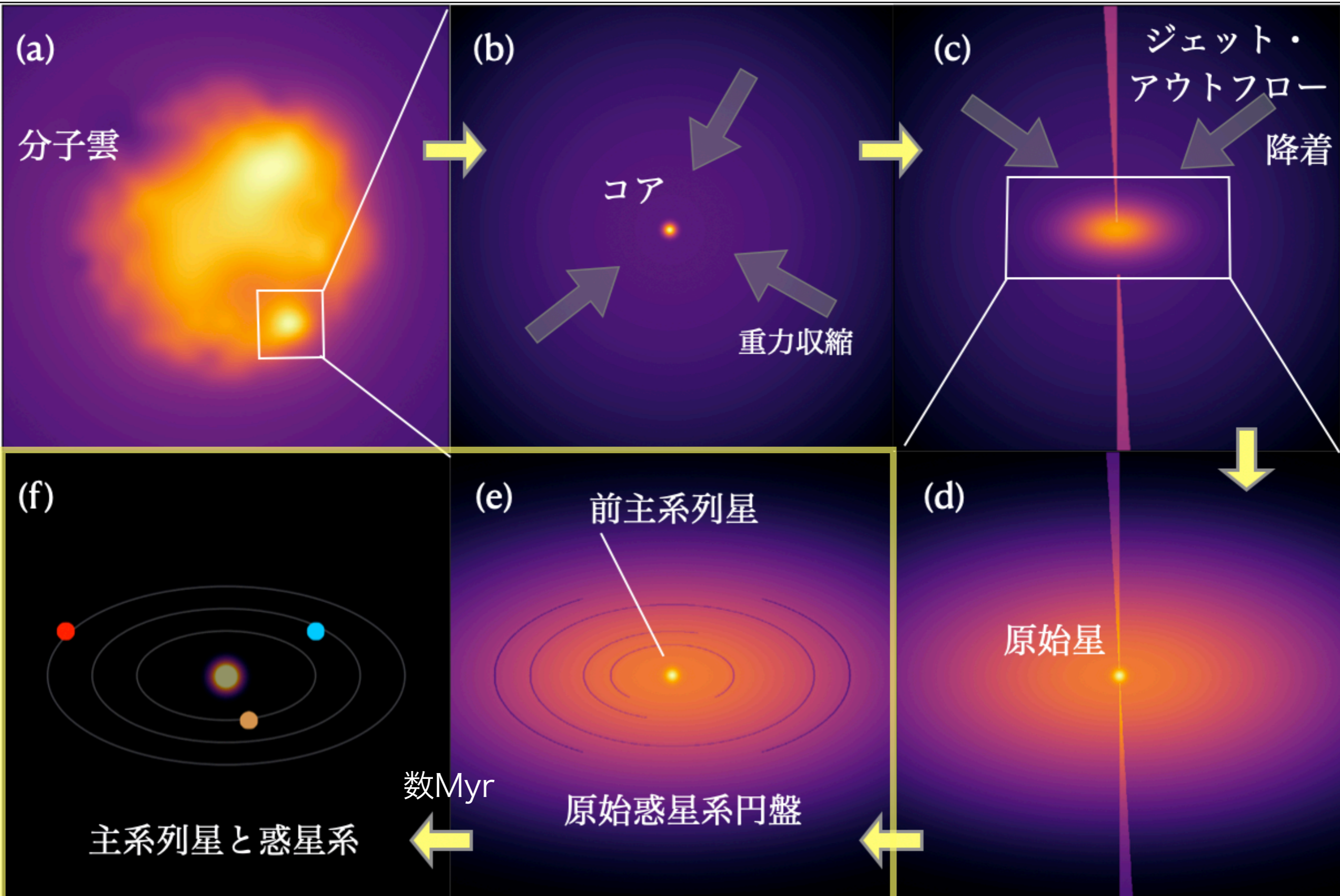


# 原始惑星系円盤光蒸発の輻射流体計算： ダストーガス質量比依存性

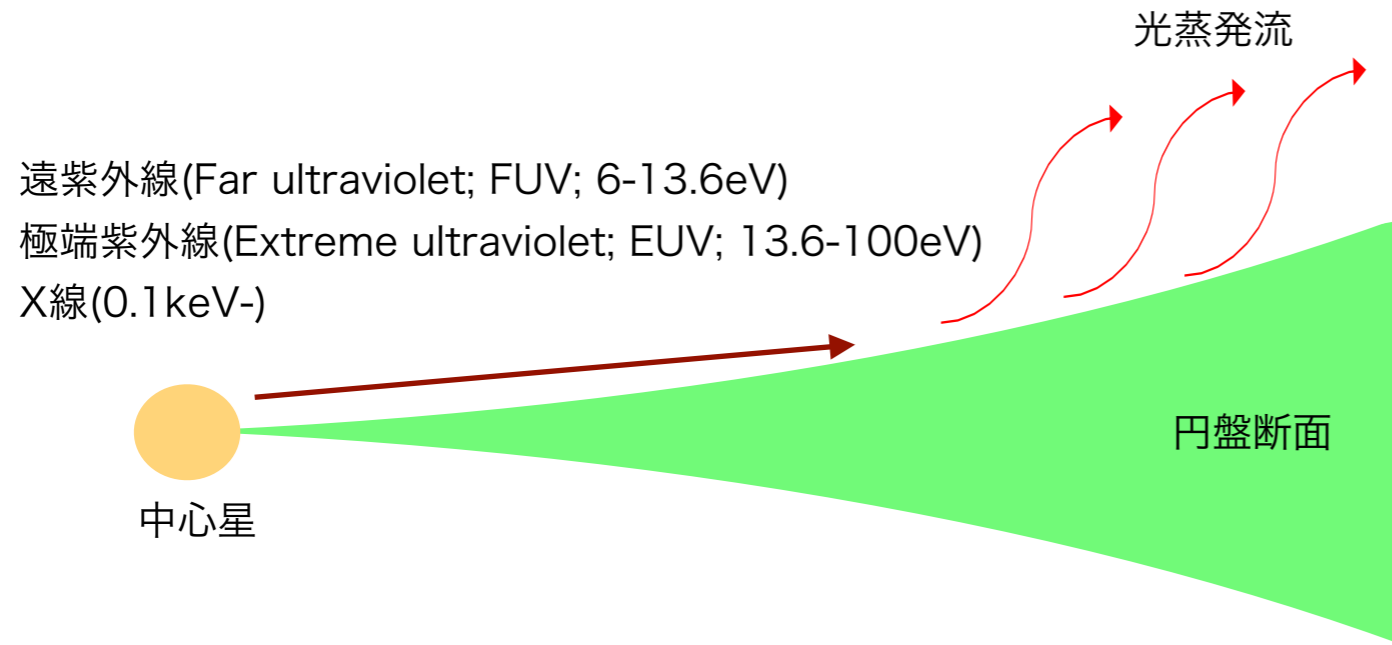
駒木彩乃(東京大学)

共同研究者：仲谷峻平(理研)、吉田直紀(東京大学)



