

初代星・初代銀河研究会

# 超大質量星周円盤の 自己重力不安定性と分裂条件

松木場 亮喜 (東北大学)

共同研究

高橋	実道 (国立天文台/工学院大)
杉村	和幸 (東北大学)
大向	一行 (東北大学)



# 目次

## 1. イントロダクション

- 超大質量ブラックホール形成シナリオ
- 星周円盤の自己不安定性

## 2. 円盤モデル

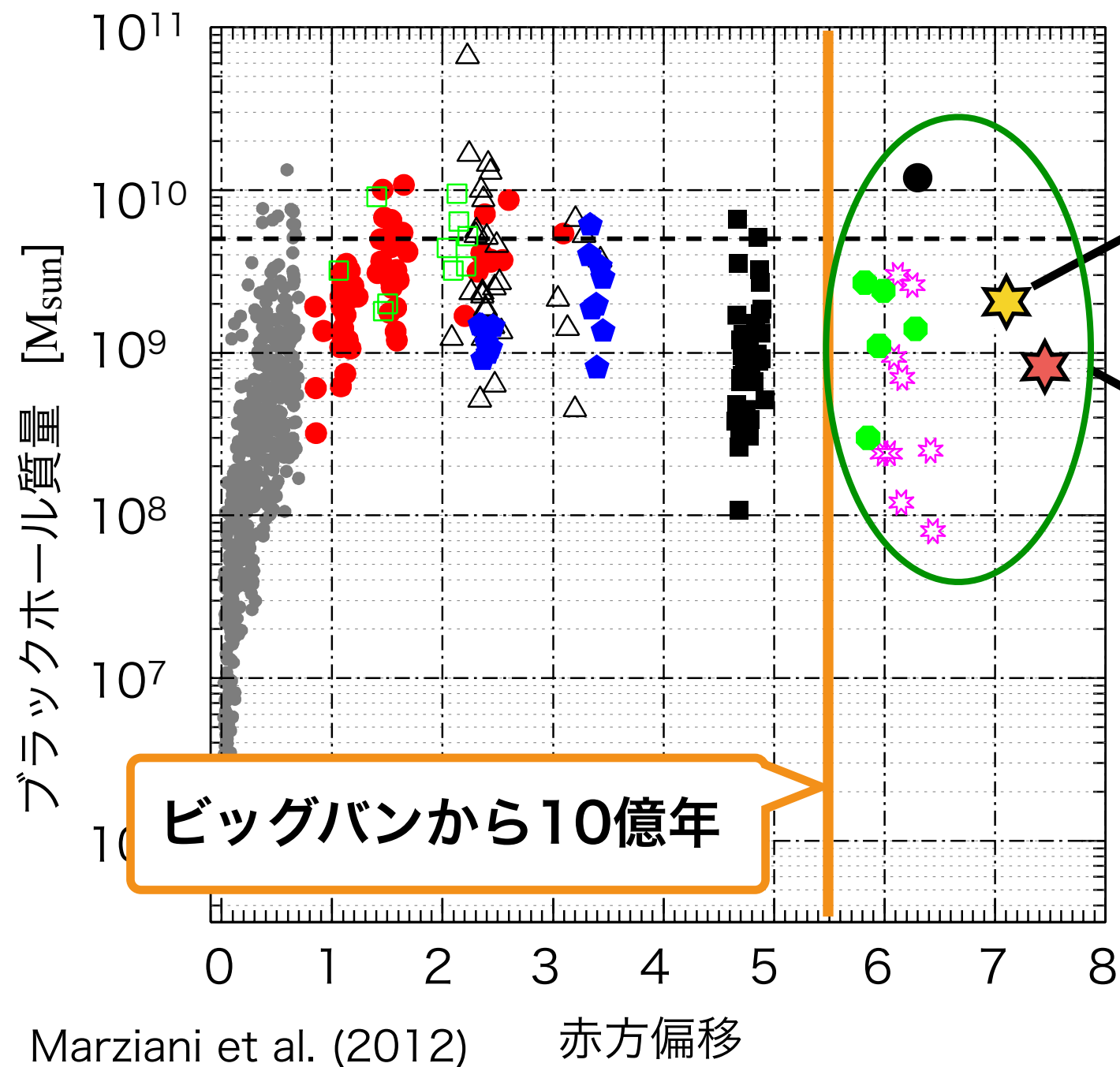
## 3. 結果

- H原子降着流の場合
- H<sub>2</sub>分子降着流の場合

## 4. まとめ、議論

# 1. イントロダクション

# 超大質量ブラックホール(SMBH)



$z = 7.09, 2 \times 10^9 M_{\text{sun}}$   
Mortlock et al. (2011)

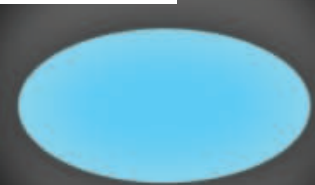
$z = 7.54, 8 \times 10^8 M_{\text{sun}}$   
Bañados et al. (2017)

⇒ **短時間で大質量のBHを形成**  
**形成シナリオは？**

# SMBH形成シナリオ

3つの種ブラックホール形成シナリオ

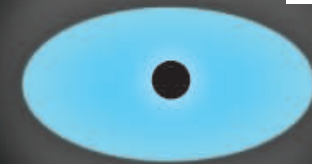
## 初代星BH



Gas cools very slowly forming a stable disc

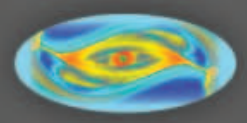


First stars: maybe one star per galaxy, up to several hundred times larger than the sun



$10^2 M_{\text{sun}}$  than  $\sim 300$  solar masses, it collapses into a black hole,  $\sim 200$  times the mass of Sun

## ダイレクトコラプス



Globally unstable gas and a supermassive star forms

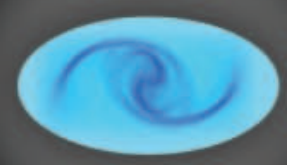
## 本発表の話題

The stellar envelope swallows what is left of the star

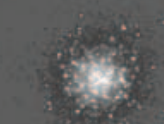


$10^5 M_{\text{sun}}$  swallows the envelope growing up to  $\sim$  one million solar masses

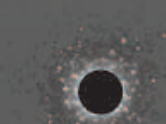
## 星の合体



Locally unstable gas flows toward the galaxy center



Gas fragments into stars, and a dense star cluster forms

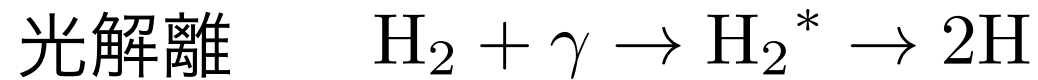


$10^3 M_{\text{sun}}$  into a very massive star that collapses into a black hole  $\sim 1000$  times more massive than the Sun

