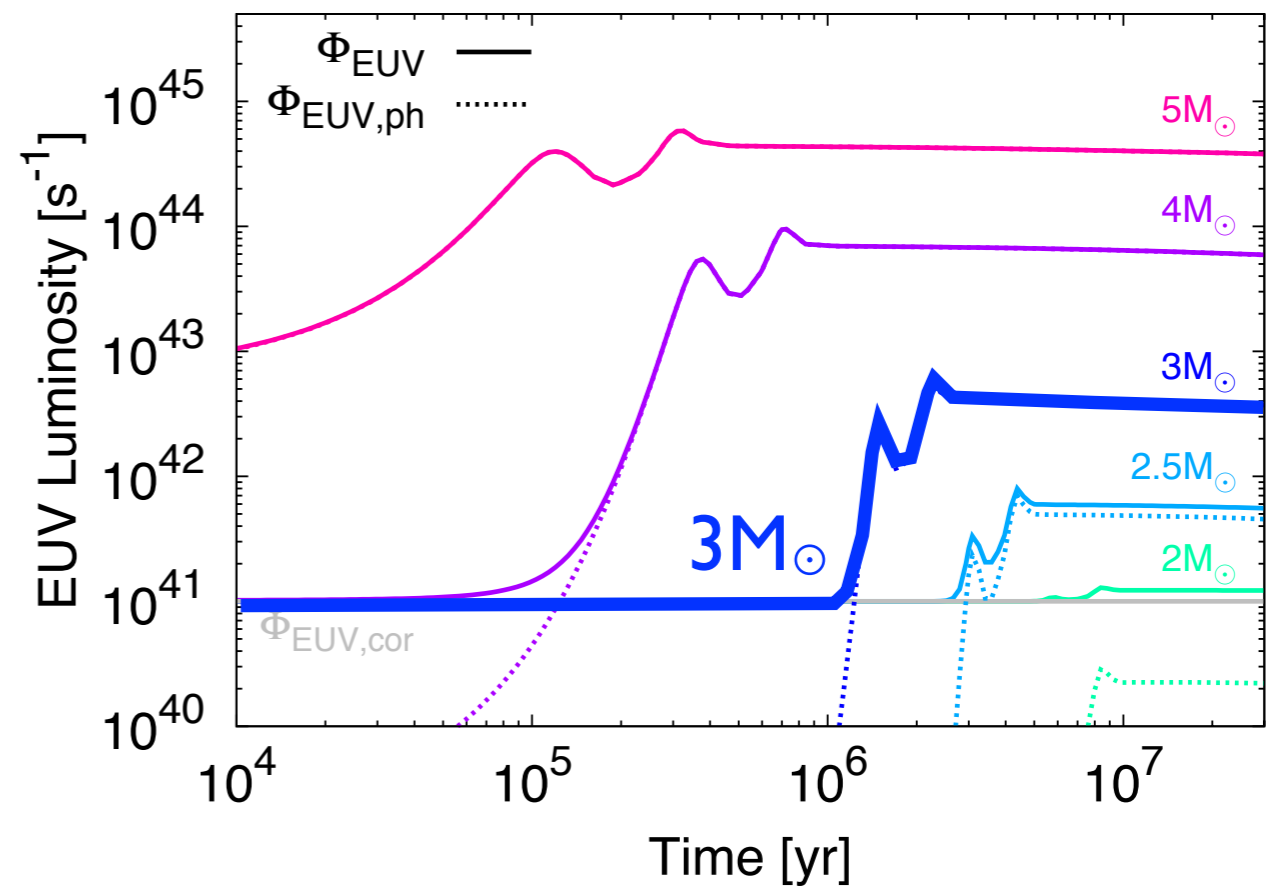
See also *Hillenbrand+92;*  
*Hernandez+05; Ribas+15*

# X線・UV光度の時間進化

- 光蒸発率はX線・UVの光度に依存 (光蒸発率  $\propto$  X線光度<sup>1</sup>, EUV光度<sup>1/2</sup>)
- 若い中質量星のX線・UV光度は短いタイムスケールで変化
  - X線光度は減少, EUV光度は増大



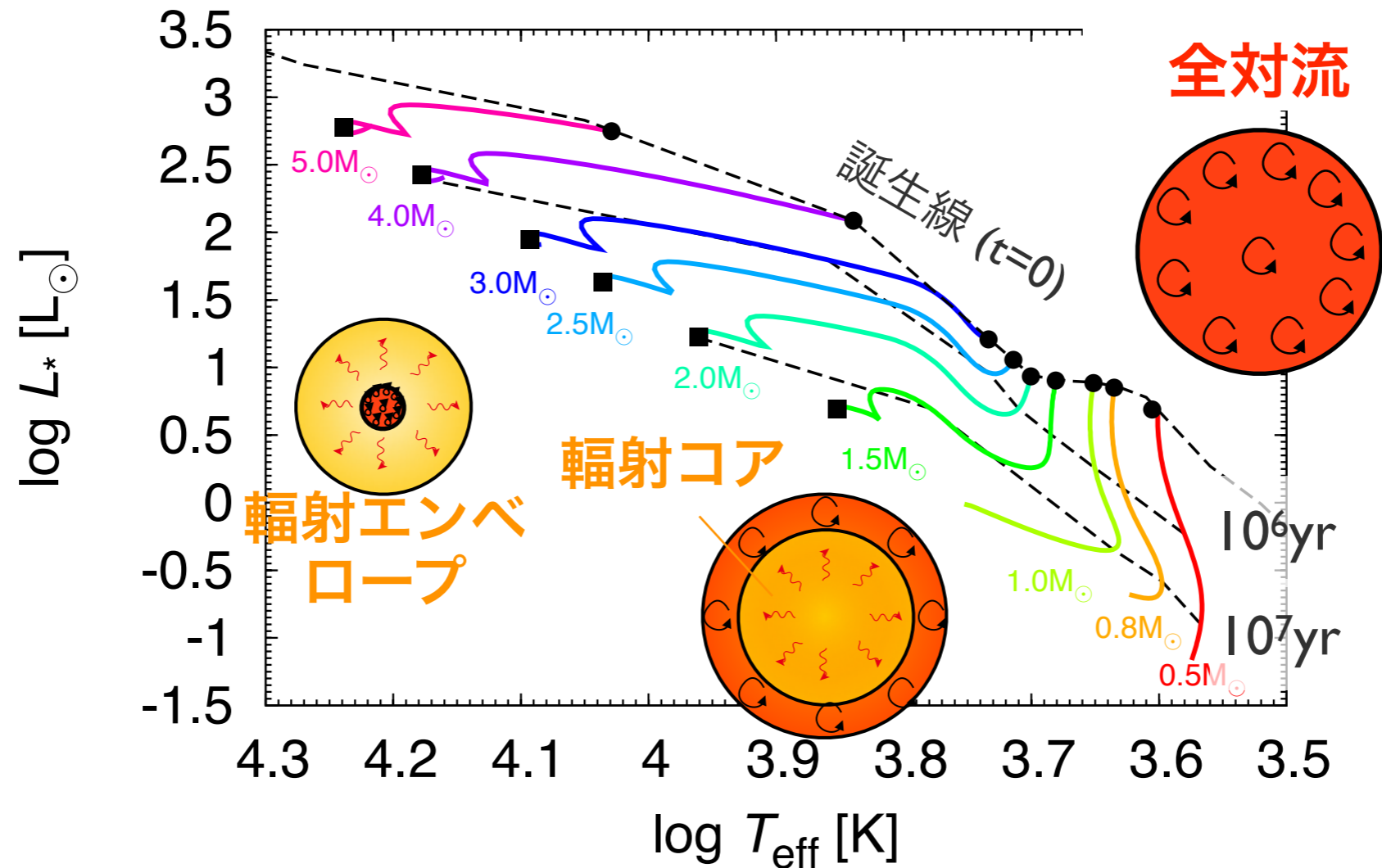
モデル計算 (Gregory+16の観測と整合)



磁気活動起源 ( $=10^{41}/s$ ) + 光球面  
(黒体放射を仮定)

# 中質量星のX線・UV光度の時間進化

- X線：磁気活動により発生 → 対流層の消失によりX線は弱くなる
- UV：磁気活動と光球面から発生 → 進化に伴いUV光度が増大



# 計算手法

- 1次元の拡散方程式

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sqrt{r} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma \sqrt{r}) \right) - \dot{\Sigma}_{\text{PE}}$$