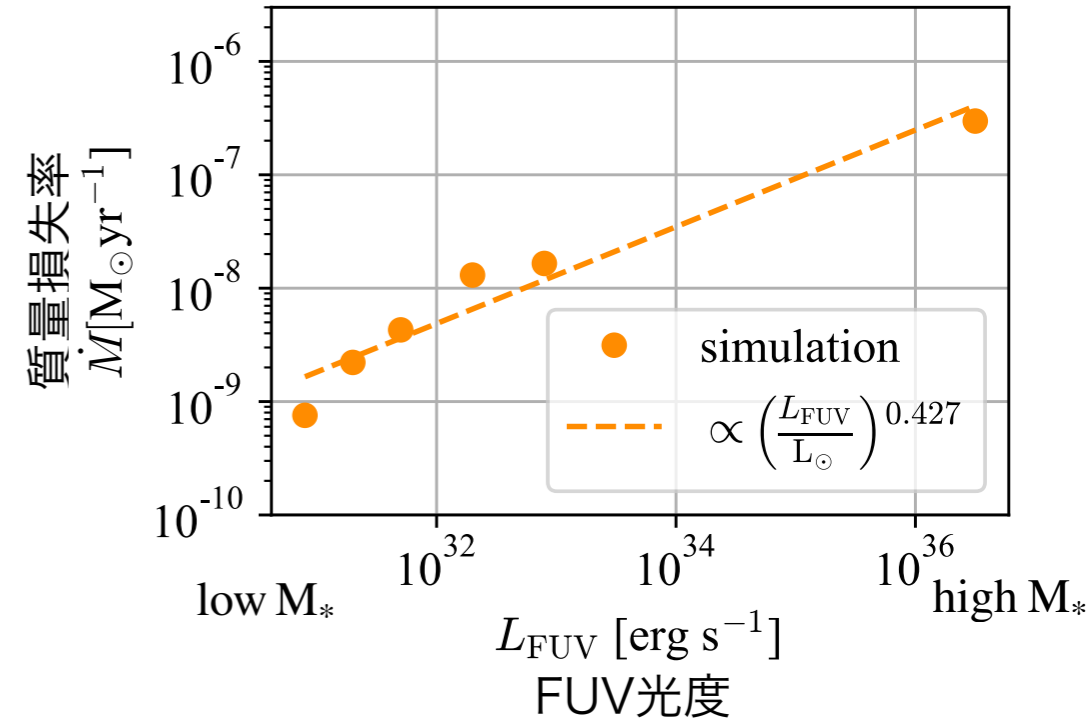
# 光蒸発…円盤消失過程の1つ

## 光蒸発の模式図



- 中心星放射が円盤表面のガスを加熱
- 加熱されたガスが中心星からのポテンシャルエネルギーを振り切って流出

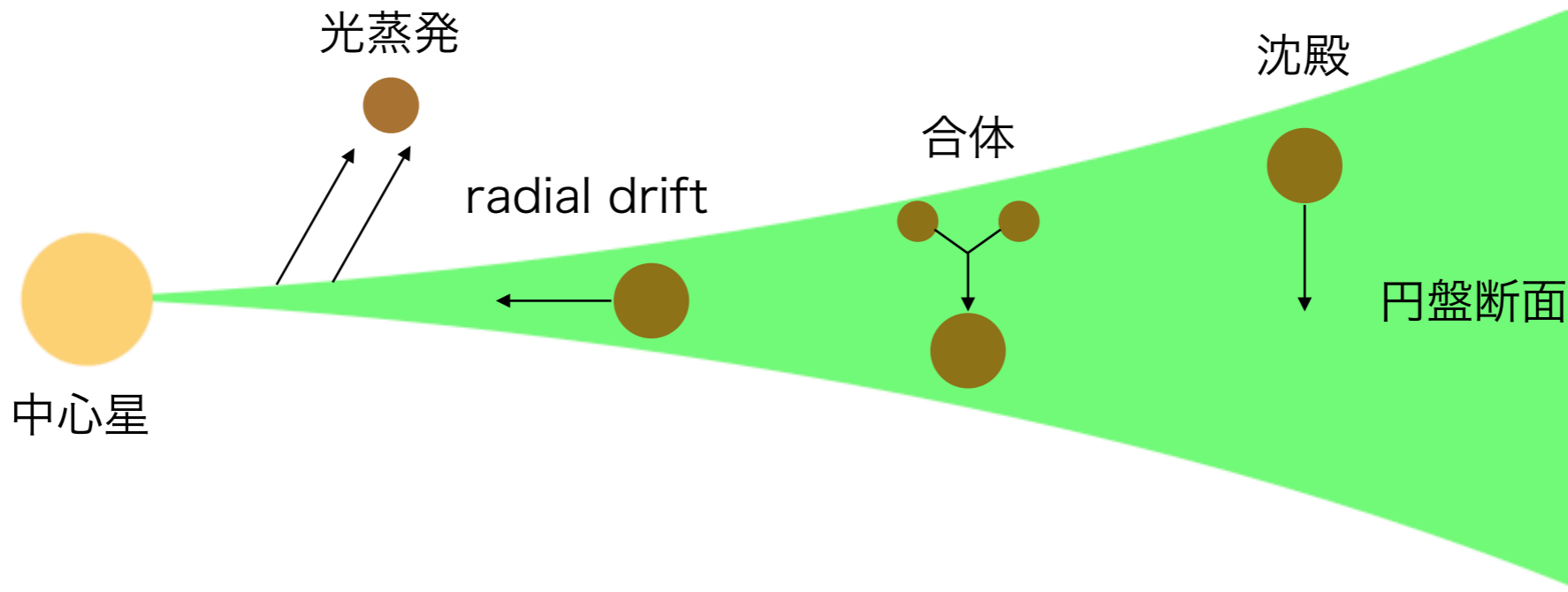
## FUVが主な加熱源



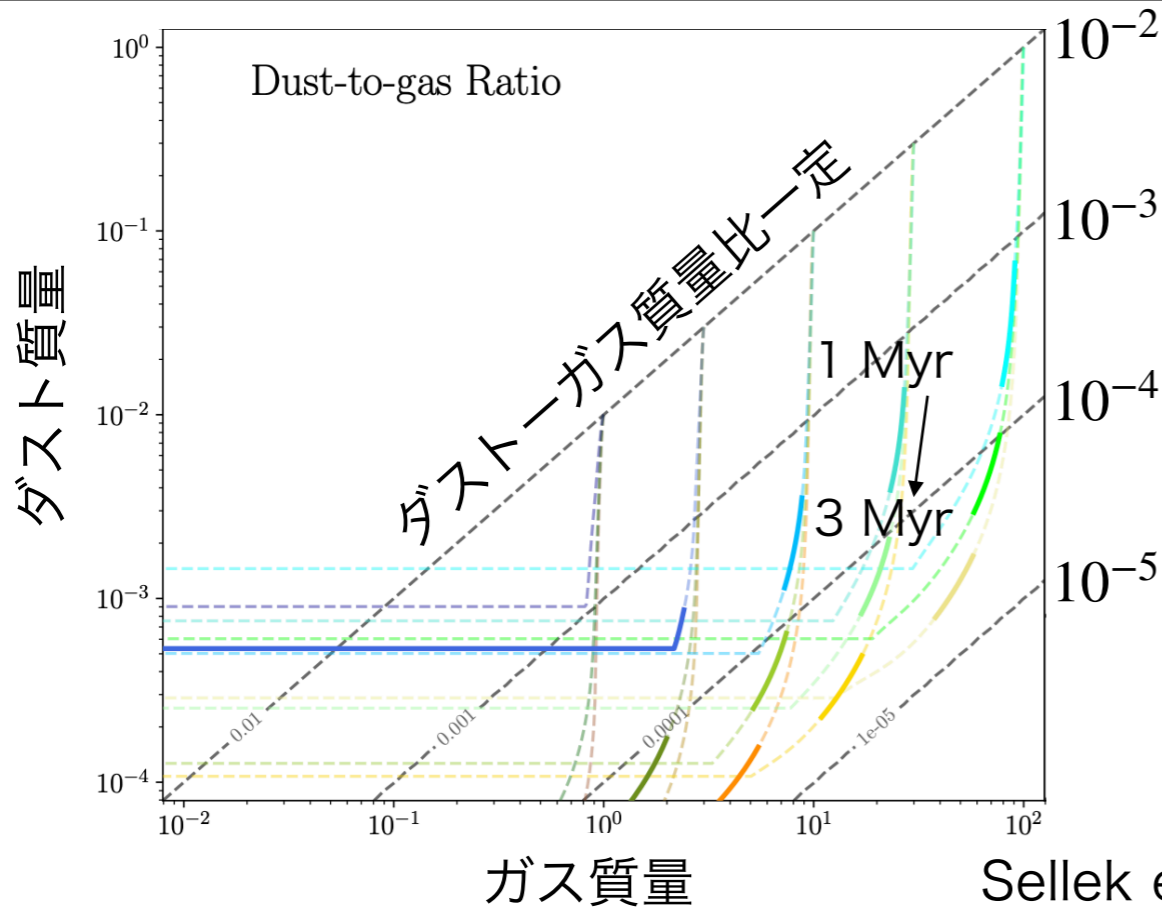
- FUVが主な加熱源となって円盤表面を加熱
- FUV光度の違いが光蒸発の中心星質量依存性に寄与