⇒ 各々の種ブラックホールが降着・合体によってSMBHへ

# ダイレクトコラプスの際の熱進化

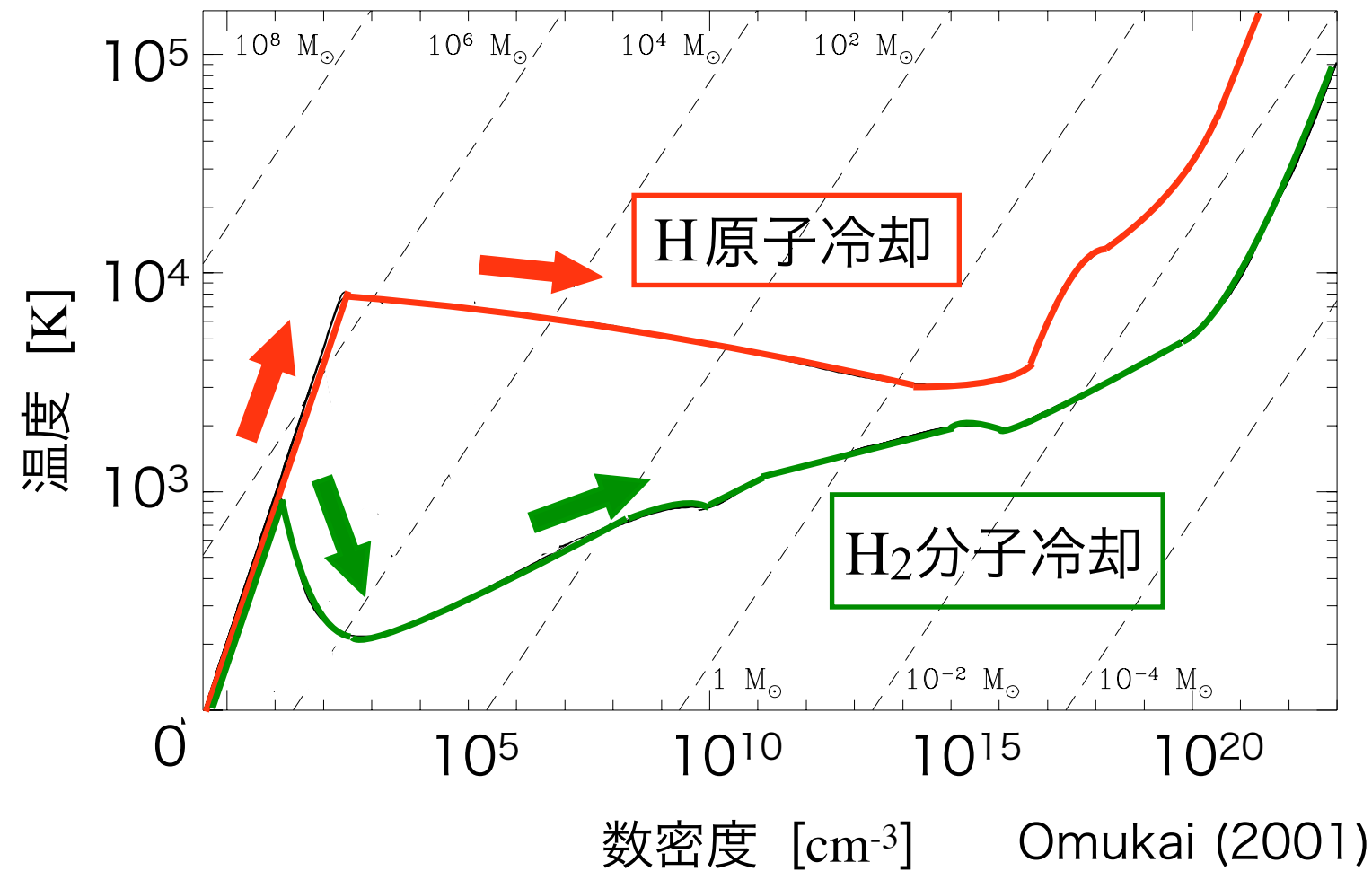
外部輻射場で H<sub>2</sub> 分子形成が抑制



H 原子冷却によって収縮 (**赤線**)

等温的に進化  $\sim 10^4 \text{ K}$

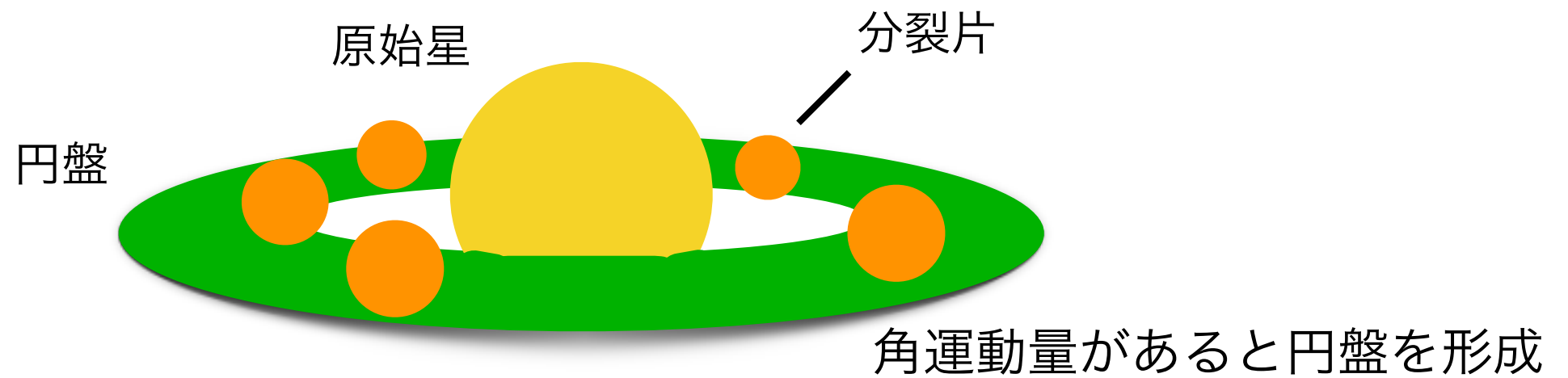
$\Rightarrow$  分裂を回避



H 原子冷却ガス雲での降着率

$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{\text{ff}}} \sim 0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left( \frac{T}{10^4 \text{ K}} \right)^{3/2} \quad \text{高い降着率}$$

# 円盤を通した原始星への降着



超大質量星形成時の典型的な降着率  $\sim 0.1 M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$

高い降着率  $\Rightarrow$  円盤は自己重力的に不安定化しやすい

$\Rightarrow$  円盤分裂で降着率が時間変動する可能性あり

$\Rightarrow$  原始星の進化に影響 Sakurai et al. (2015)

**円盤は分裂するのか？**

# 先行研究の問題点および本研究の目的

先行研究 Latif & Schleicher (2015), Inayoshi & Haiman (2014)

始原ガス円盤の自己不安定性による分裂を議論

⇒ 熱・化学進化を単純化

自己重力不安定性は温度に依存

$$\text{トゥームレのQ値} \quad Q = \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma} \propto T^{1/2} \quad \left( \begin{array}{l} Q > 1 : \text{安定} \\ Q < 1 : \text{不安定} \end{array} \right)$$

Toomre (1964)

⇒ ガスの冷却過程が重要

⇒ 熱・化学進化を解く必要有り

本研究では、

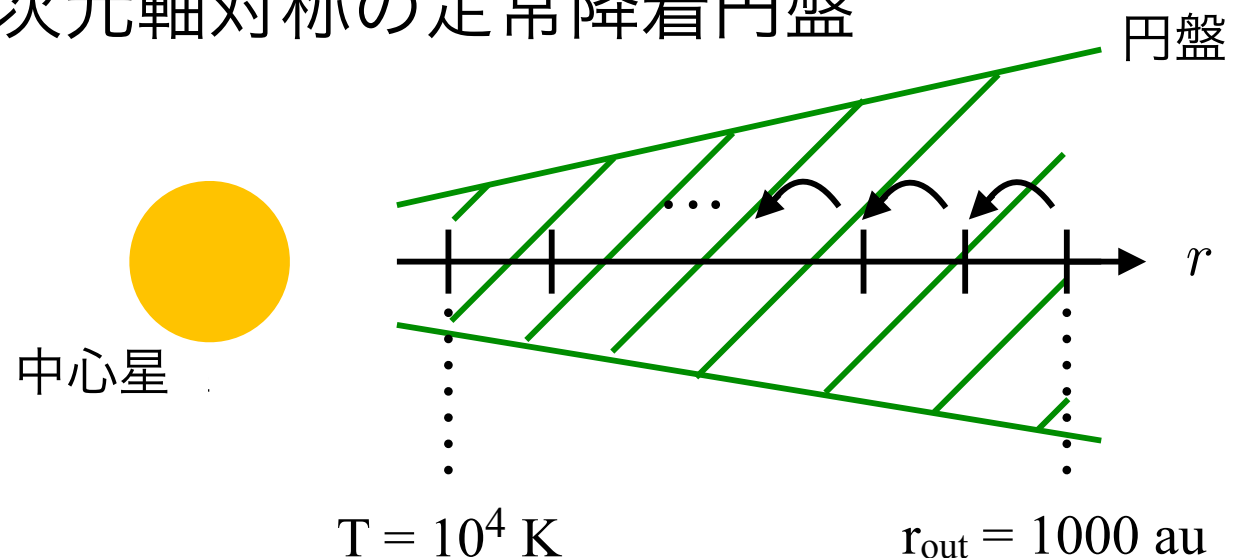
自己重力円盤中のガスの冷却過程を詳細な熱・化学進化に基づいて解くことで円盤分裂の有無について調べる



## 2. 円盤モデル

# 円盤モデル

## 1次元軸対称の定常降着円盤



## パラメータ

$M_*$  : 中心星質量

$\dot{M}$  : 降着率

✓ ケプラー回転

✓ ギリギリ自己重力不安定な円盤の構造を求める :  $Q = \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma} = 1$