粘性降着

光蒸発

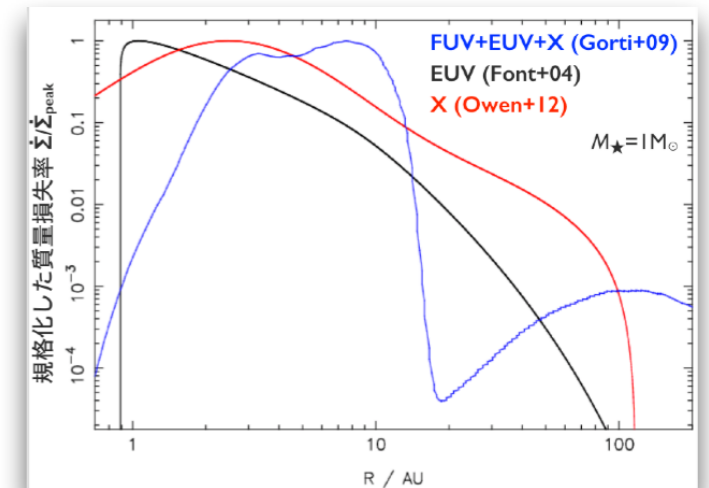
$\Sigma$  : ガス面密度

$\nu$  : 粘性 ( $=\alpha c_s h$ )