# 円盤進化とともにダストも進化

## 円盤内部でのダスト進化



## ダスト進化シミュレーション

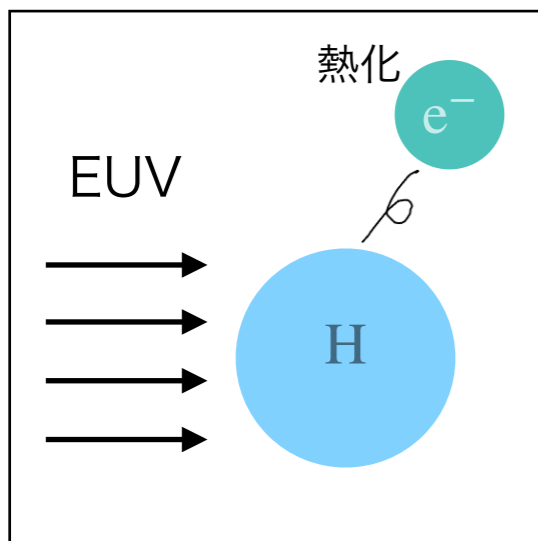


### 円盤初期質量、半径のパラメータ

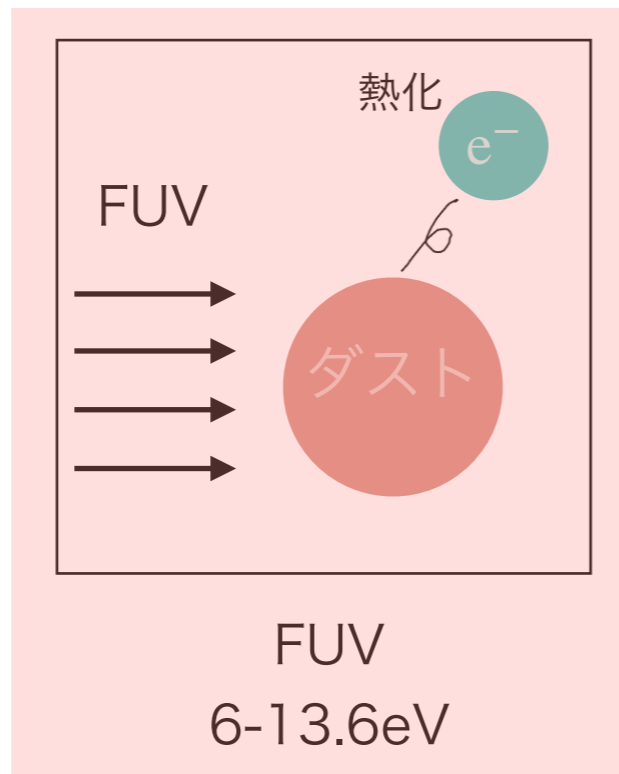
1 $M_J$ , 10 AU	1 $M_J$ , 30 AU	1 $M_J$ , 100 AU
3 $M_J$ , 10 AU	3 $M_J$ , 30 AU	3 $M_J$ , 100 AU
10 $M_J$ , 10 AU	10 $M_J$ , 30 AU	10 $M_J$ , 100 AU
30 $M_J$ , 10 AU	30 $M_J$ , 30 AU	30 $M_J$ , 100 AU
100 $M_J$ , 10 AU	100 $M_J$ , 30 AU	100 $M_J$ , 100 AU

- 数Myrにわたるダスト進化シミュレーション
- 円盤初期質量、半径をパラメータとして計算
- **円盤進化とともにダスト-ガス質量比が変化**

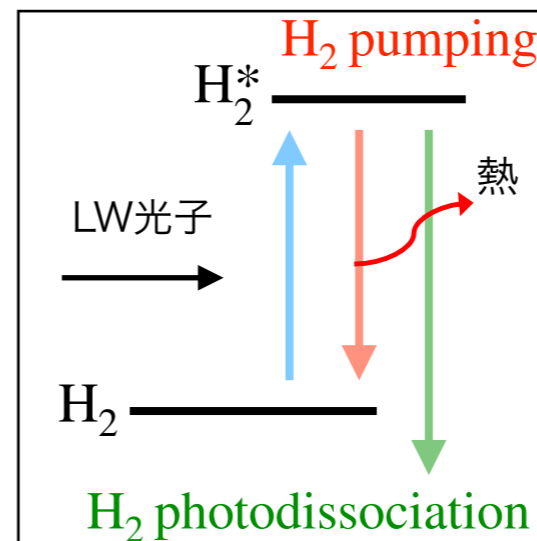
中心星放射による加熱過程



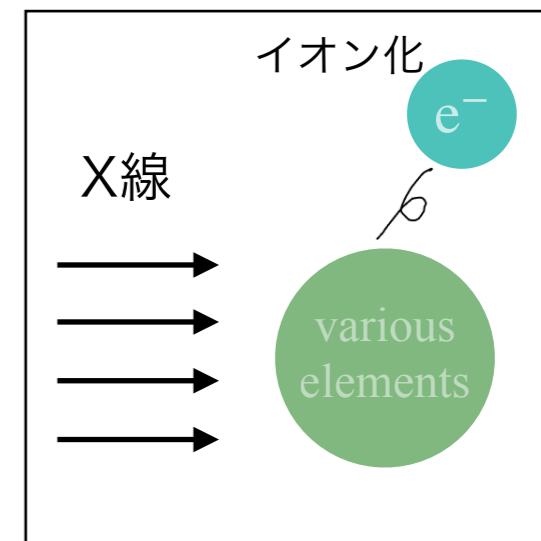
EUV  
13.6-100eV



FUV  
6-13.6eV



Lyman-Werner光子  
11.2-13.6eV



X線  
0.1keV-

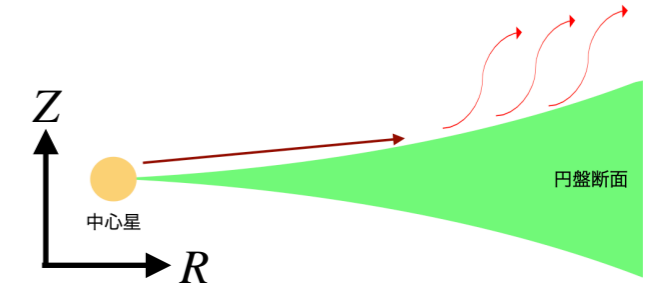
ダスト依存性

円盤進化とともに円盤内のダスト量が変化

- 円盤内のダスト量が変わることによって円盤加熱過程、さらには光蒸発による質量損失も影響を受ける可能性

円盤の物理・化学構造を明らかにするために以下を同時に解いた

- 流体力学(PLUTO; Mignone+07)
- 輻射輸送(Kuiper+10; Kuiper & Klessen+13; Nakatani+18a,b)
- 非平衡熱化学(Nakatani+18a,b, Nakatani+21)