✓ 熱進化  $\frac{de}{dt} = \Gamma - \Lambda$

⇒ 密度構造が得られる

加熱過程 : 粘性加熱, 圧縮加熱

冷却過程 :  $H_2$  分子の輝線放射,  $H^-$  自由束縛放射,  $H_2$  衝突誘起放射, 化学冷却

✓ 化学組成  $H, H_2, H^+, H^-, e$

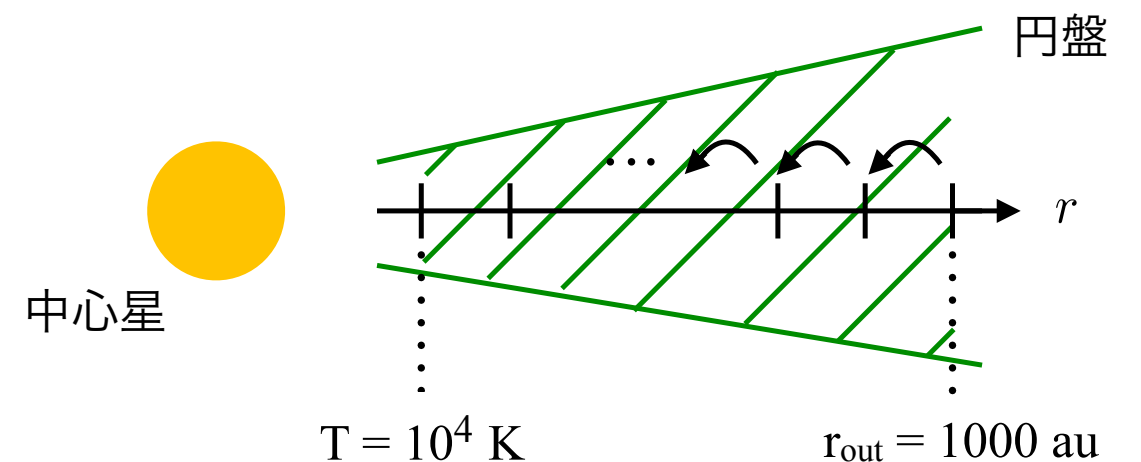
# 分裂条件

## ✓ 分裂条件

$\alpha$  粘性率      Shakura & Sunyaev, (1973)

$$\alpha = \frac{\nu\Omega}{c_s^2} > 1 \quad \text{を採用} \quad \text{Zhu et al. (2012)}$$

自己重力不安定で輸送できる角運動量に上限

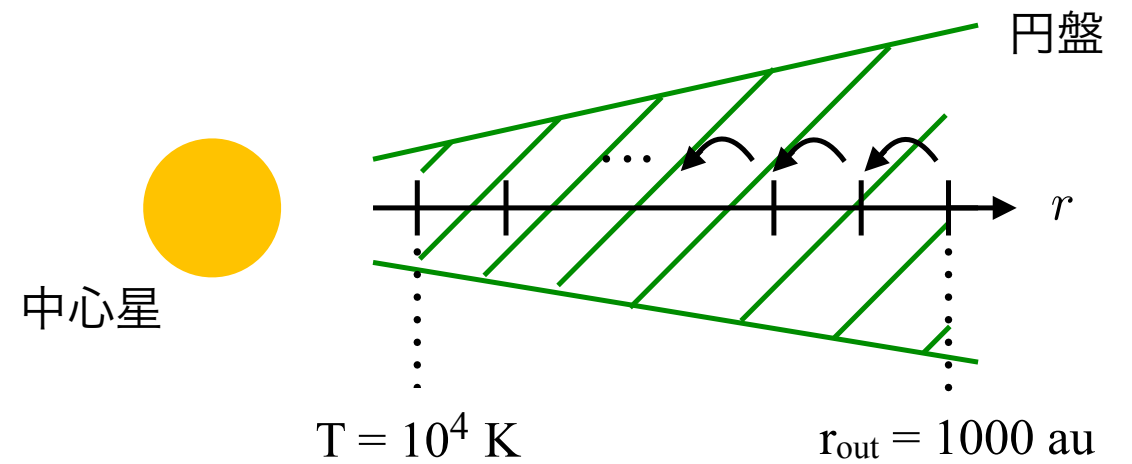


# 分裂条件と外側境界

## ✓ 計算範囲

外縁半径  $10^3$  au

温度  $10^4$  K で止める



## ✓ パラメータ範囲

- 中心星質量  $10 - 10^5 M_{\text{sun}}$
- 降着率  $10^{-3} - 1 M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$

## ✓ 外側境界 温度と化学組成比 $\left( y_i = \frac{n_i}{n_{\text{nuclei}}} \right)$

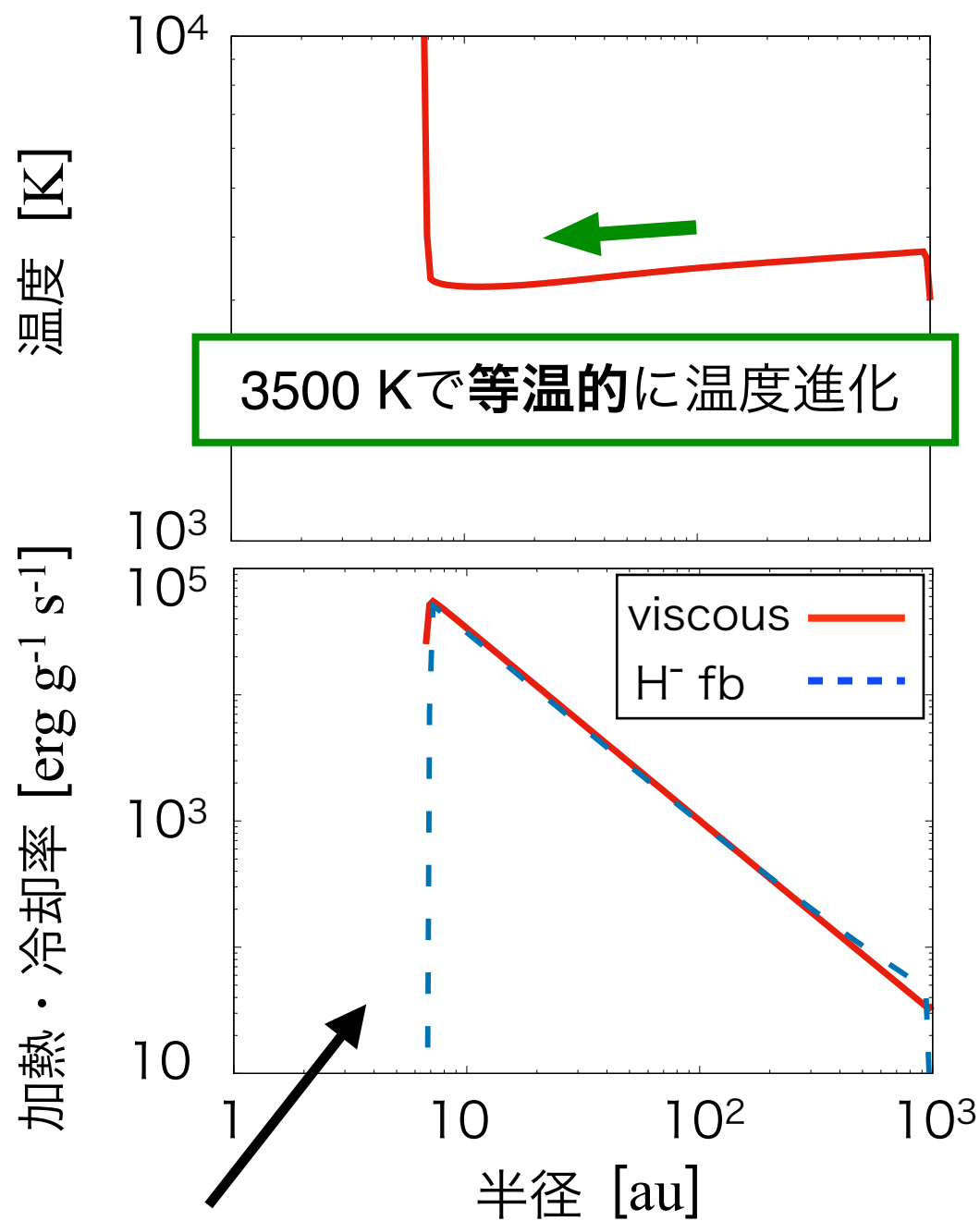
	温度	H	H <sub>2</sub>	H <sup>+</sup> , e	H <sup>-</sup>	He
• H 原子降着流	3000 K	0.99	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-18}$	$8.33 \times 10^{-2}$
• H <sub>2</sub> 分子降着流	1000 K	$10^{-2}$	0.495	$10^{-10}$	$10^{-20}$	$8.33 \times 10^{-2}$

