

原始惑星系円盤への外部輻射の影響

筑波大学 宇宙理論研究室 M1 松本 凜

共同研究者 福島肇（筑波大学）

次世代のサブミリ波観測とシミュレーションの計画検討会

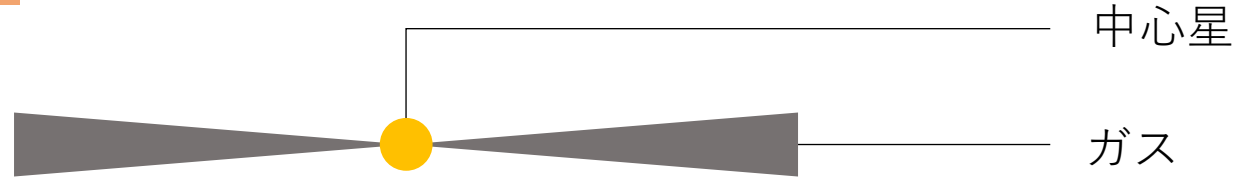
2024/02/05-02/07

Outline

- Introduction
- 解析的モデル
- 先行研究
- 計算手法
- 初期設定
- シミュレーション結果
- まとめと今後の展望

Introduction

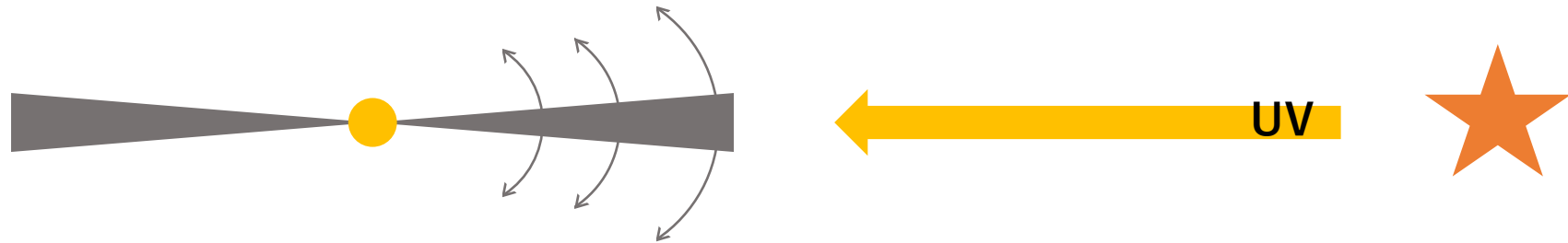
原始惑星系円盤 … 星形成の現場



中心星の周囲にあるガスは通常100万年ほどで中心星の輻射によって蒸発する。