### パラメータ設定

- 中心星質量： $M_* = 1 M_\odot$
- 円盤質量： $M_{\text{disk}} = 0.03 M_*$
- 円盤半径： $0.1 r_g < r < 20 r_g$

(~1 Myr system)

- ☑ 重力半径：ガスの持つ運動エネルギーとポテンシャルエネルギーが釣り合う点

$$r_g = \left( \frac{GM_*}{c_s^2} \right) = 8.9 \left( \frac{M_*}{M_\odot} \right) \left( \frac{c_s}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \text{ au}$$

- 中心星光度、降着率：Gorti & Hollenbach(2009)
- ダストーガス質量比： $\mathcal{D} = 10^{-1} - 10^{-8}$

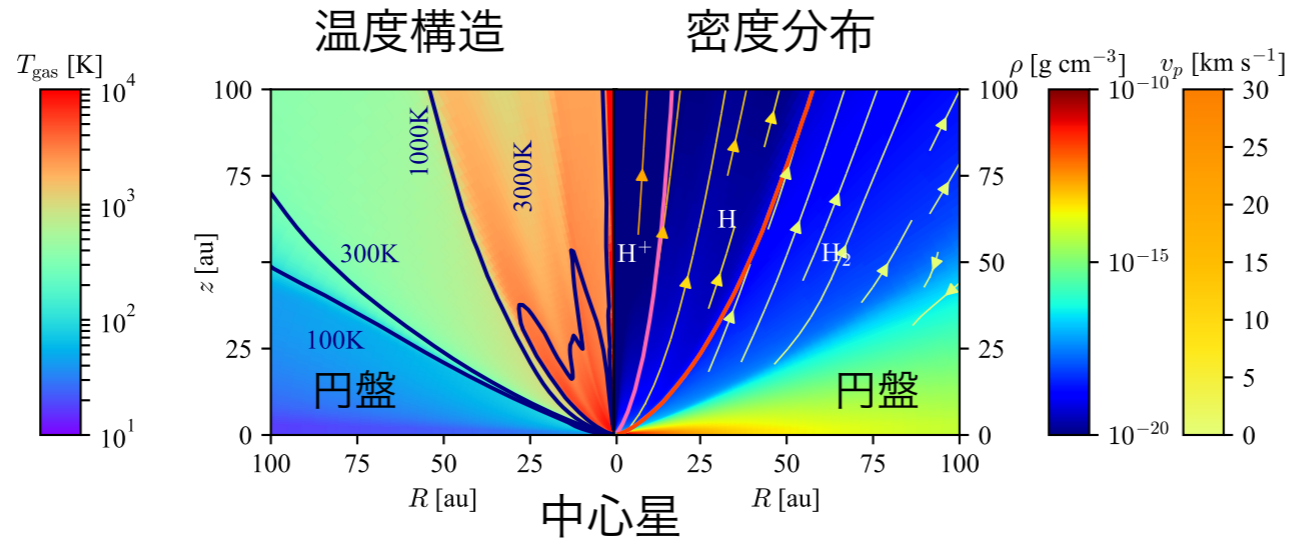
FUV X-ray EUV

$M_*$ ( $M_\odot$ )	$R_*$ ( $R_\odot$ )	$T_{\text{eff}}$ (K)	$L_{\text{bol}}$ ( $L_\odot$ )	$\dot{M}_{\text{acc}}$ ( $M_\odot \text{ yr}^{-1}$ )	Log $L_{\text{FUV}}$ ( $\text{erg s}^{-1}$ )	Log $L_X$ ( $\text{erg}^{-1}$ )	Log $\phi_{\text{EUV}}$ ( $\text{s}^{-1}$ )
0.3	2.3	3360	0.55	2.7 (-9)	30.3	29.6	39.9
0.5	2.12	3771	0.93	7.5 (-9)	30.9	29.8	40.1
0.7	2.54	4024	1.72	1.5 (-8)	31.3	30.2	40.5
1.0	2.61	4278	2.34	3.0 (-8)	31.7	30.4	40.7
1.7	3.30	4615	5.00	8.7 (-8)	32.3	30.7	41.0
3.0	4.83	5004	14.85	2.7 (-7)	32.9	28.7	39.0
7.0	3.22	20527	1687	1.5 (-6)	36.5	30.8	44.1

中心星光度

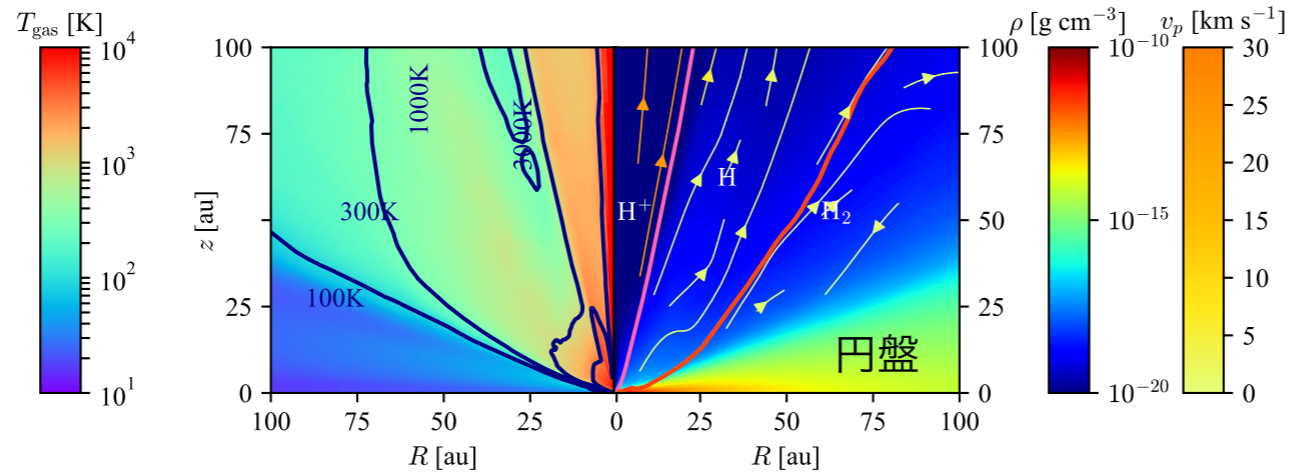
# シミュレーション結果

•  $\mathcal{D} = 10^{-2}$   
(fiducial)