# 3. 結果

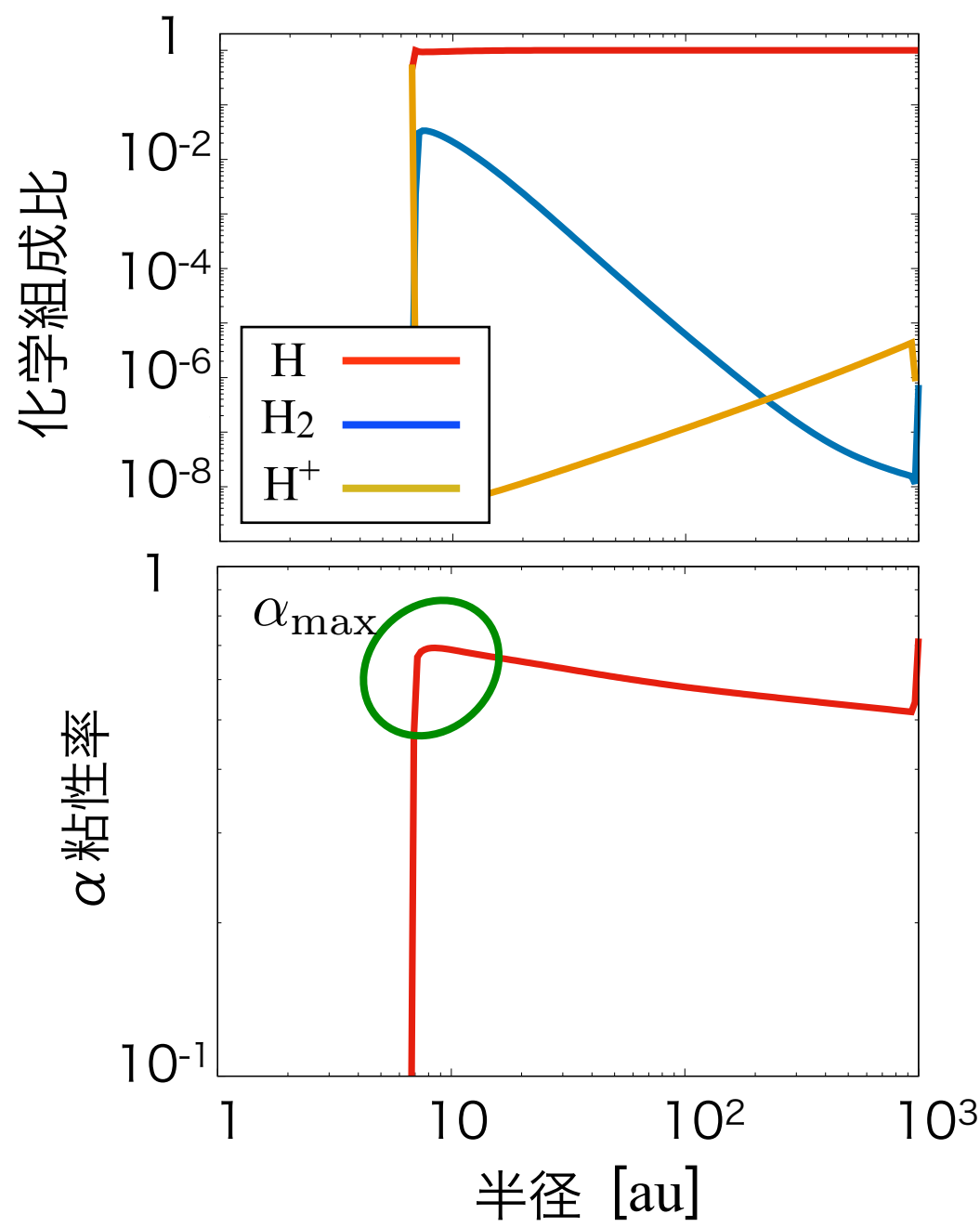
# 3.1 H 原子降着流

# 大降着率の場合

例：中心星質量  $10^2 M_{\text{SUN}}$ , 降着率  $10^{-1} M_{\text{SUN}} \text{ yr}^{-1}$



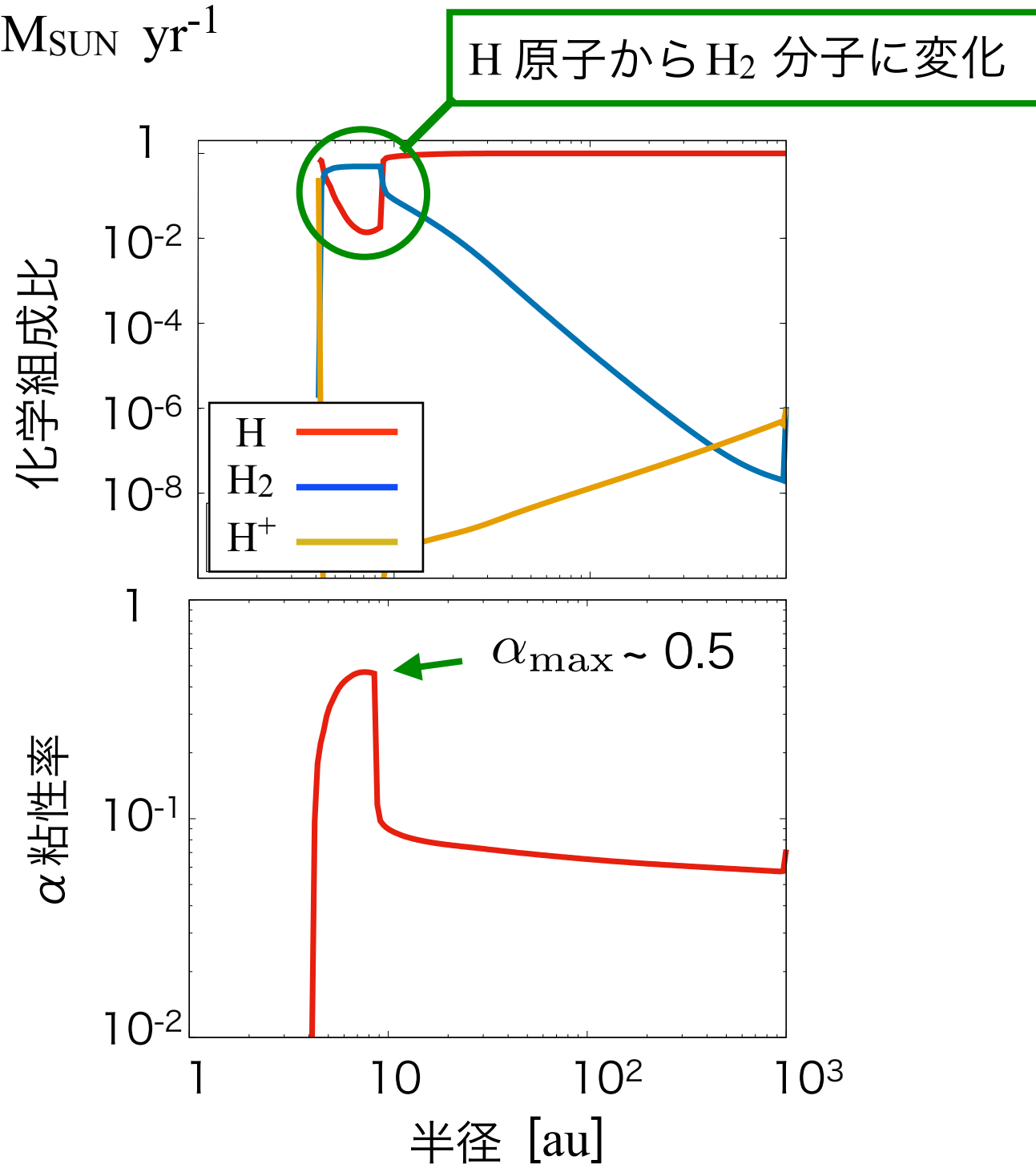
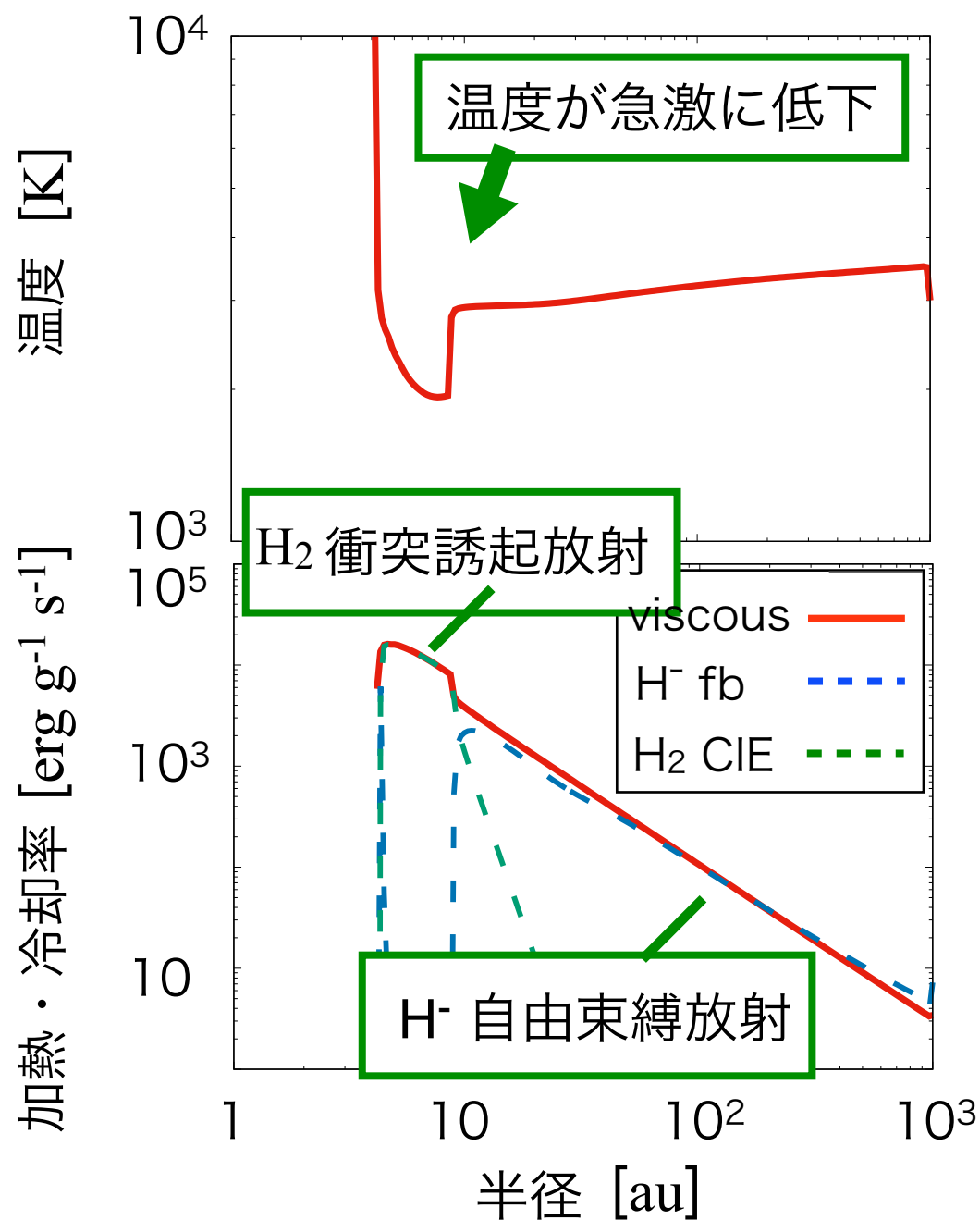
3500 Kで等温的に温度進化