星の形成環境

円盤外から大質量星による紫外線（FUV・EUV）を受けた場合、より早くガスが散逸する可能性がある。



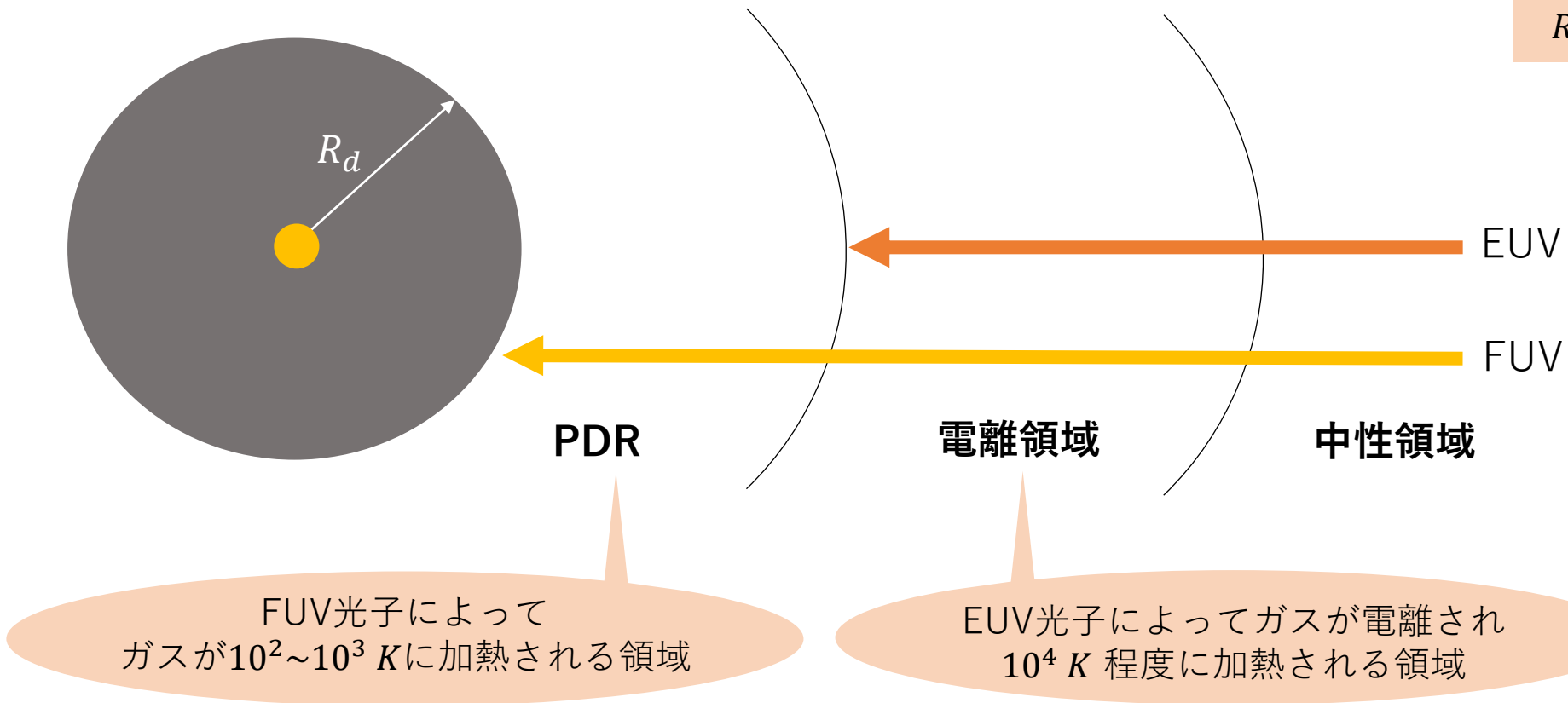
原始惑星系円盤への外部輻射による光蒸発の解明

解析的モデル

原始惑星系円盤は円盤外から紫外線を受けると円盤のガスが光蒸発する。

紫外線 ... $\begin{cases} FUV : 6 \text{ eV} < h\nu < 13.6 \text{ eV} \text{ のエネルギーを持つ光子} \\ EUV : 13.6 \text{ eV} \text{ 以上のエネルギーを持つ光子} \end{cases}$