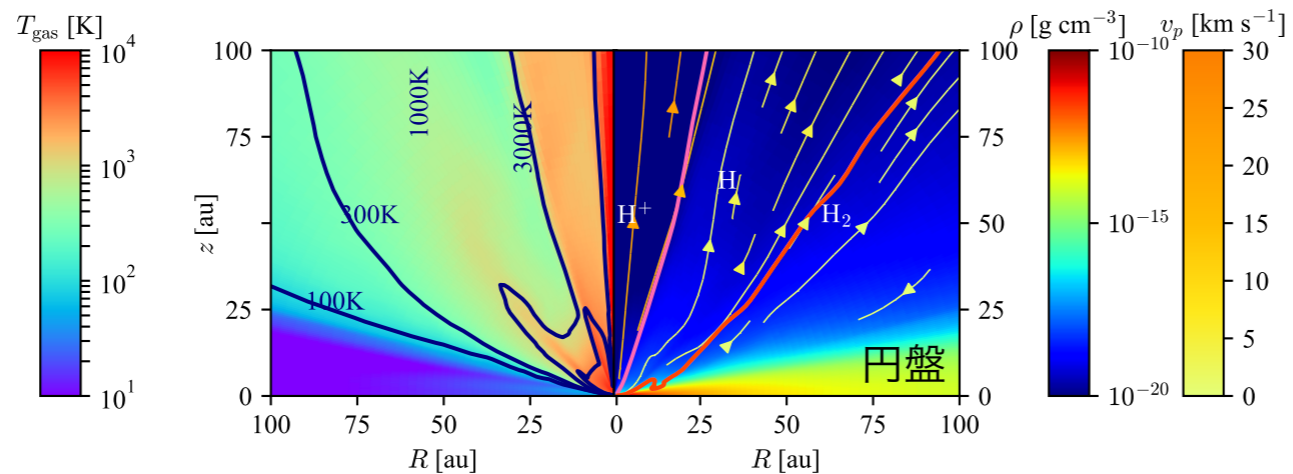
- ダスト量多くFUV光電加熱が効果的に円盤表面を加熱
- スケールハイト高い

•  $\mathcal{D} = 10^{-4}$



- 円盤表面から光蒸発流が出ている

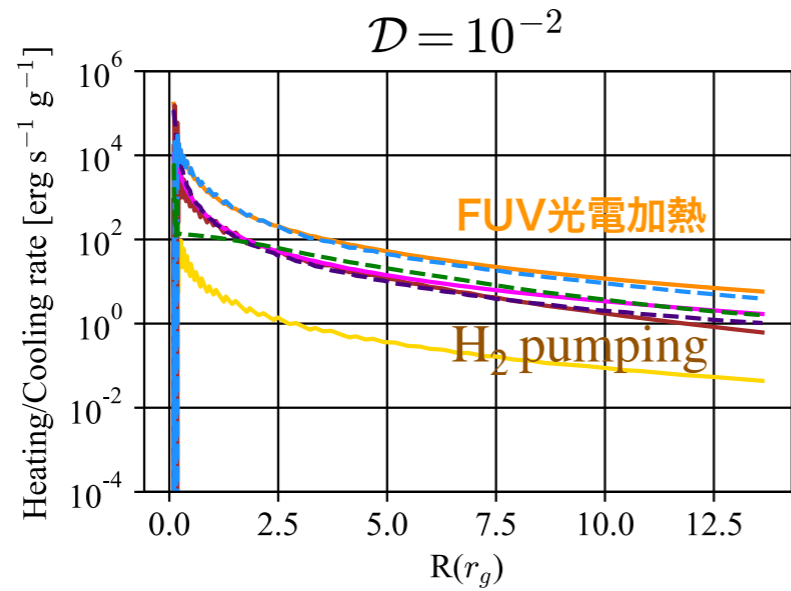
•  $\mathcal{D} = 10^{-6}$



- ダスト量が少なくFUV光電加熱が効いていない
- スケールハイト低い

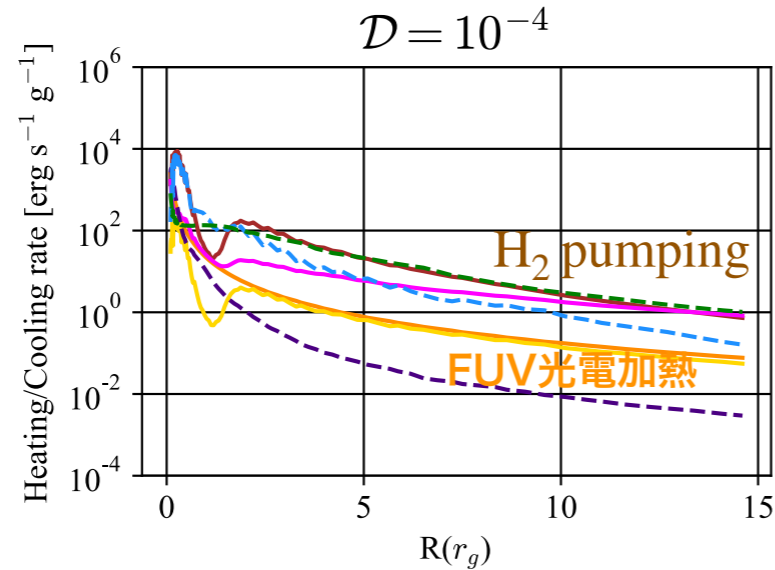
# 円盤表面での加熱率・冷却率

•  $\mathcal{D} = 10^{-2}$   
(fiducial)



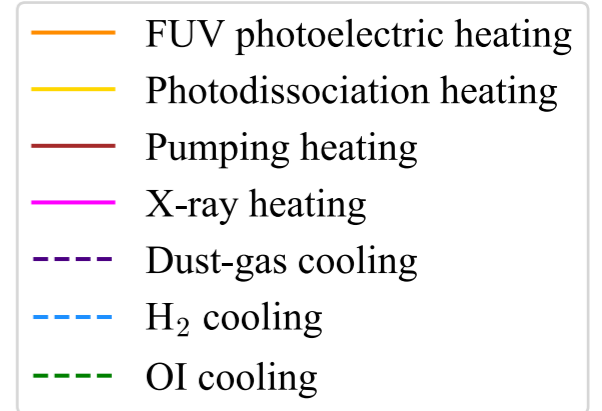
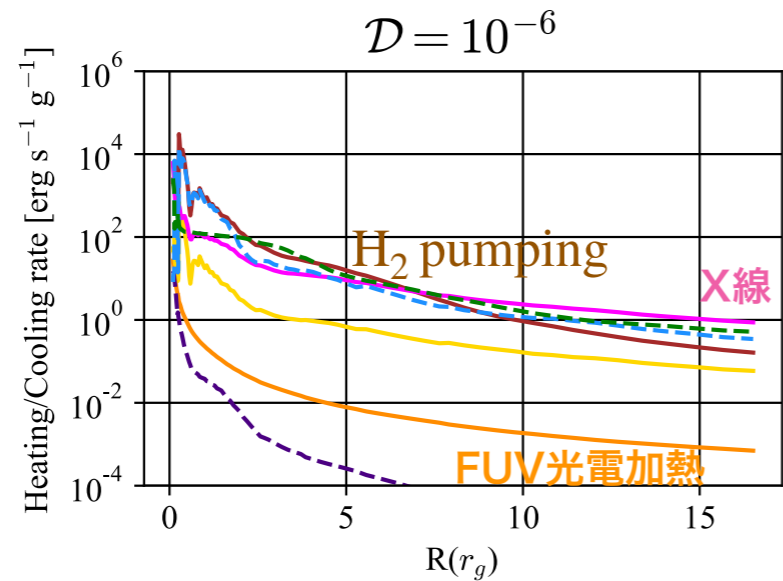
FUV光電加熱