粘性加熱 = H<sup>-</sup> 自由束縛放射

# 小降着率の場合

例：中心星質量  $10^2 M_{\text{SUN}}$ , 降着率  $10^{-2} M_{\text{SUN}} \text{ yr}^{-1}$

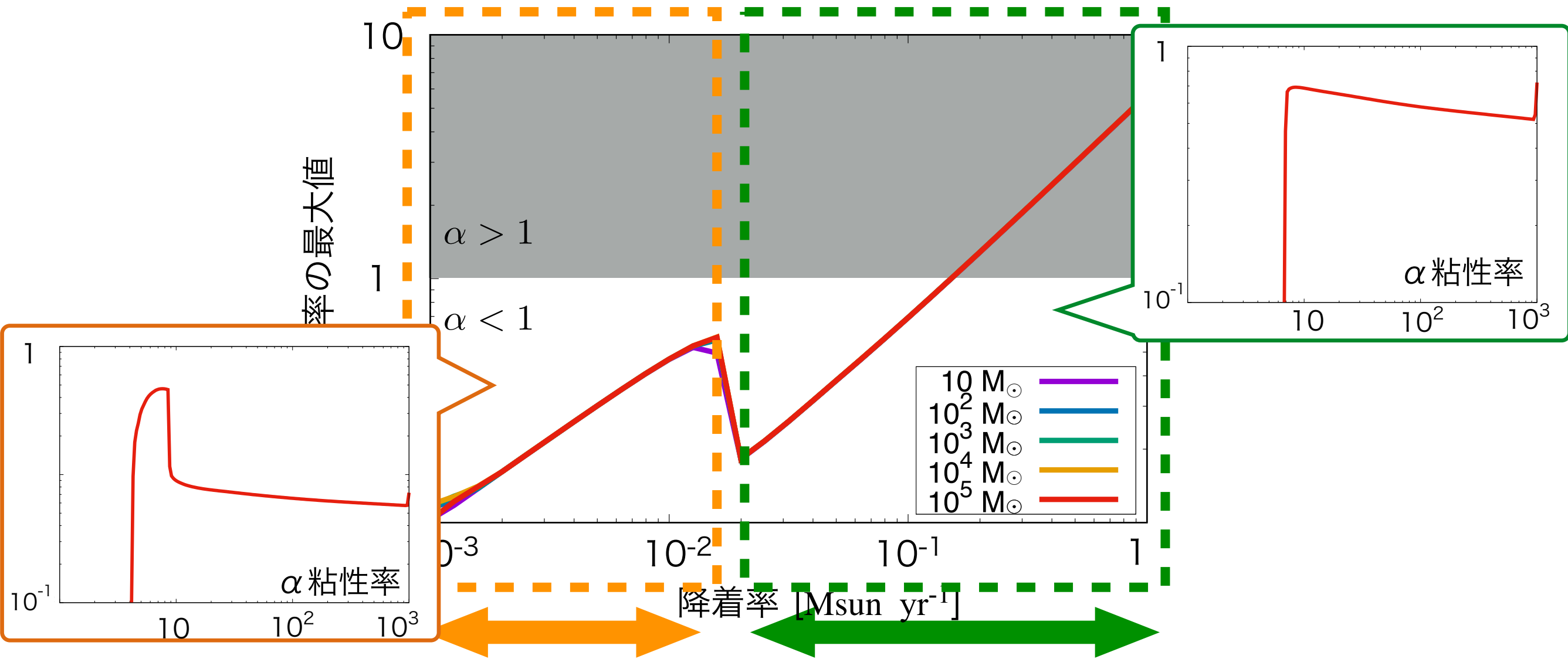


低降着率のとき内側で H<sub>2</sub> 分子降着流になる

先行研究で見られなかった傾向



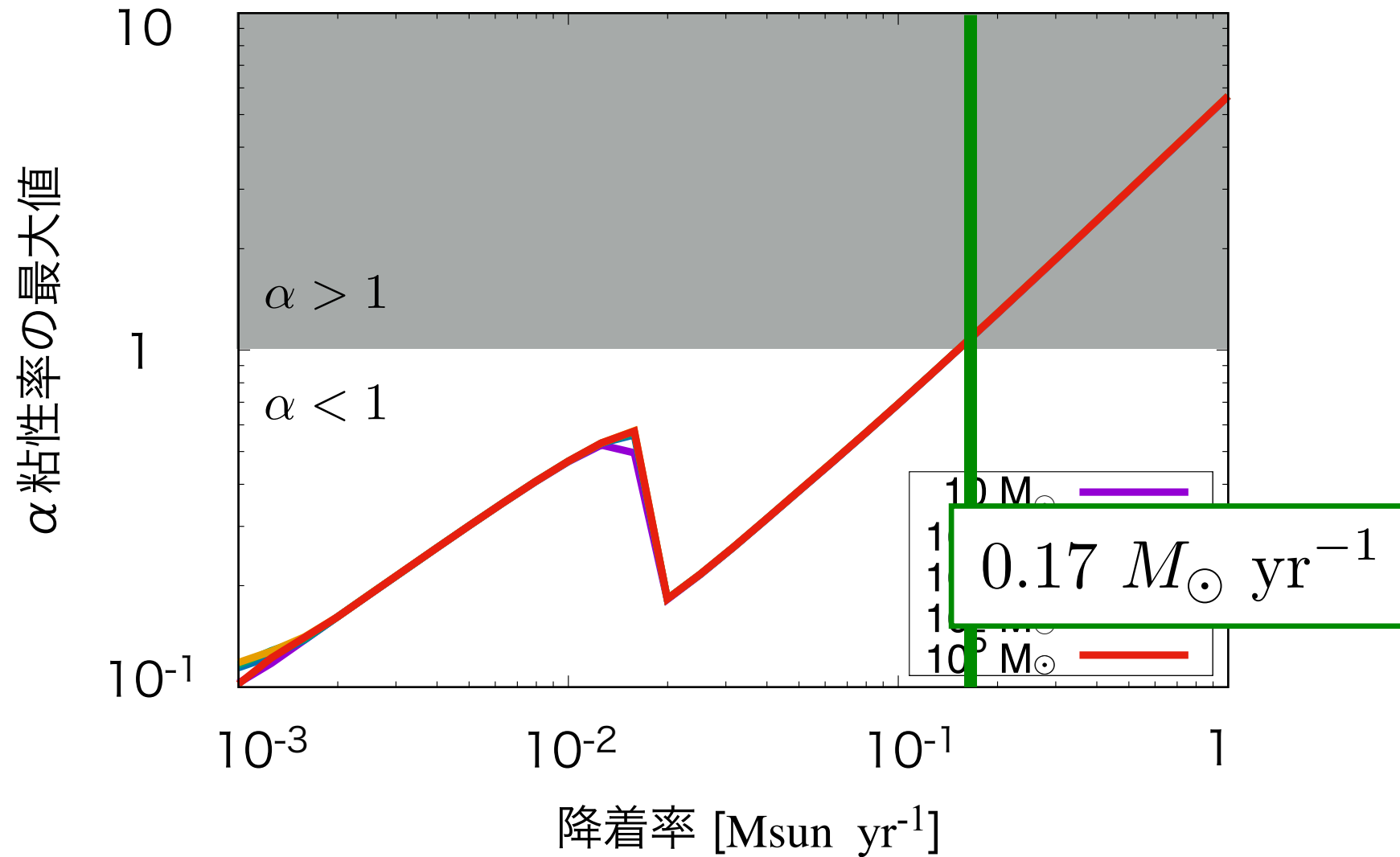
# $\alpha$ 粘性率の降着率依存性 (H原子降着流のとき)



2タイプの円盤構造が存在

中心星質量によらず  $\dot{M} > 0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  のとき自己重力不安定で分裂