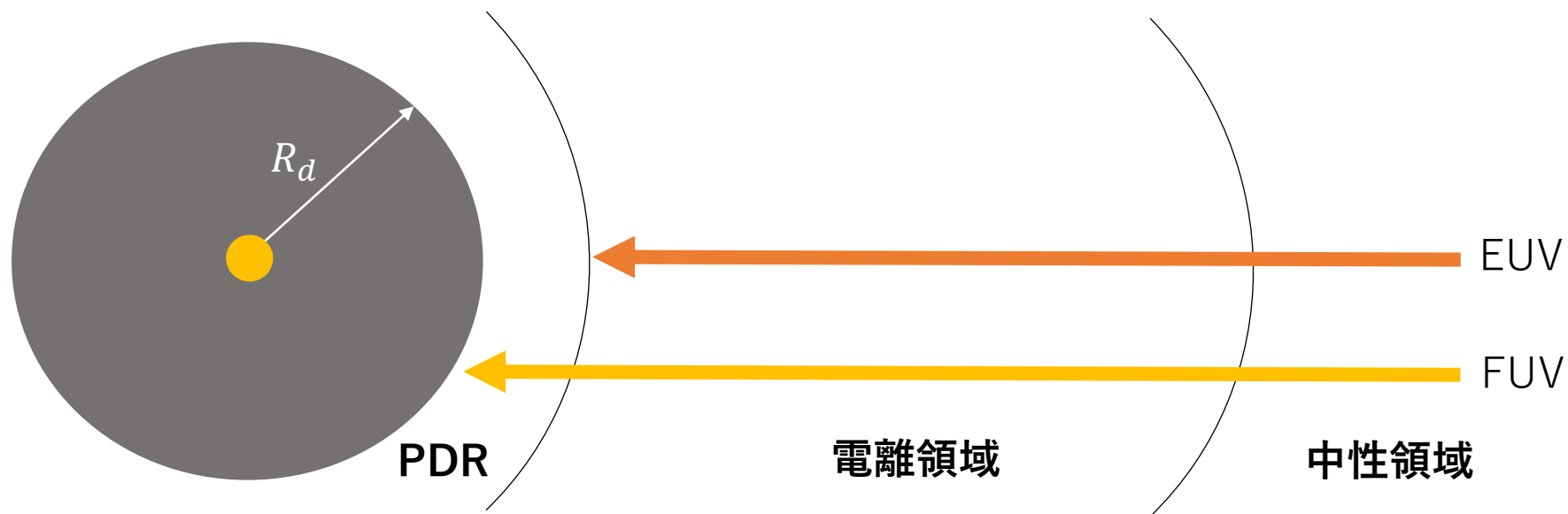
R_d : 円盤の半径



解析的モデル

紫外線の影響

最初は光学的に薄く、よりガスの内部まで到達することができるFUVが円盤のガス蒸発において支配的だが、時間経過に伴い円盤の半径が重力半径より小さくなるとEUVがガス蒸発において支配的となり、PDRが薄くなる。



FUV光子によって加熱されるガスの重力半径は

$$R_g = \frac{GM_*}{C_s^2} \cong 10 \text{ au} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right) \left(\frac{T}{10^3 \text{ K}} \right)^{-1}$$

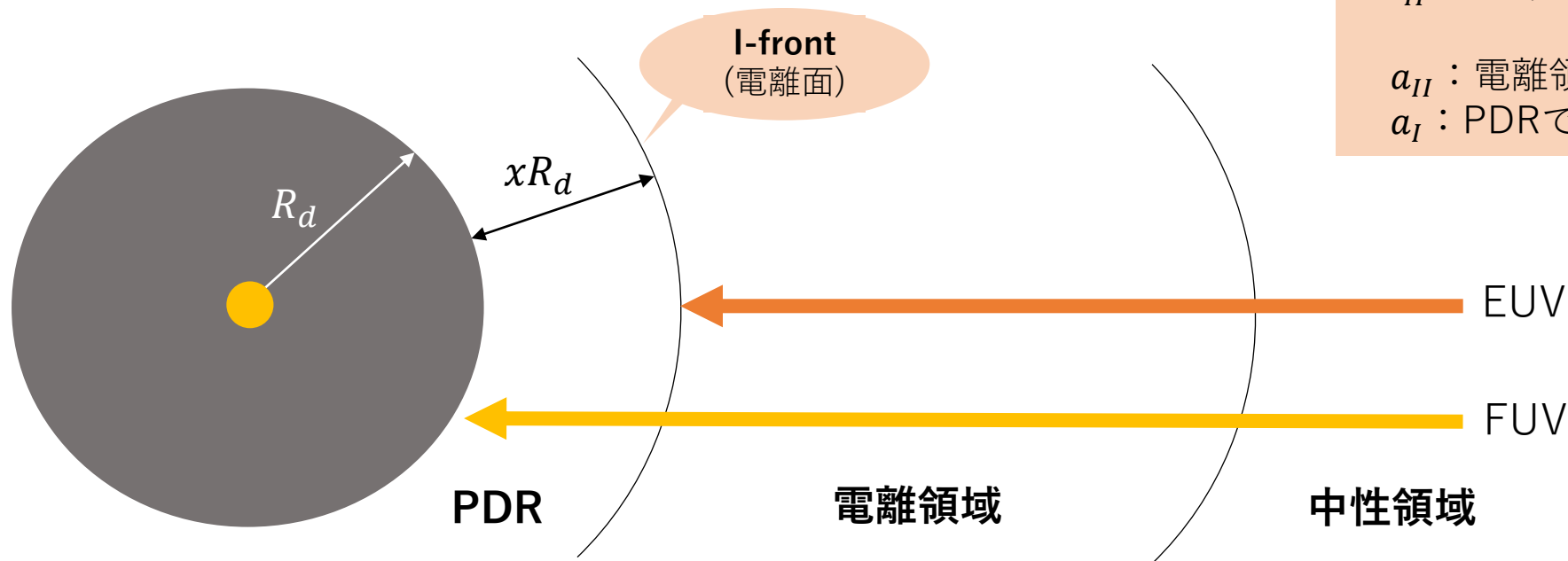
EUV光子によって加熱されるガスの重力半径は

$$R_g = \frac{GM_*}{C_s^2} \cong 1 \text{ au} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right) \left(\frac{T}{10^3 \text{ K}} \right)^{-1}$$