•  $\mathcal{D} = 10^{-4}$



H<sub>2</sub> pumping

•  $\mathcal{D} = 10^{-6}$



•  $\mathcal{D} \geq 10^{-3}$ ではFUV光電加熱が主な加熱源

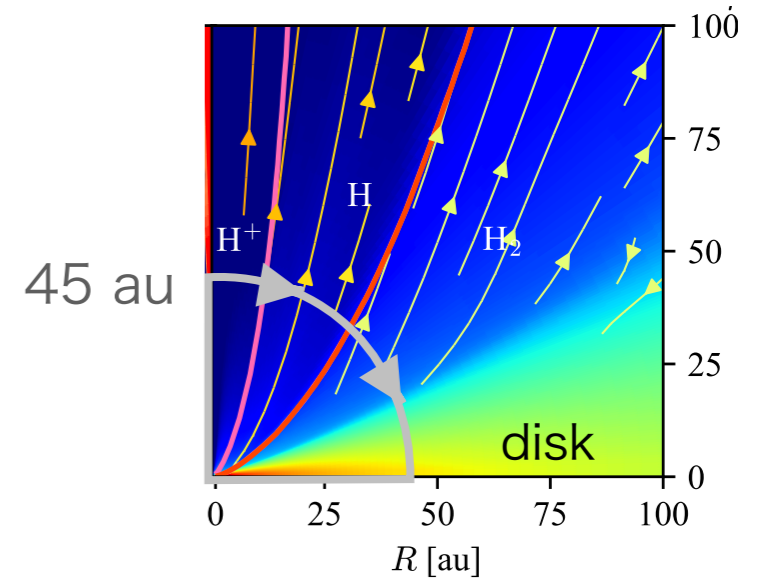
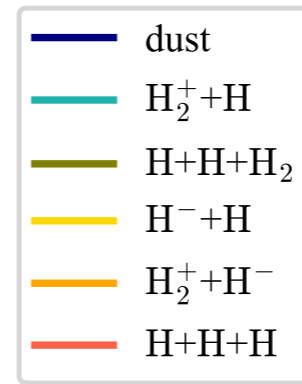
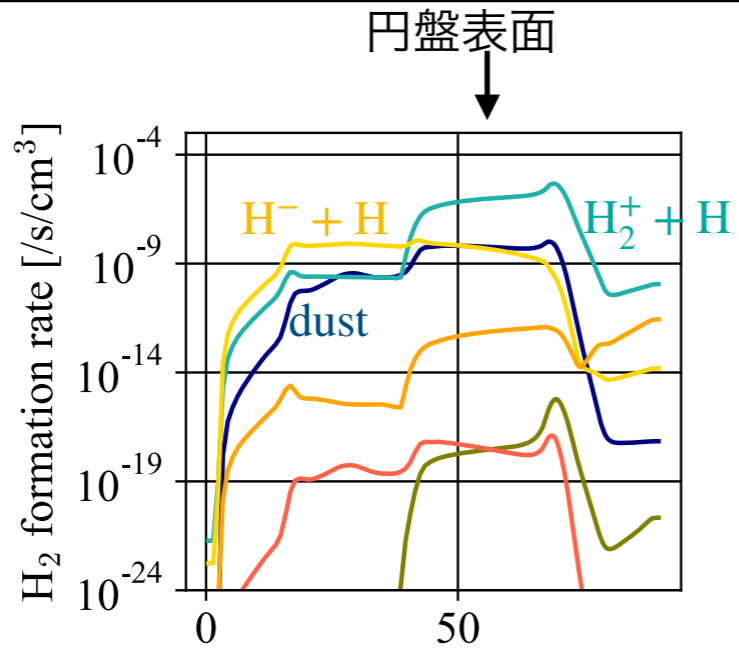
•  $\mathcal{D} \leq 10^{-3}$ ではH<sub>2</sub> pumpingが主な加熱源

→ダスト量が変わると $\mathcal{D} = 10^{-3}$ を境に円盤加熱過程が変わる

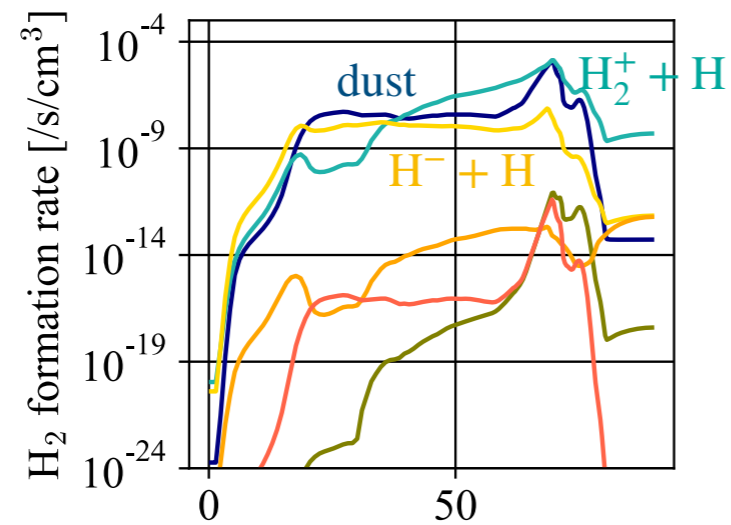


# H<sub>2</sub>生成反応の係数

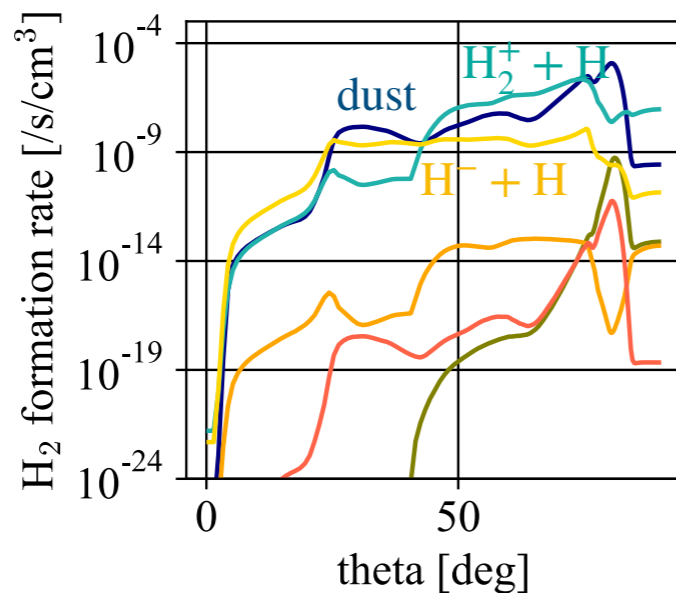
•  $\mathcal{D} = 10^{-2}$   
(fiducial)