# 円盤分裂の臨界降着率



$$\alpha = \frac{\nu \Omega}{c_s^2}, \nu = \frac{\dot{M}}{3\pi\Sigma}, Q = \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma} = 1 \quad \longrightarrow \quad \dot{M} = \frac{3}{G} c_s^3 \alpha$$

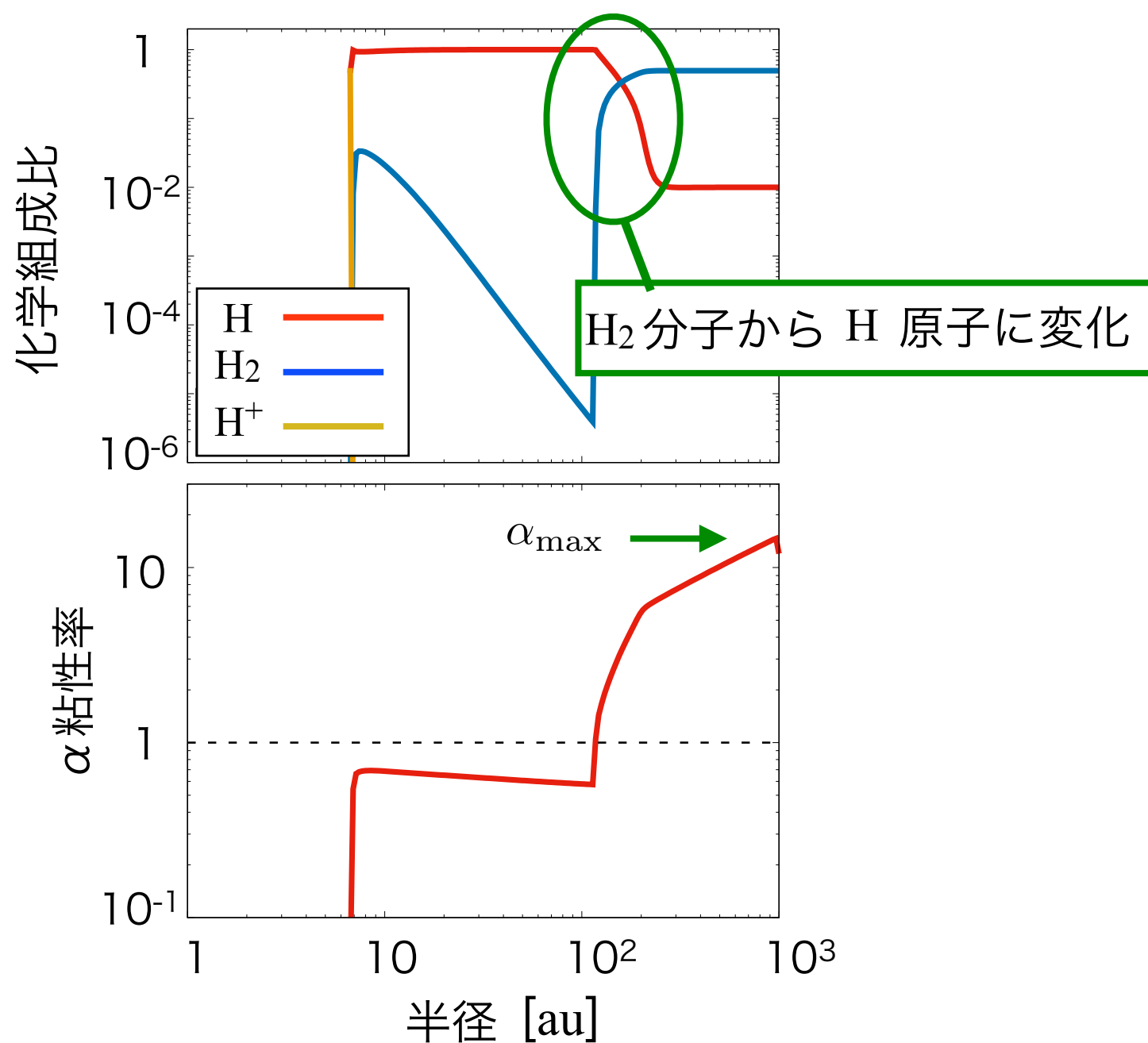
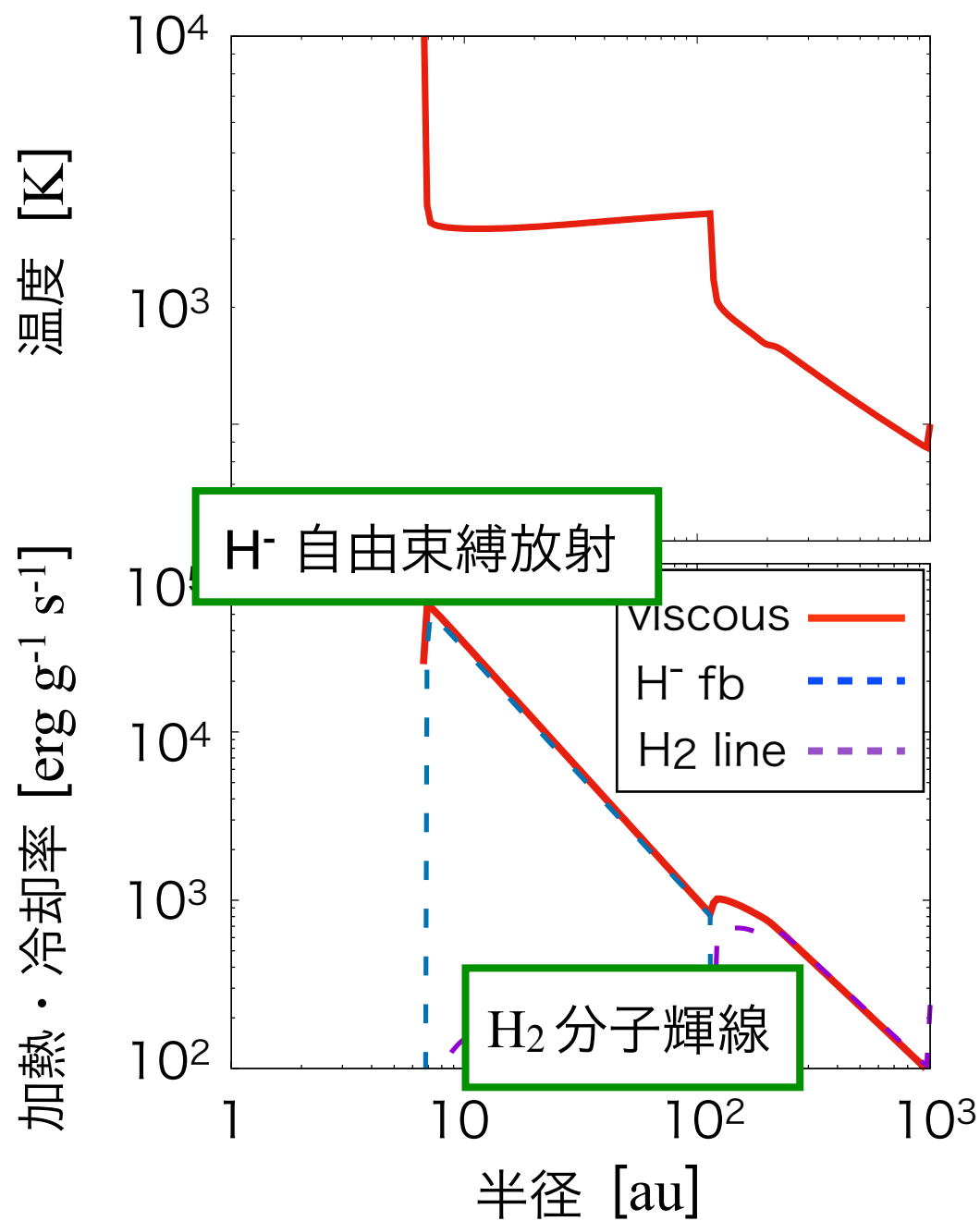
等温進化のとき、 $\alpha = 1$  となる臨界降着率  $\dot{M}_{\text{crit}}$  が存在