*Shakura+Sunyaev73*

X線 : Owen+10

EUV : Font+04



- パラメータ

- $\alpha = 10^{-3}(M_\star/M_\odot)$

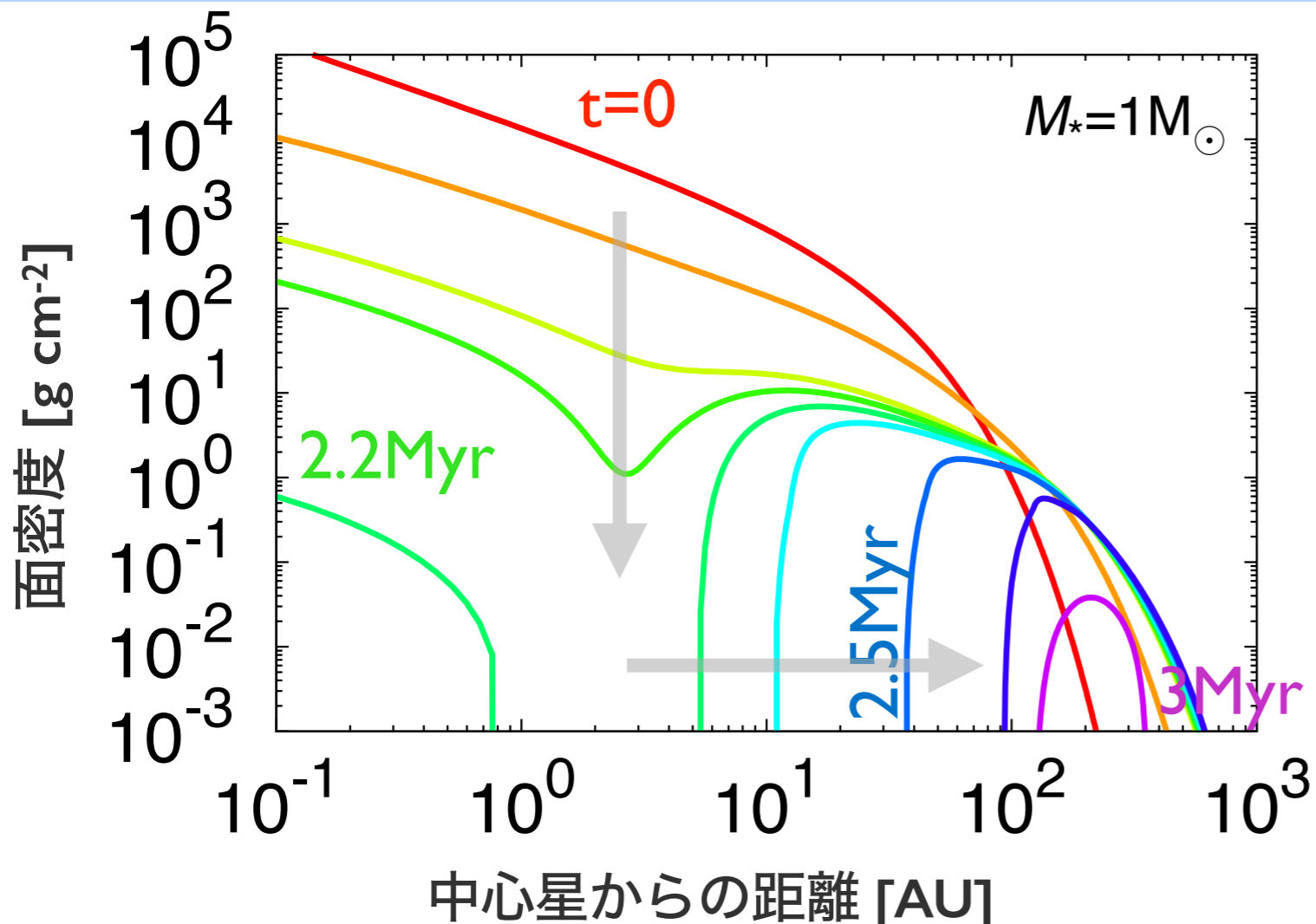
- X線・UV光度 : 時間進化

- 中心星質量 :  $1M_\odot$

- 温度分布 : 輻射平衡温度

- 初期円盤質量  $0.2 M_\star$

# 1M<sub>☉</sub>の星の円盤進化

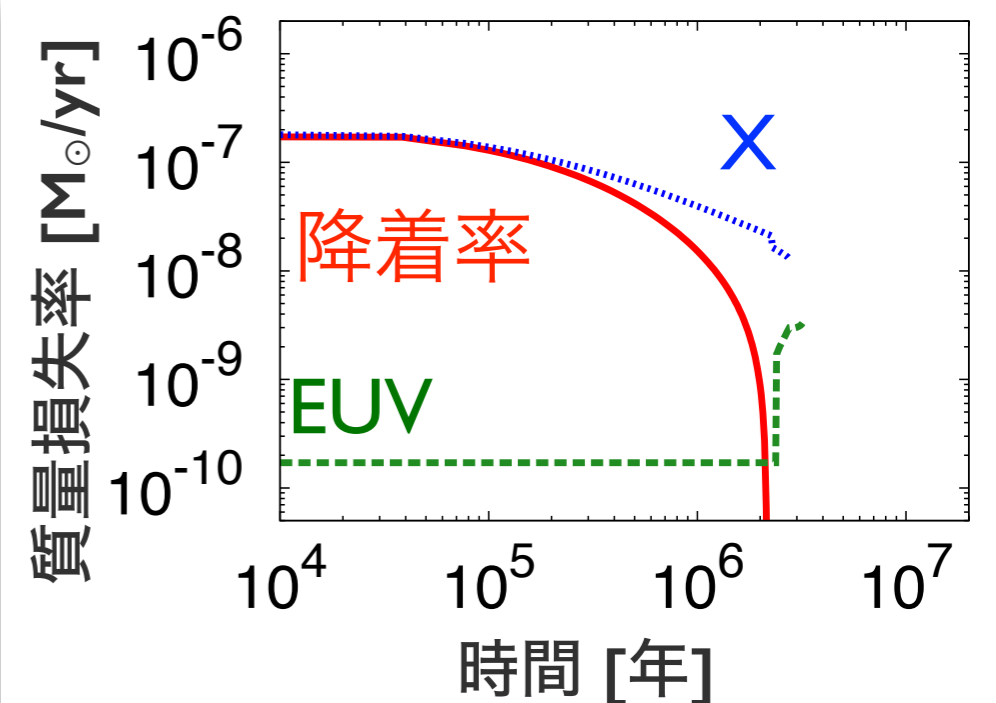


~2.2 Myr でギャップが空き、  
内側円盤も外側円盤も速やかに  
に散逸

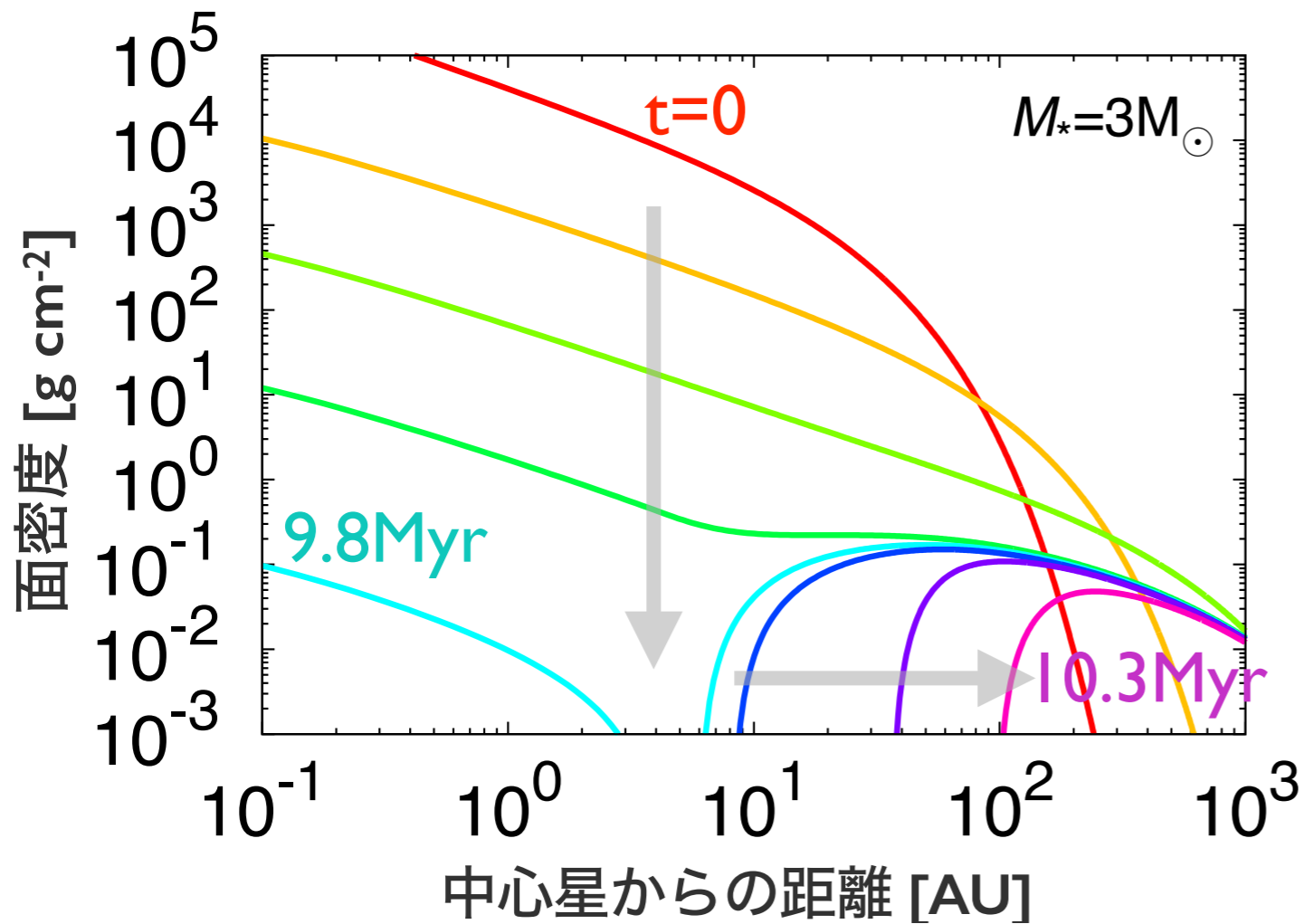
e.g., Owen+10

低質量星周りの円盤では  
光蒸発はX線が常に支配的

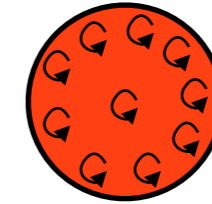
恒星進化の影響はほとんどない



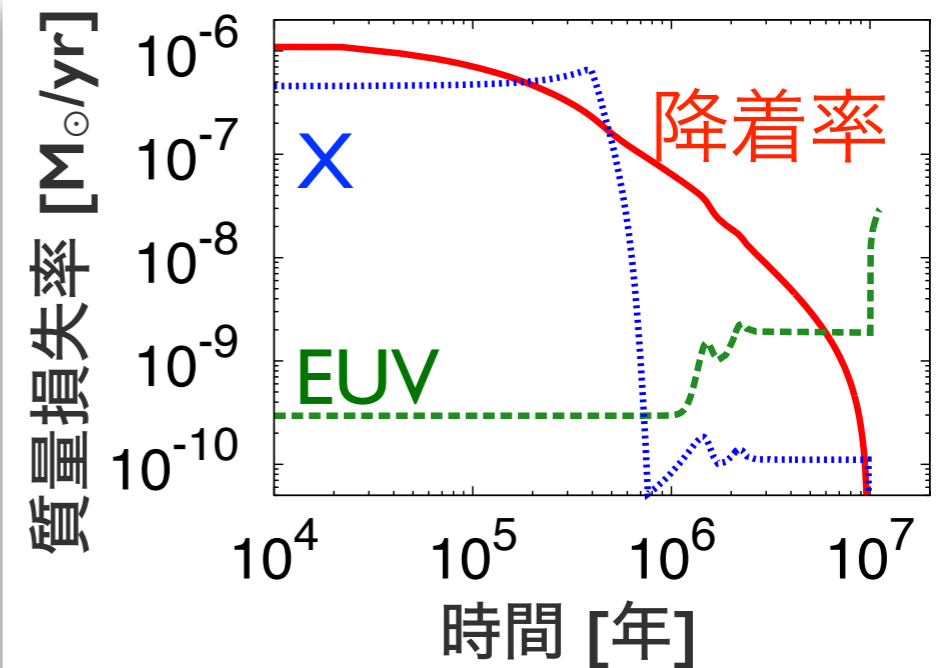
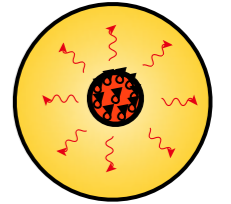
# 3M<sub>☉</sub>の星の円盤進化