•  $\mathcal{D} = 10^{-4}$



•  $\mathcal{D} = 10^{-6}$



• H<sub>2</sub><sup>+</sup> + Hの衝突反応が円盤表面での  
H<sub>2</sub>生成反応

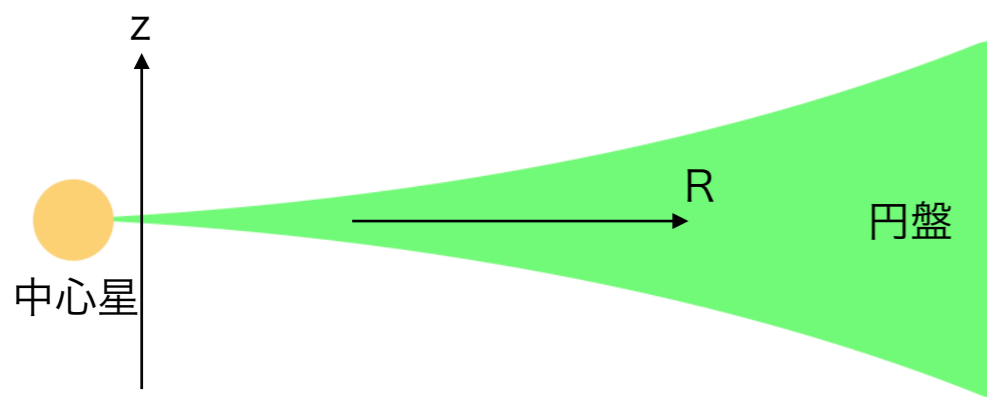
→H<sub>2</sub>アバンダンスはダスト量に依存して  
いない

→H<sub>2</sub> pumpingは更にダスト量が少ない場  
合やprimordial diskを加熱し質量損失  
に寄与していると示唆

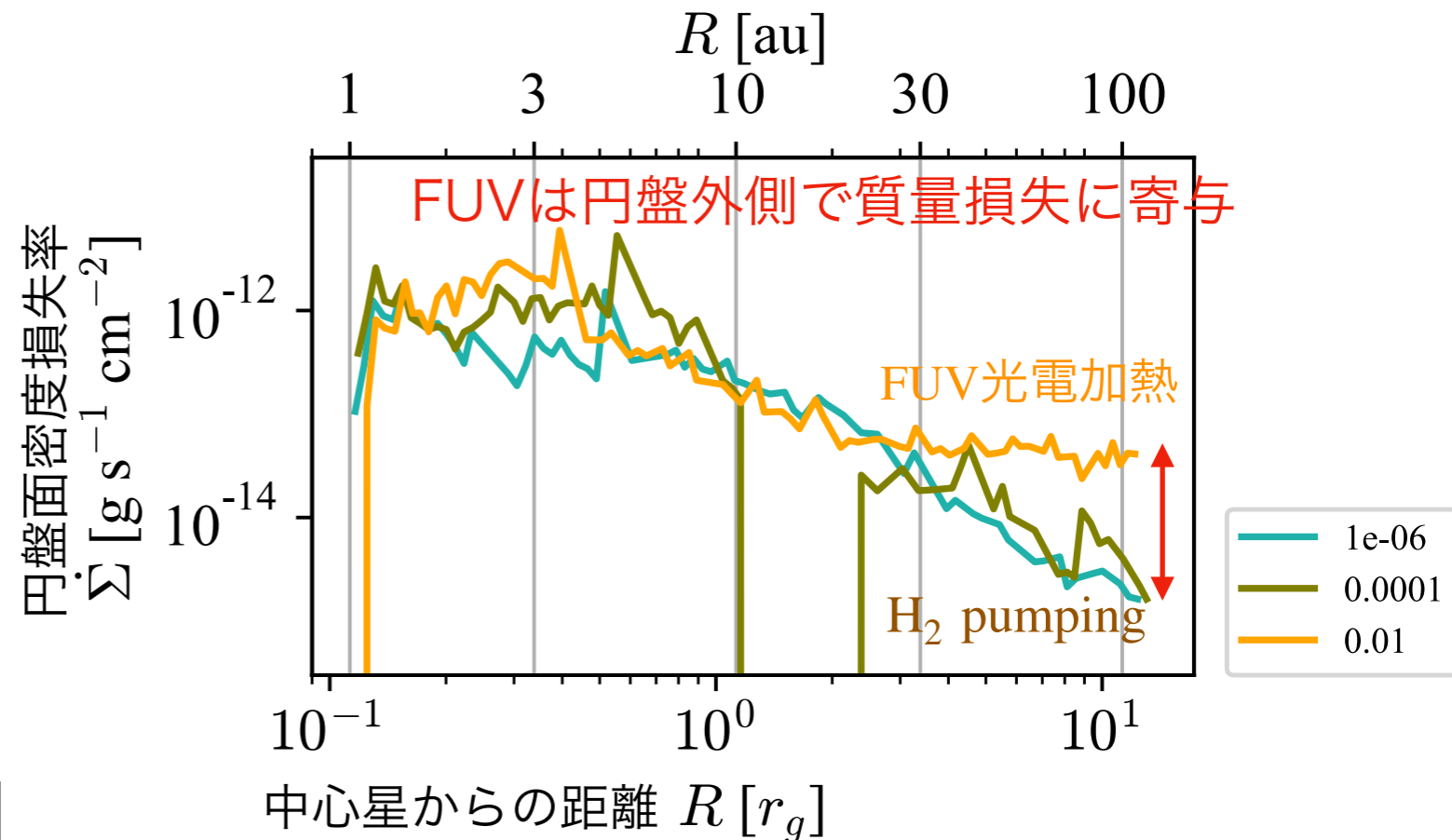
# ダスト量による円盤面密度損失率への影響

## 円盤面密度損失率とは

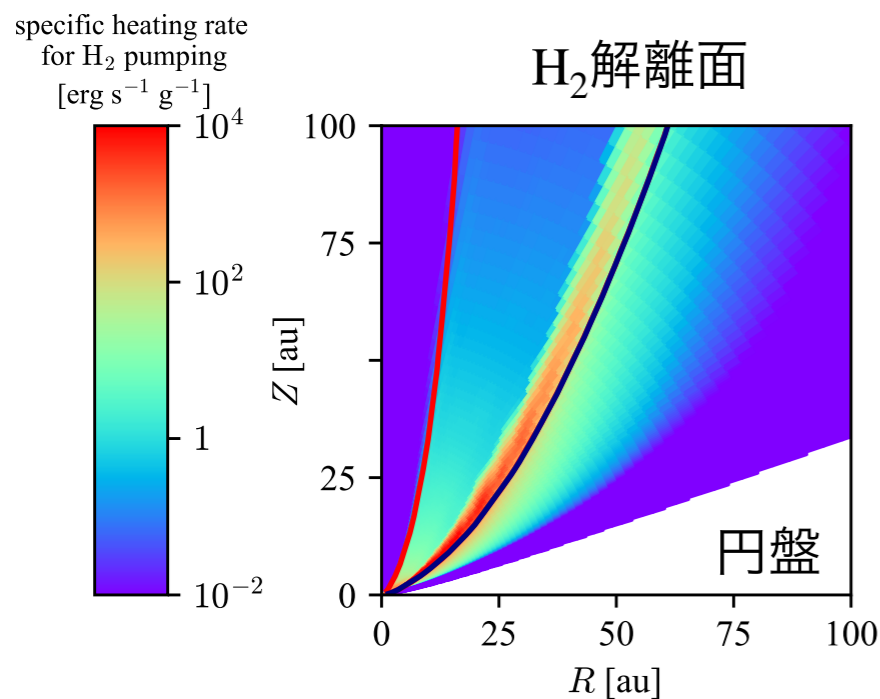
$$\text{面密度とは } \Sigma(R) = \int \rho(R, z) dz$$