$$\dot{M}_{\text{crit}} = 0.17 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left( \frac{T}{3500 \text{ K}} \right)^{3/2}$$

## 3.2 H<sub>2</sub>分子降着流

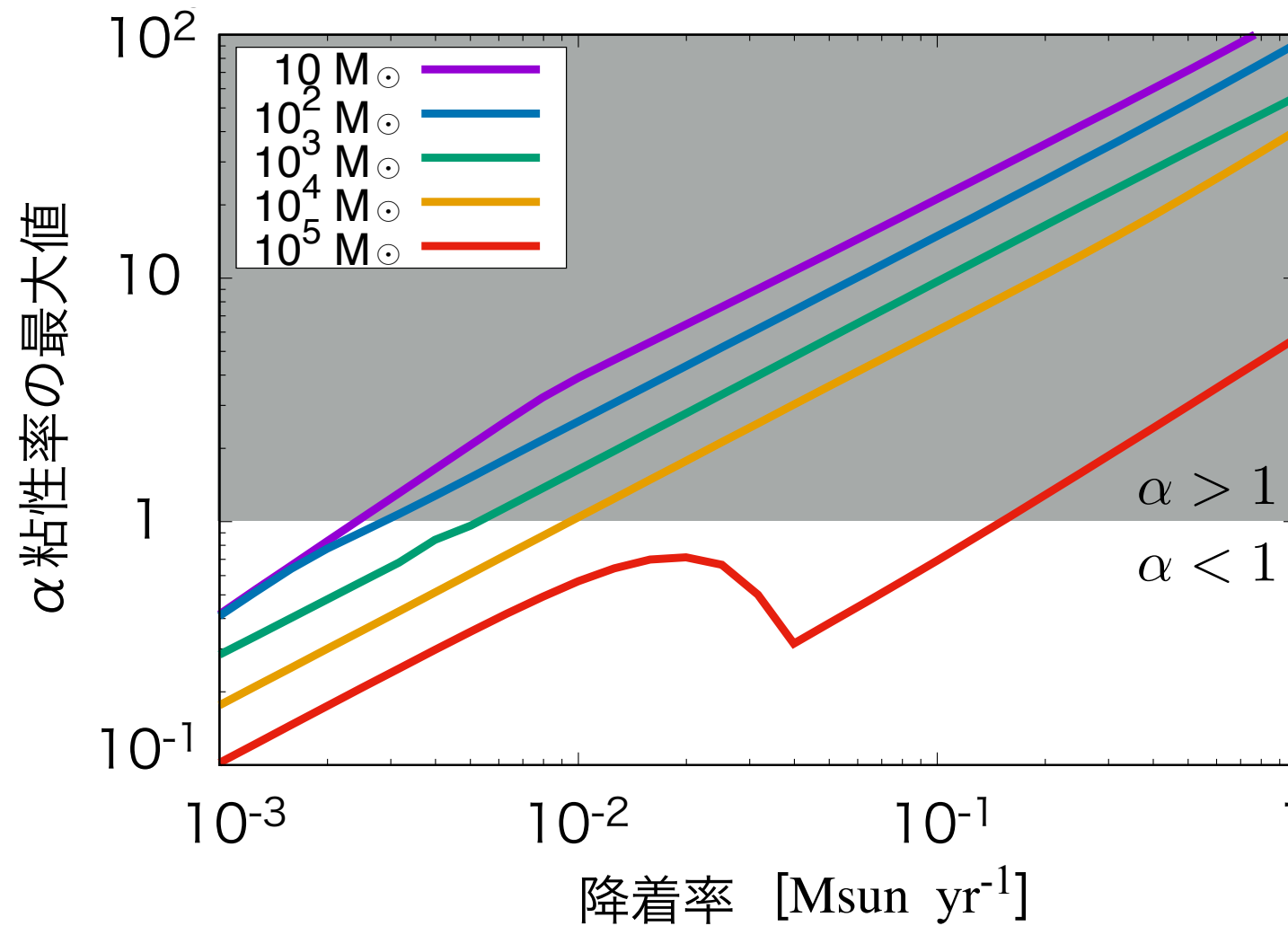
# H<sub>2</sub>分子降着流の円盤構造

例：中心星質量  $10^2 M_{\text{SUN}}$ , 降着率  $10^{-1} M_{\text{SUN}} \text{ yr}^{-1}$



円盤の外側で温度が極小  $\Rightarrow$   $\alpha$  粘性率が最大

# $\alpha$ 粘性率の降着率依存性 (H<sub>2</sub>分子降着流のとき)



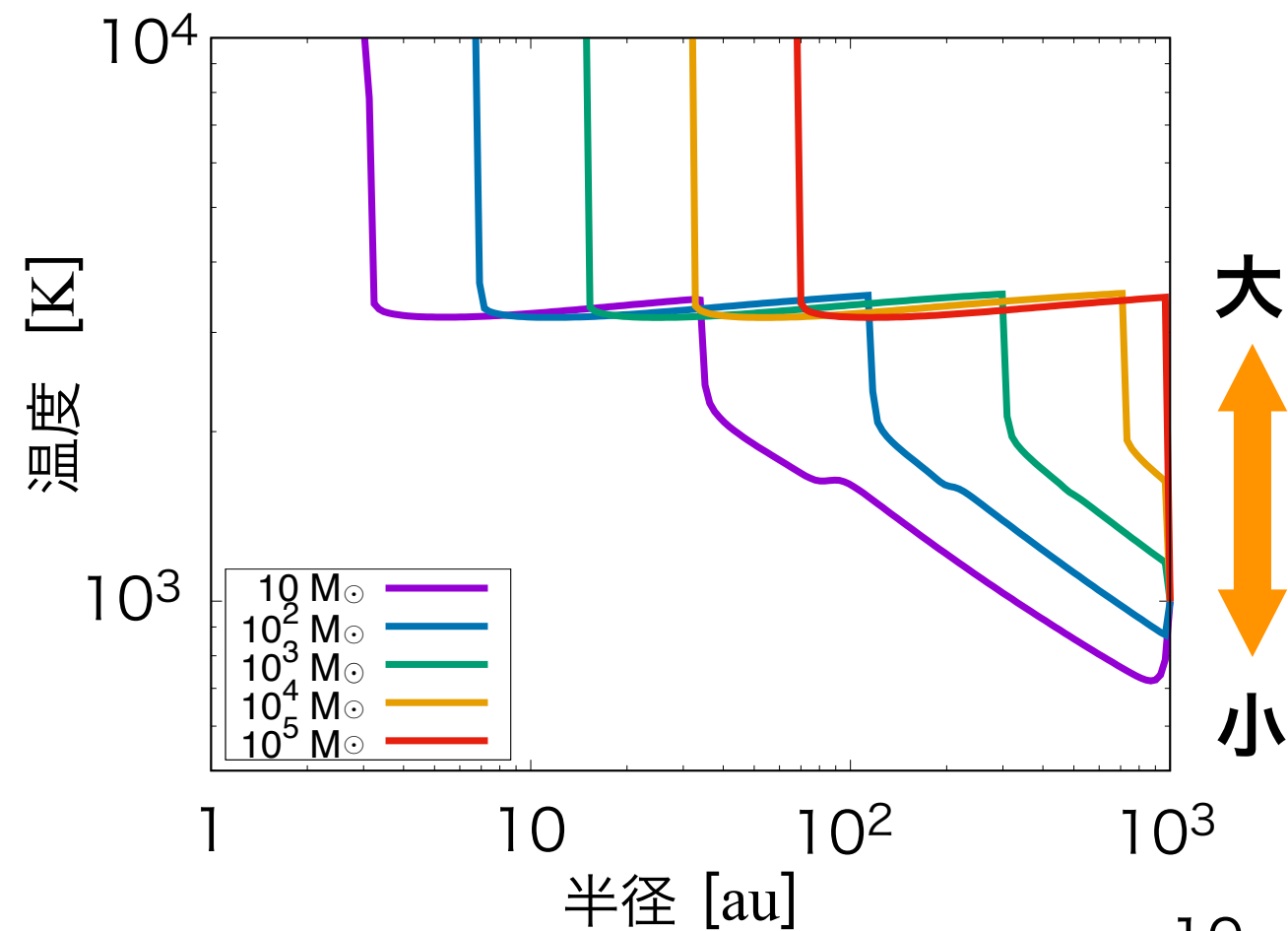
ほとんどのパラメータ領域で円盤は分裂

H 原子降着流のときより分裂しやすい

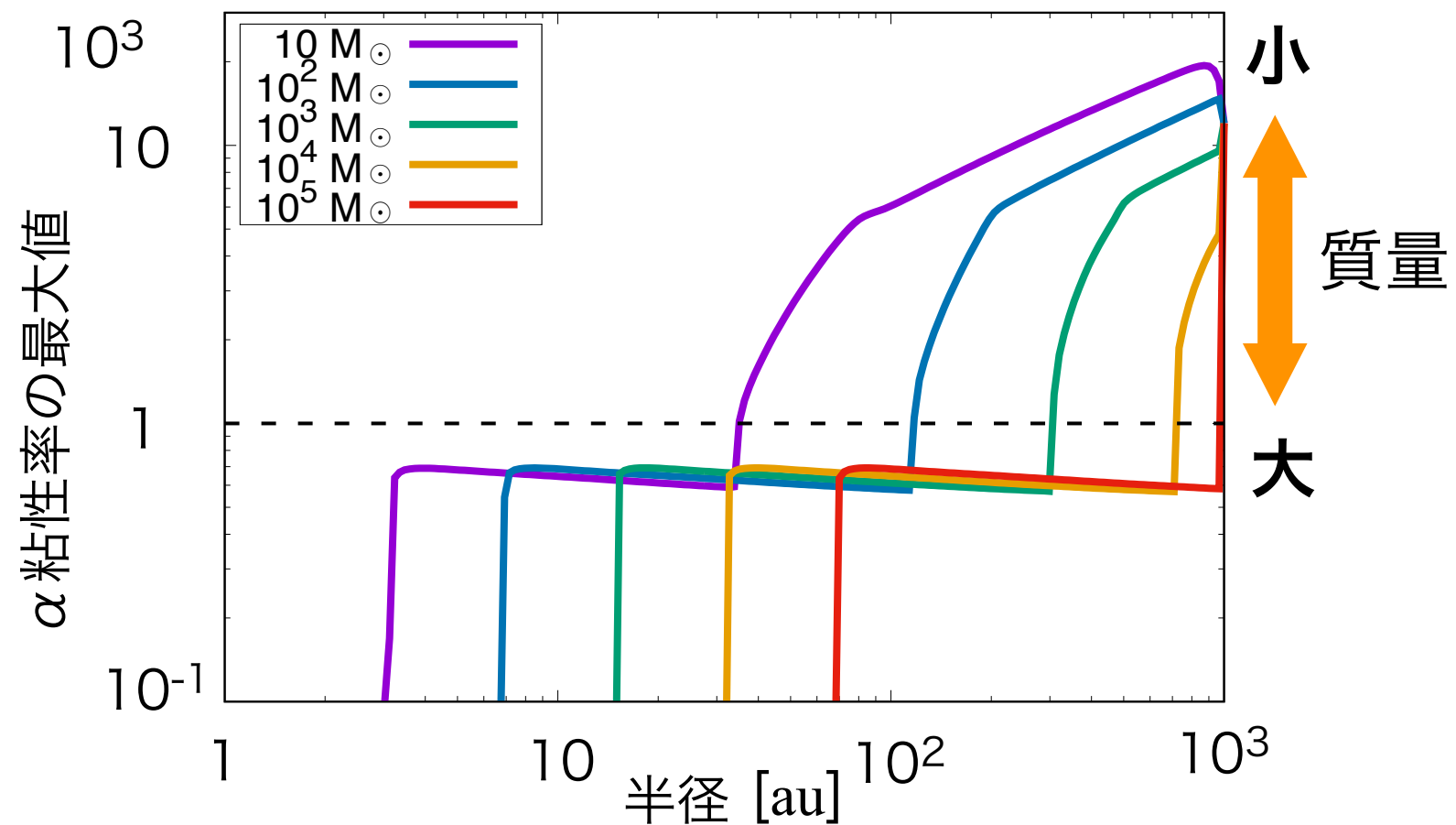
降着率への依存性は  $\alpha = \frac{G}{3c_s^3} \dot{M} \propto \dot{M}$

中心星が軽いほうが円盤分裂しやすい なぜ?

# 各質量における半径分布の比較



どの場合も円盤外縁で温度が極小  
⇒  $\alpha$  粘性率が最大  
中心星質量が小さいほど温度が低い



# 結果まとめ

## ✓ H 原子降着流のとき

- ・ 大降着率

等温的進化  $\Rightarrow$  **分裂の臨界降着率**  $0.17 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left( \frac{T}{3500 \text{ K}} \right)^{3/2}$