全対流



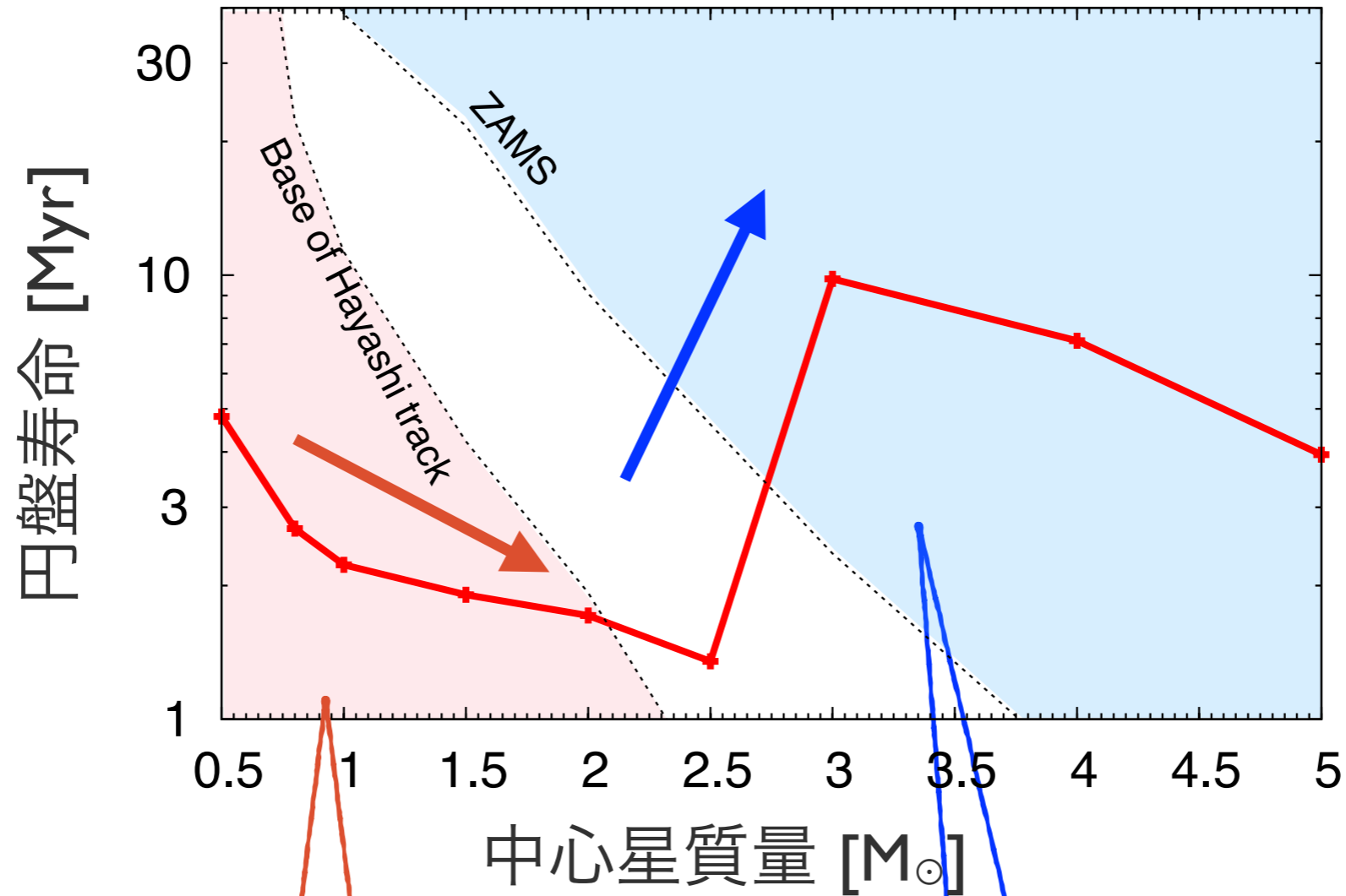
輻射構造



- ▶ 星の構造が変化するとX線光度 (→ X線光蒸発率) の減少
- ▶ 一方, 星の表面温度の増大により EUV 光蒸発率が増大

中質量星の円盤進化に恒星進化は本質的に重要

# 円盤寿命の中心星質量依存性



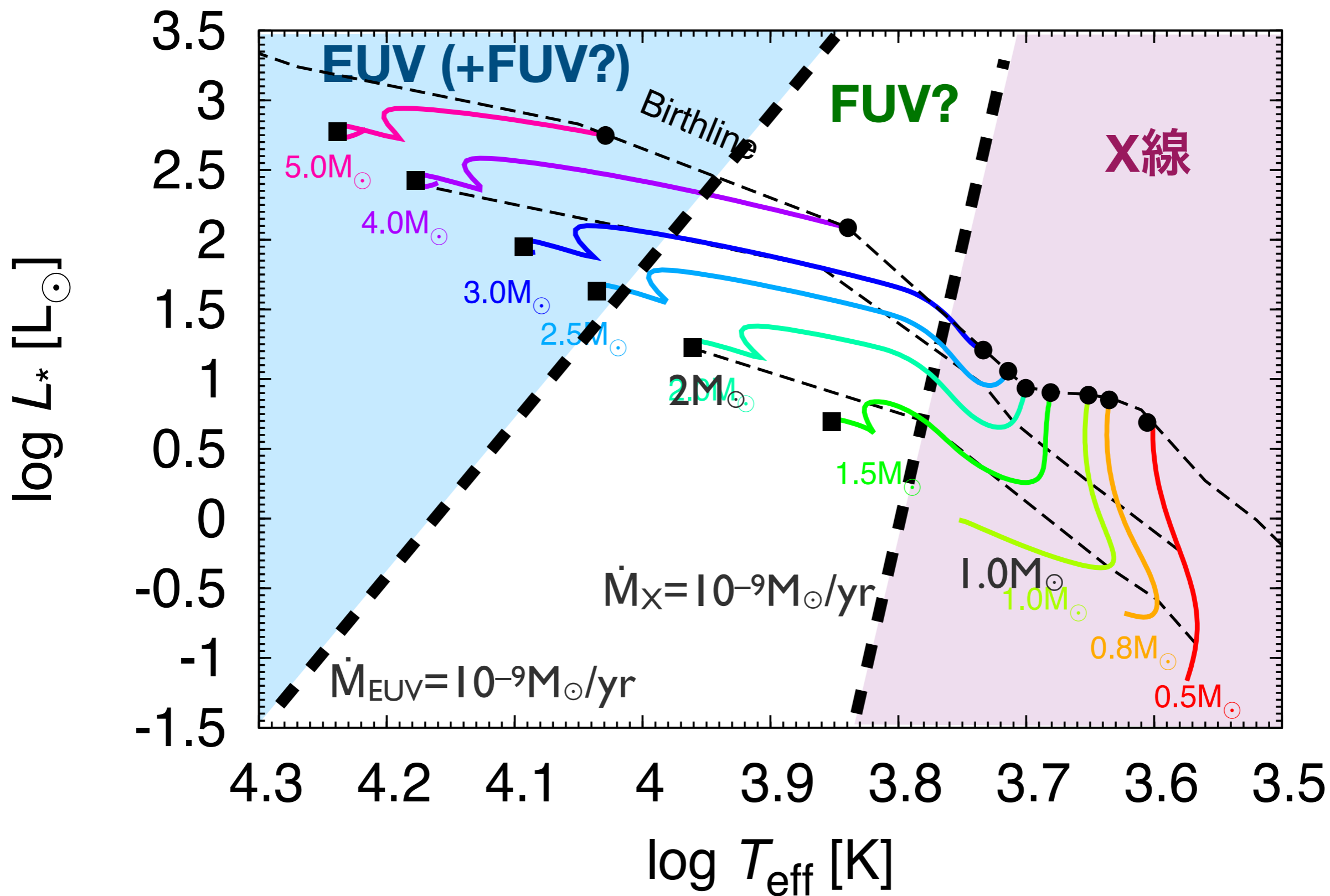
## 低質量側

- $M_{\star} \uparrow \rightarrow$  円盤寿命  $\downarrow$
- X線光蒸発が支配的
- $M_{\star} \uparrow \rightarrow$  X線光度  $\uparrow$