## それぞれの円盤面密度損失率



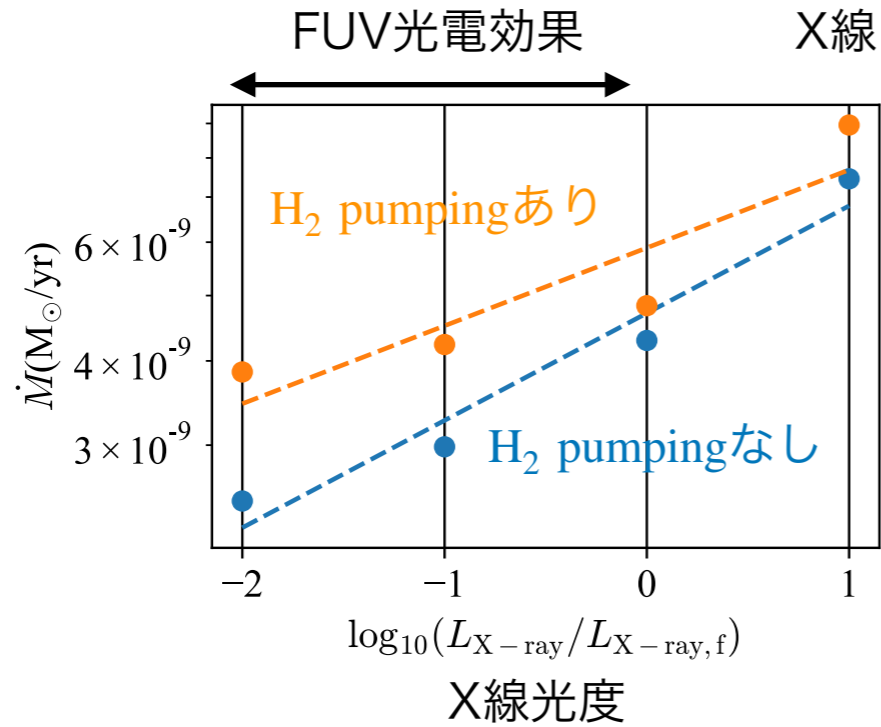
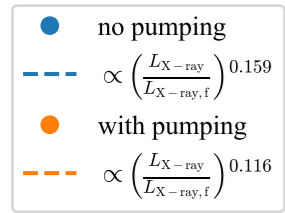
## H<sub>2</sub> pumping加熱率分布



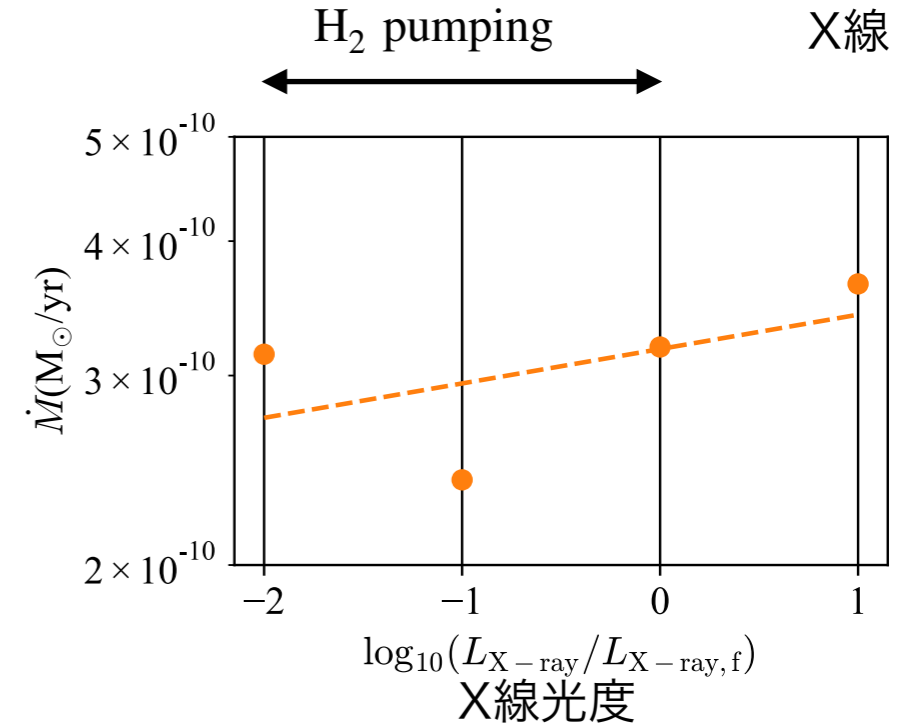
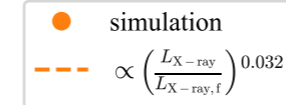
- FUV光電加熱はouter diskでより効果的
- $\Sigma$ とともに円盤面密度損失率も変化
- **円盤進化によってダスト量が変わると質量損失過程も影響を受ける**

# X線光度依存性

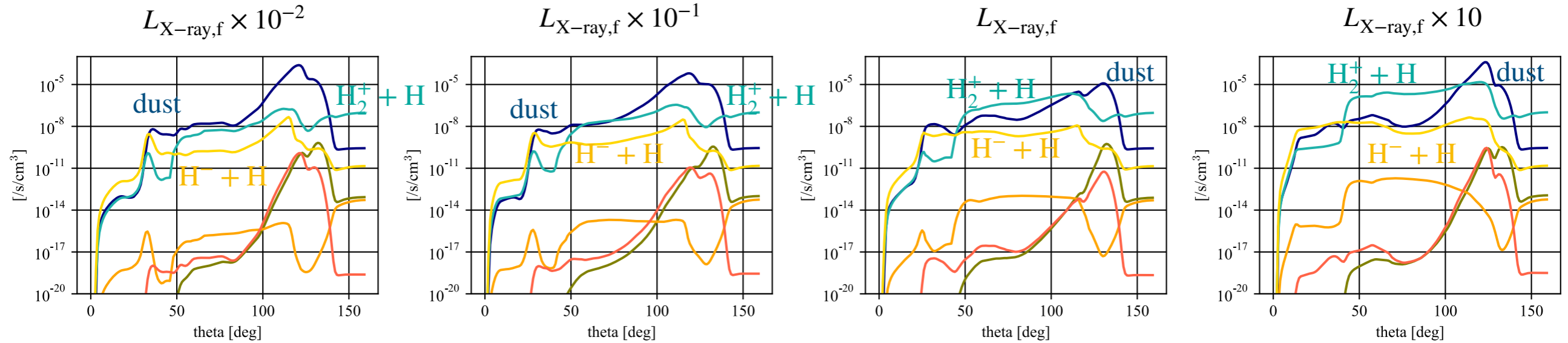
•  $\mathcal{D} = 10^{-2}$   
(fiducial)



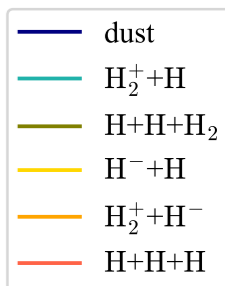
•  $\mathcal{D} = 10^{-6}$



•  $\mathcal{D} = 10^{-6}$ でのH<sub>2</sub>生成反応の係数



- X線光度が低い場合にはH<sub>2</sub><sup>+</sup> + H衝突反応ではなくダスト上でのH<sub>2</sub>生成反応も寄与
- ガス温度、ダスト温度が低いとダスト上でのH<sub>2</sub>生成係数は高くなる
- 円盤部分が加熱されにくい低ダスト量円盤ではX線光度依存性がない



- ダスト量やダストーガス質量比は円盤進化とともに変わる
- ダスト進化の光蒸発への影響を明らかにするためにダストーガス質量比 $\mathcal{D}$ をパラメータとして光蒸発シミュレーションを遂行
- $\mathcal{D} \leq 10^{-3}$ の円盤表面では $\text{H}_2$  pumpingが主な加熱過程となって質量損失に寄与
- 円盤進化に伴うダスト進化によって質量損失プロファイルも変化

#### future work

- 1D円盤面密度進化シミュレーションを行ってどのように円盤進化が進むのか明らかにする
- より多くの化学反応を考慮
- primordial diskについても光蒸発シミュレーション