- ・ 小降着率

円盤内側で H<sub>2</sub> 分子が形成      先行研究で見られなかった

## ✓ H<sub>2</sub> 分子降着流のとき

ほとんどの場合で円盤分裂

中心星質量が小さいほど円盤分裂しやすい

# 4. まとめ、議論



# 円盤分裂による効果

H原子冷却ガス雲の典型的な降着率  $\sim 0.1 M_{\text{SUN}} \text{ yr}^{-1}$

円盤分裂の臨界降着率  $0.17 M_{\text{SUN}} \text{ yr}^{-1}$

⇒ 円盤分裂が起きる可能性が有る

分裂すると…

- ・ 分裂片の降着によって降着率が時間変動する

⇒ ~~定常的な降着~~

- ・ 分裂片が成長して連星系になる  
長時間の進化を追えば合体するかも

超大質量星形成の可能性を議論するには、

降着率の時間変動や分裂片の進化も追うような研究が必要

# まとめ

- ダイレクトコラプスシナリオで予言されている超大質量星形成の際の自己重力不安定な星周円盤における分裂の有無を調べた

- 結果

H 原子降着流の場合

円盤の自己重力不安定性は中心星質量によらず降着率に依存する

$< 0.1 M_{\text{SUN}} \text{ yr}^{-1}$      $\Rightarrow$     分裂を回避

$> 0.1 M_{\text{SUN}} \text{ yr}^{-1}$      $\Rightarrow$     分裂する

低降着率のとき ( $< 10^{-2} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$ ) 円盤内側で H<sub>2</sub> 分子形成

- 星周円盤は分裂するかもしれない
  - ✓ 降着率の時間変動
  - ✓ 分裂片の進化