## 高質量側

- X線光蒸発は非効率
- 星が高温になってから EUV 光蒸発が増大

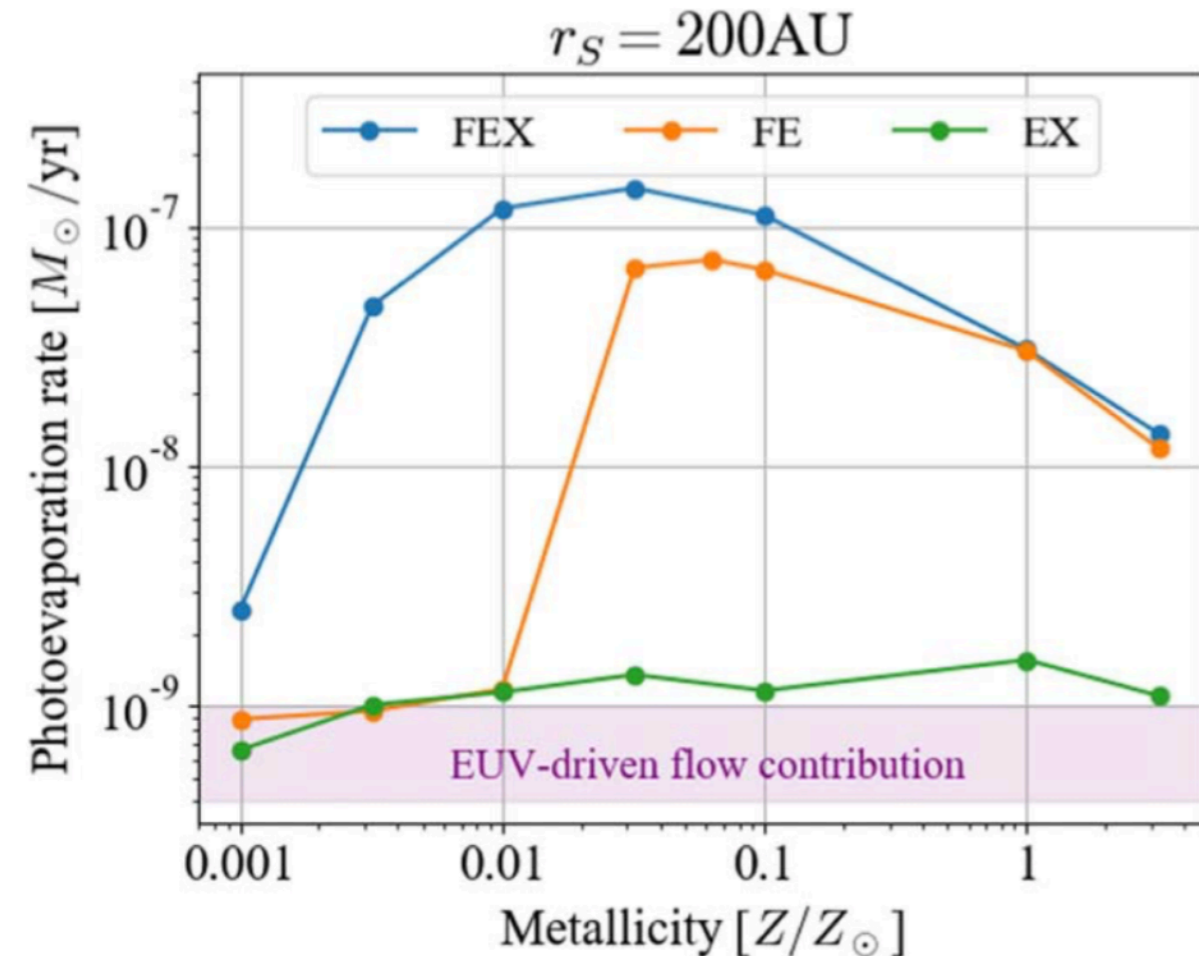
# 光蒸発駆動源 in HR図





# Effect of X-rays in recent models

Nakatani+18b



XがなくてもEUV/FUVがあれば  
あまり光蒸発率は減らない

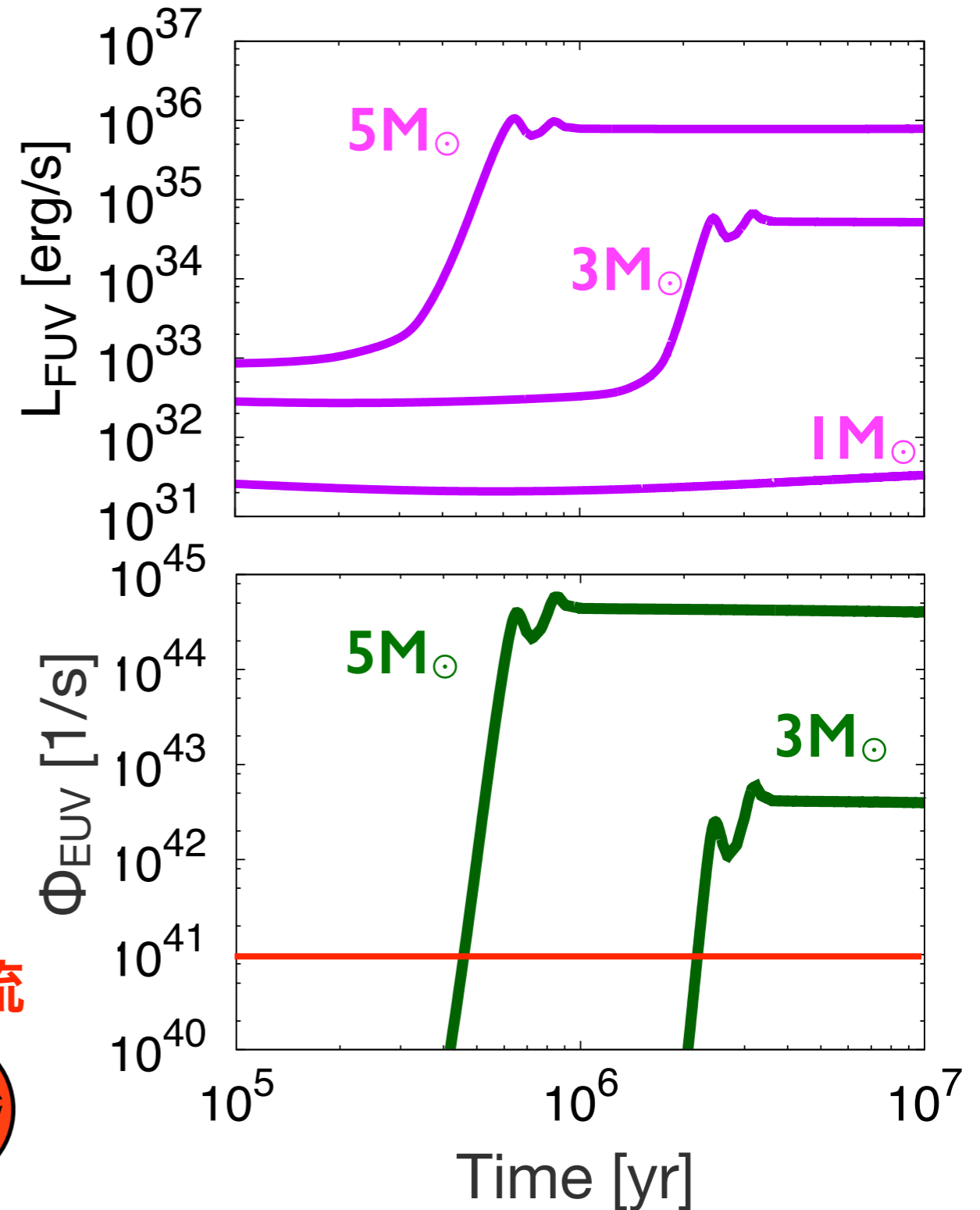
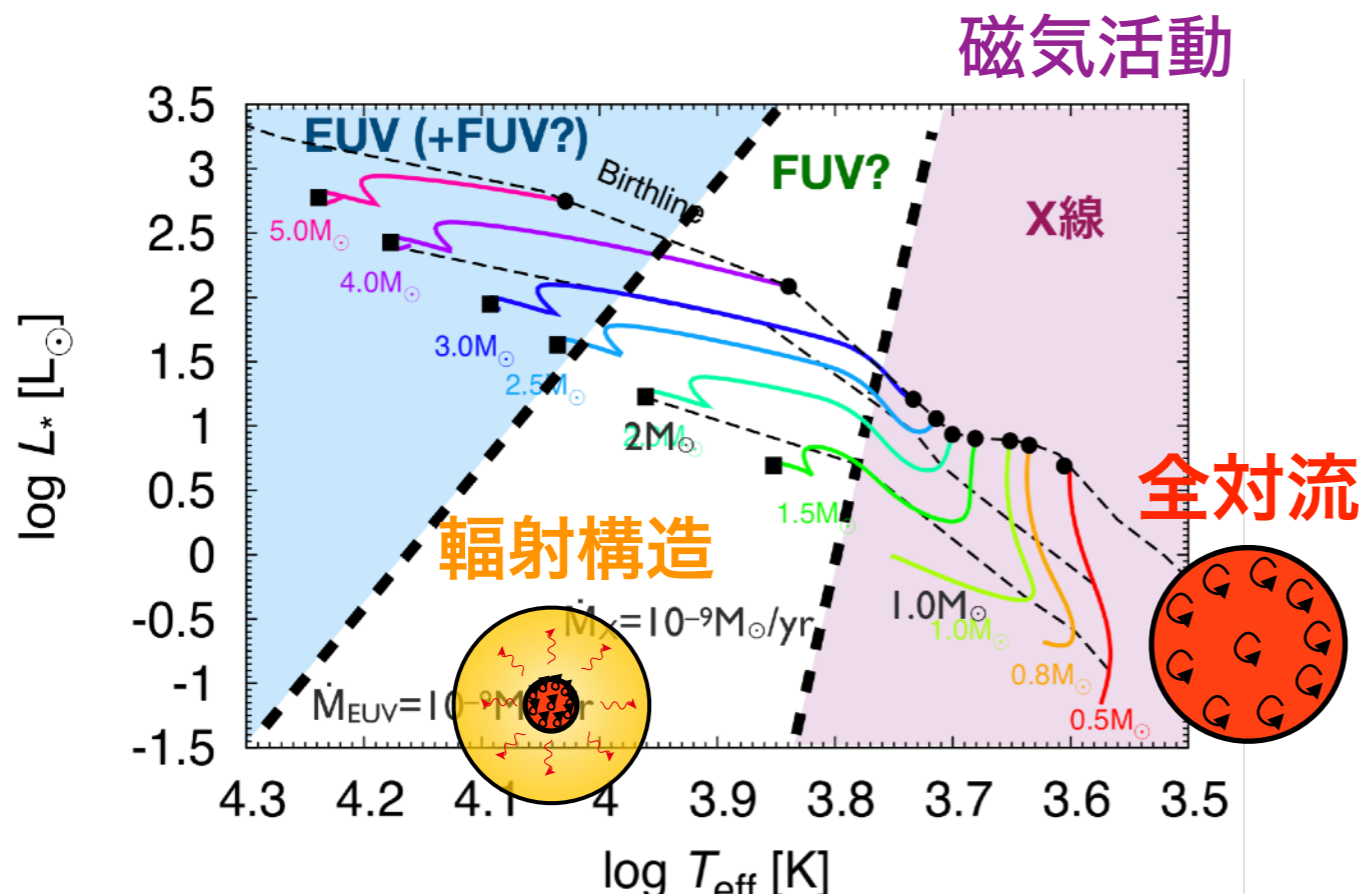
Wang+Goodman17

Description	$\dot{M}_{\text{wind}}$ ( $10^{-9} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ )
(2)	(3)
Fiducial	$2.5 \pm 0.2$
No LW photons	$2.5 \pm 0.3$
100 $\times$ LW photons	$17.6 \pm 2.1$
No “soft” FUV	$1.1 \pm 0.1$
“Soft” FUV only	0.0
No EUV	0.0
10 $\times$ EUV photons	$9.4 \pm 0.7$
No X-ray	$2.1 \pm 0.2$
10 $\times$ X-ray photons	$9.1 \pm 0.4$
$r_{\text{dust}} = 10 \text{ \AA}$	$2.8 \pm 0.6$
(1/40) dust	$2.5 \pm 0.4$
OECA10 analog <sup>a</sup>	$11.2 \pm 4.2$
Convergence test	$2.7 \pm 0.6$

# FUV luminosity

## ■ Origin of FUV

- chromospheric activity
- accretion
- **photosphere** (for early-type stars)



# FUV luminosity

## ■ Origin of FUV

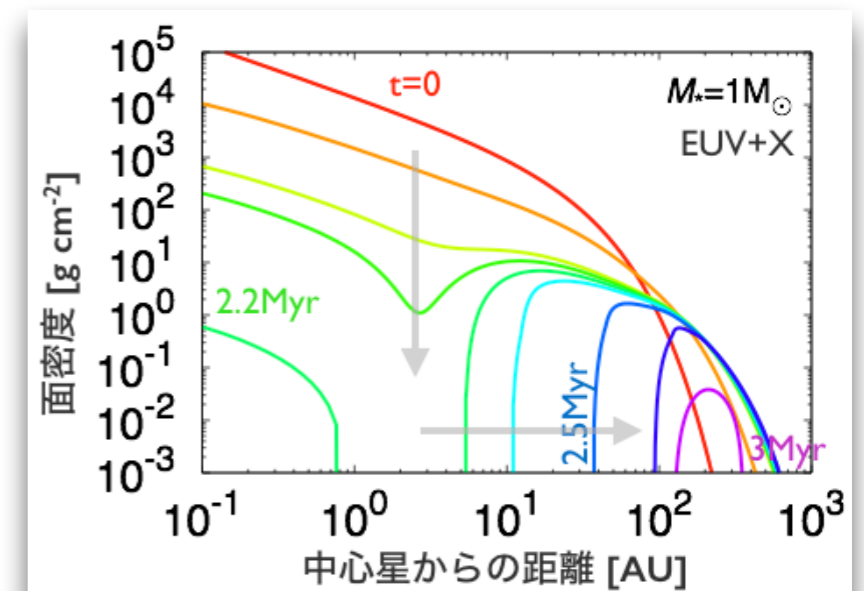
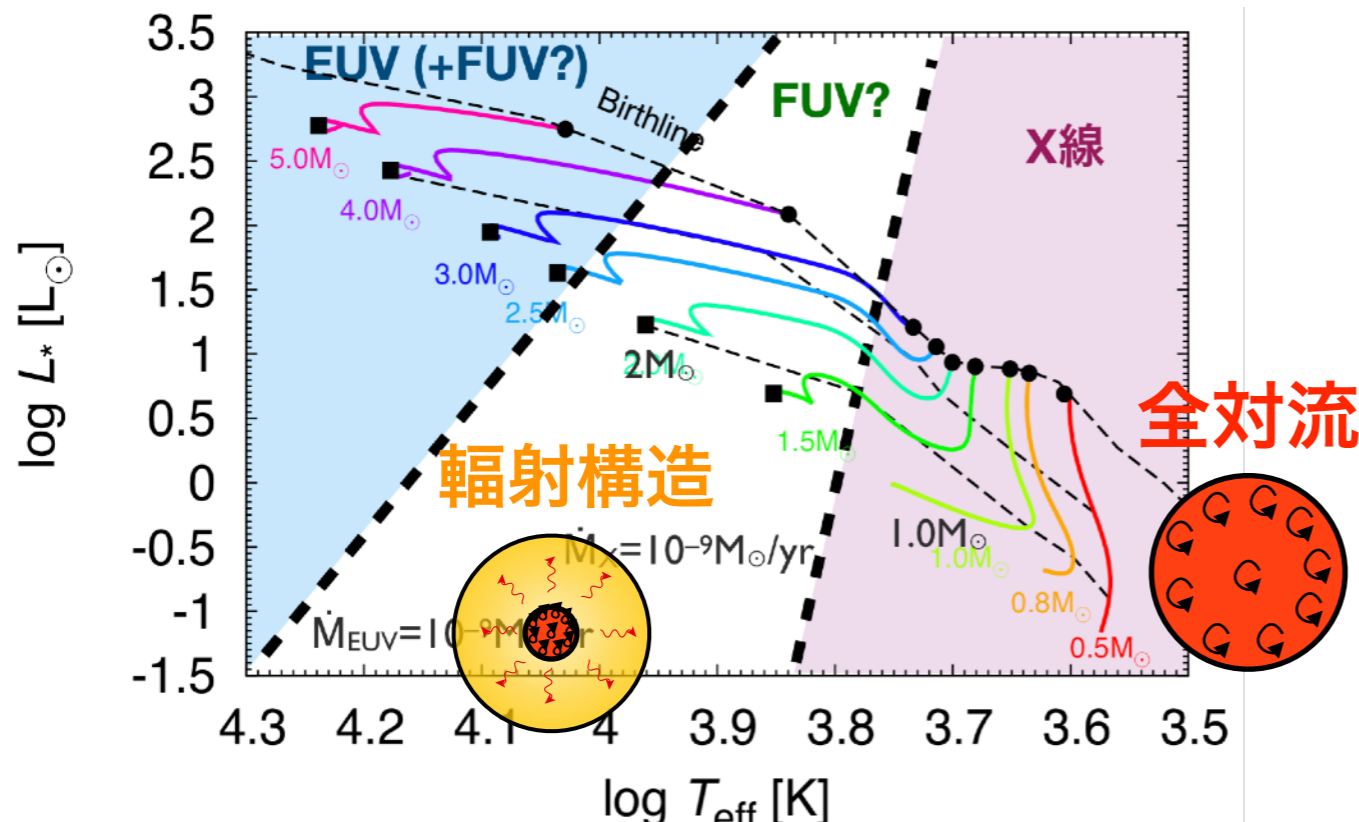
- chromospheric activity
- **accretion**
- photosphere (for early-type stars)

降着起源だけでは円盤にギャップを開けることは不可能  
 → 素早い散逸過程にはならない

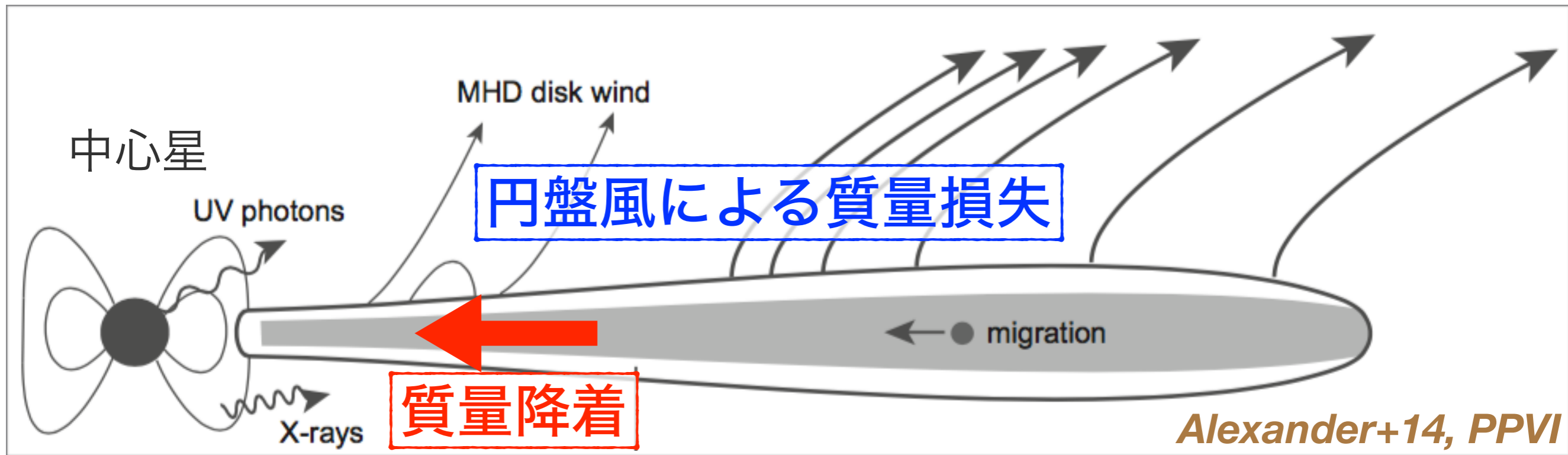
Matsuyama+03:  $\Phi_{\text{EUV}} \propto \dot{M}$

→ 今後FUVも同様にモデル化？

$L_{\text{FUV}} \propto \dot{M}$



# 円盤進化過程



## 中心星への降着

- 乱流粘性
- 磁気制動
- 重力不安定

## 円盤風

- 熱的円盤風（光蒸発）
- 磁気駆動円盤風

# 磁場駆動円盤風

## 磁気乱流駆動円盤風

MRI乱流が低速の円盤風を駆動

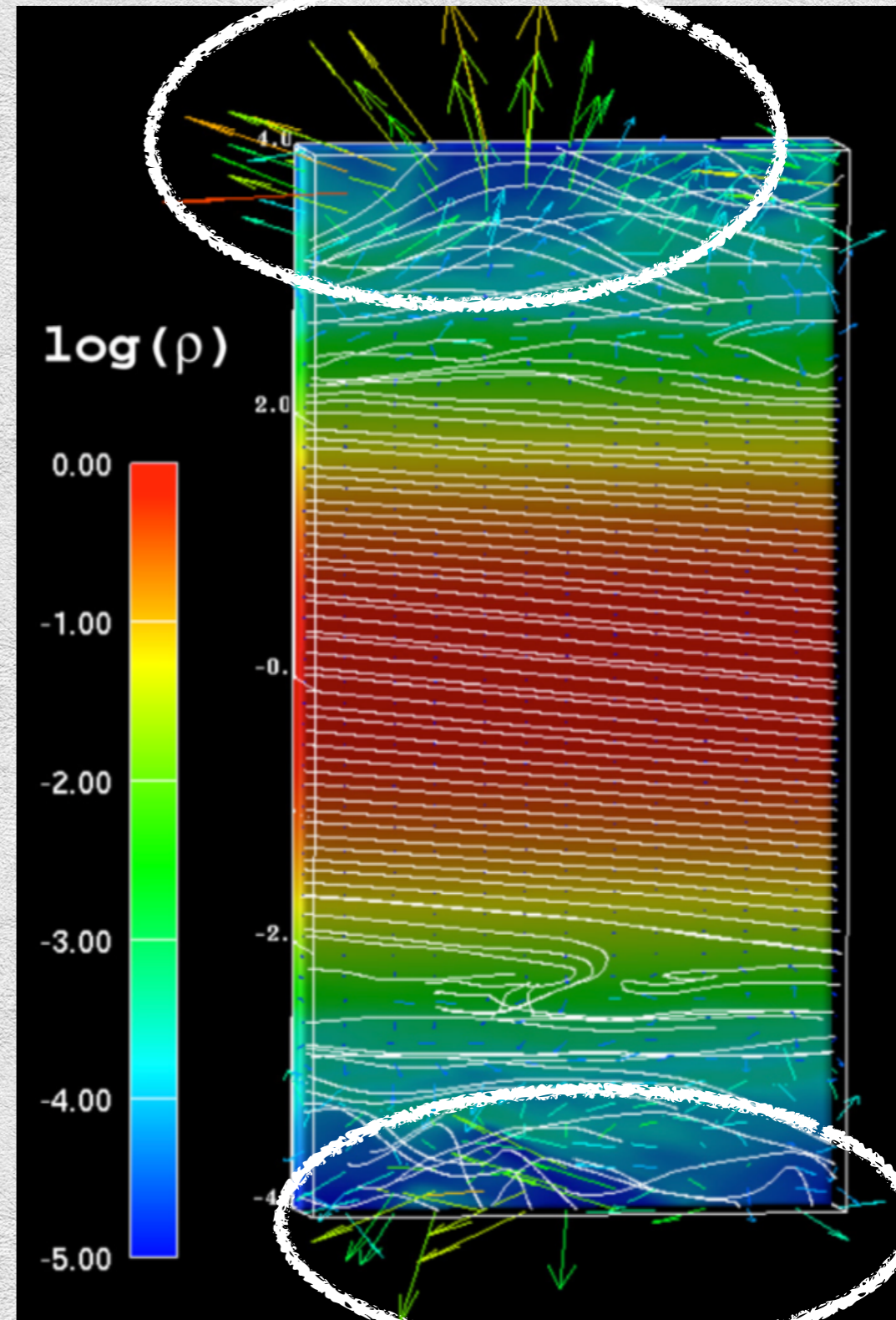
- Suzuki+Inutsuka09が発見
- 降着による重力エネルギー解放が乱流のエネルギー源

*see also Suzuki+10,16,  
Bai+Stone13,  
Fromang+13, Lesur+13*

\*MRI-deadな  
赤道面の場合

矢印：速度場, 線：磁力線

*Suzuki+10*



# 計算手法

- 1次元の拡散方程式

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sqrt{r} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma \sqrt{r}) \right) - \dot{\Sigma}_{\text{PE}} - \dot{\Sigma}_{\text{DW}}$$

粘性降着

光蒸発

MHD円盤風

$$\dot{\Sigma}_{\text{DW}} = C_w (\rho c_s)_{\text{赤道面}}$$

$\Sigma$  : ガス面密度

X線 : Owen+10

Suzuki+10

$\nu$  : 粘性 ( $=\alpha c_s h$ )

EUV : Font+04

Shakura+Sunyaev73

- パラメータ

- $C_w = 2.5 \times 10^{-6}$

- $\alpha = 10^{-3}$

- X線光度 :  $10^{-30}$  erg/s

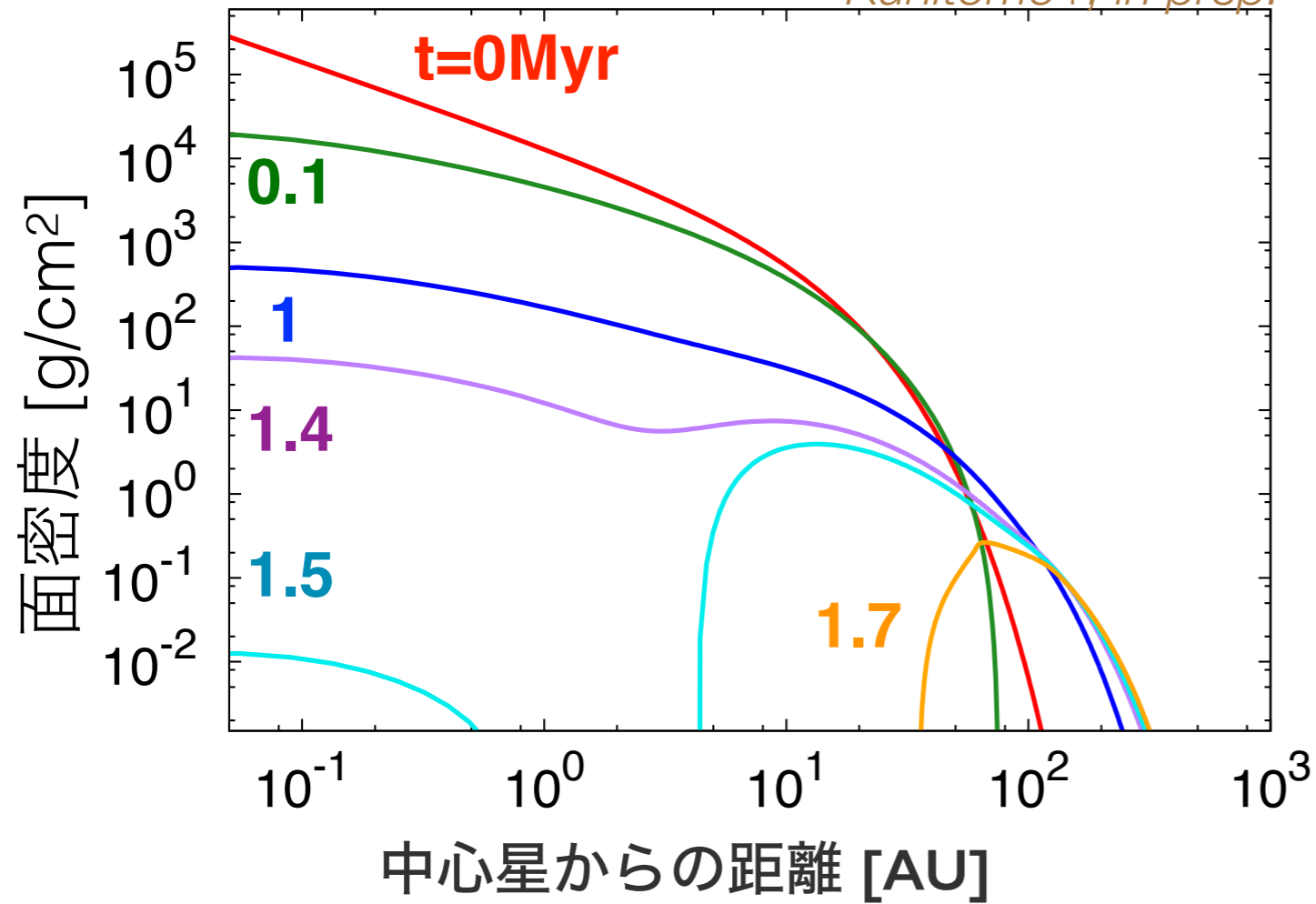
- EUV光度 :  $10^{-40}$  photons/s

- 中心星質量 :  $1M_{\odot}$

- 温度分布 : 輻射平衡温度

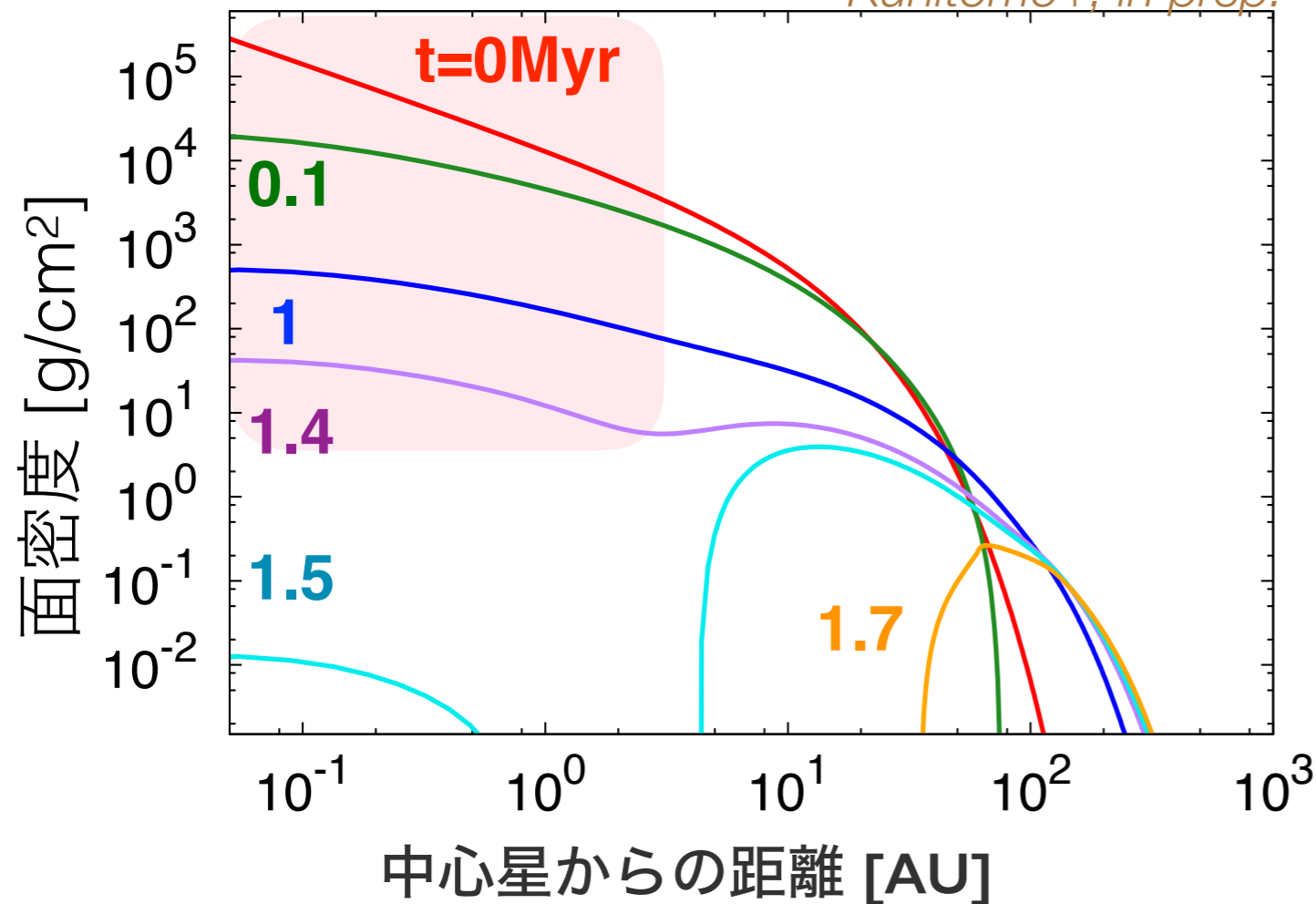
# 粘性降着 + 光蒸発 + 磁気駆動円盤風の円盤進化

*Kunitomo+, in prep.*

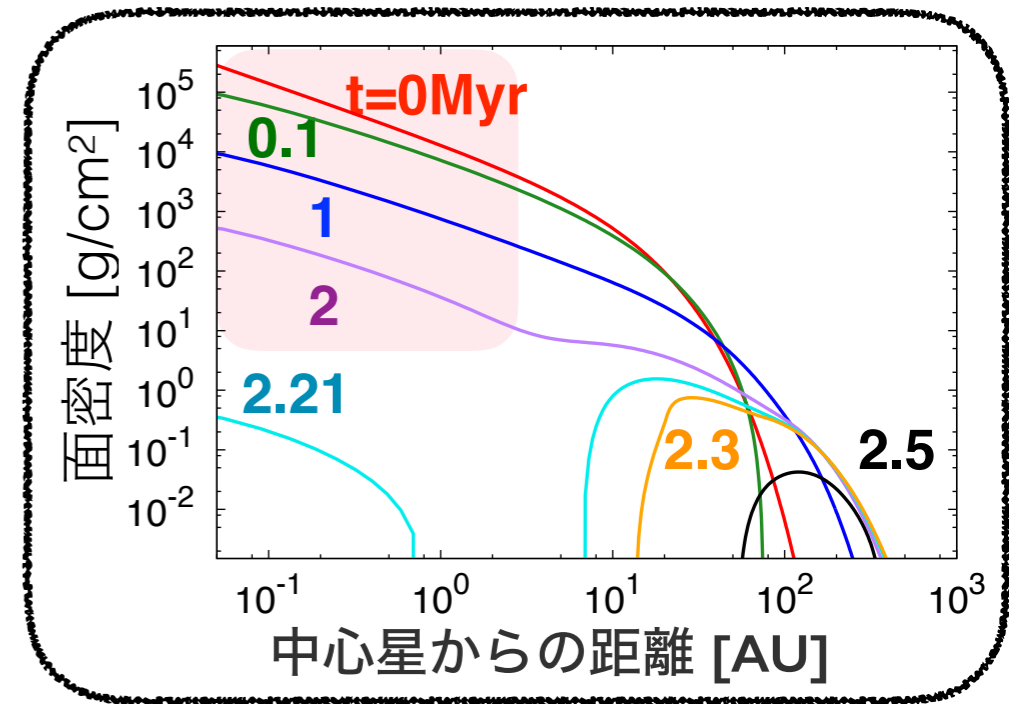


# 粘性降着 + 光蒸発 + 磁気駆動円盤風の円盤進化

Kunitomo+, in prep.



磁気駆動円盤風なし

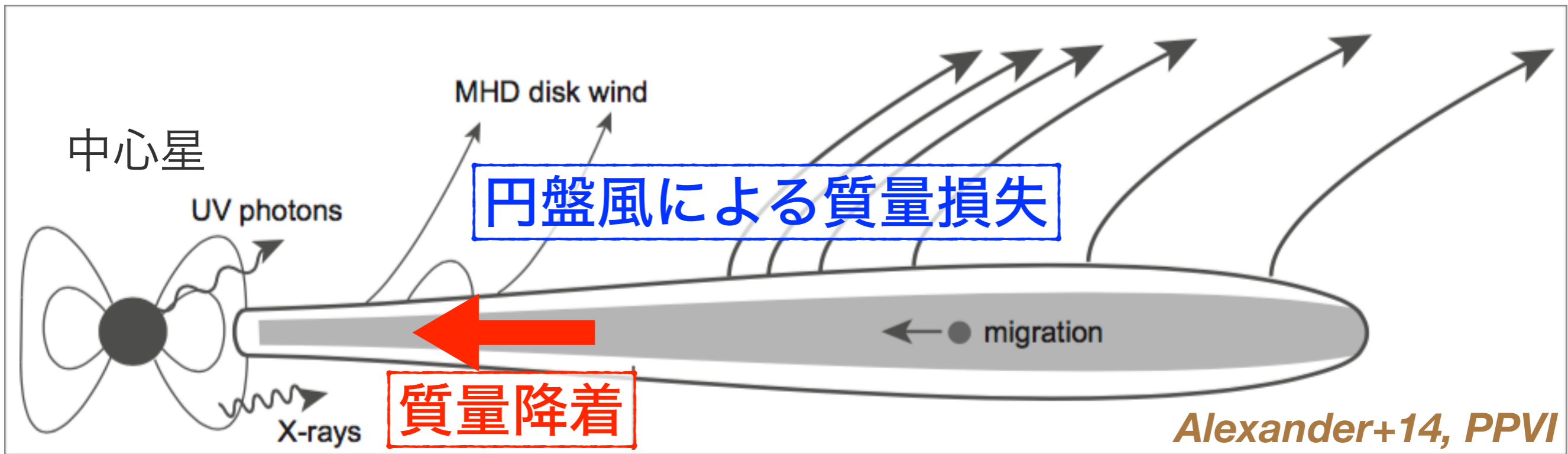


- 円盤風により内側の面密度が早く減少
- 初期は円盤風が支配的 → 質量降着率の減少とともに円盤風が弱まった後、光蒸発により完全に散逸

$\dot{\Sigma}_{DW} = C_w (\rho c_s)_{\text{赤道面}}$  円盤風のエネルギー源は降着による重力エネルギーの解放  
 → 降着率が大きい初期にポテンシャルの深い円盤内側で重要



# 円盤進化過程



## 中心星への降着

- 乱流粘性
- 磁気制動
- 重力不安定

## 円盤風

- 熱的円盤風 (光蒸発)
- 磁気駆動円盤風

相互作用？

Wang+18

HL Tauの“ $\alpha$ パラドックス”

Bai16, Hasegawa+17

→ 磁気制動の重要性

# まとめ

- 観測：数Myrののち，素早い散逸を要請
- 粘性降着＋光蒸発で観測と定性的には整合的な進化
  - X線 or FUV で $\sim 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$  と言われてきたが，近年モデルの進展
  - 中質量星周りの円盤進化には恒星進化が重要
- 磁気駆動円盤風は若い段階に円盤内側，光蒸発は後期段階に外側で重要
  - 磁気駆動円盤風＋光蒸発流による磁気制動の効果は今後の課題