解析的モデル

蒸発率

円盤の蒸発率は r における速度 v 、密度 n 、平均分子量 m_I とすると $\dot{M} = 4\pi r^2 v n m_I$



R_d : 円盤の半径
 xR_d : PDR領域の厚さ
 r_{IF} : 電離面の半径

a_{II} : 電離領域内での音速
 a_I : PDRでの音速

I-frontでの蒸発率について考える

PDRの厚さを xR_d とすると I-frontの半径は $r_{IF} = (1+x)R_d$

I-frontでのガスの速度は質量と運動量を考えて $v_{IF} = \left(\frac{a_I^2}{2a_{II}}\right)$

PDR領域の柱密度は R_d での密度 n_0 を用いて $N_D \sim n_0 R_d$ $n_I = \frac{N_D}{xR_d} = \frac{n_0}{x}$

$$\dot{M} = 4\pi \frac{(1+x)^2}{x} R_d^2 n_0 m_I \left(\frac{a_I^2}{2a_{II}}\right)$$

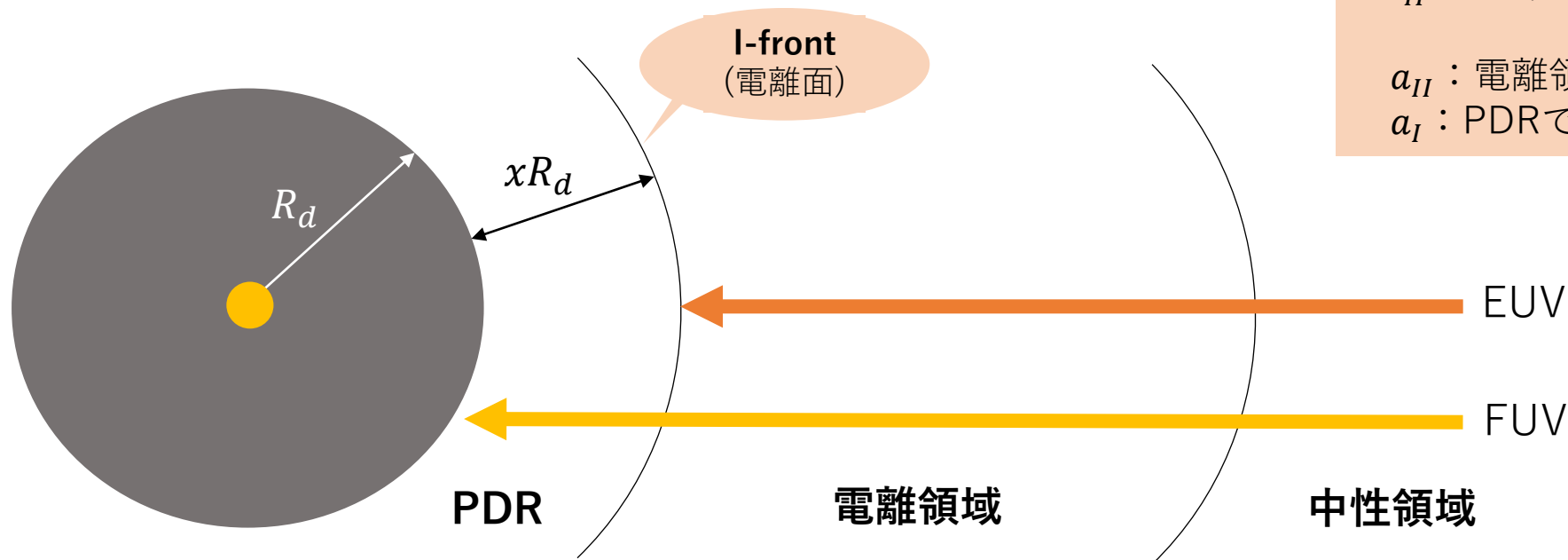
解析的モデル

蒸発率

円盤の蒸発率は r における速度 v 、密度 n 、平均分子量 m_I とすると $\dot{M} = 4\pi r^2 v n m_I$

R_d : 円盤の半径
 xR_d : PDR領域の厚さ
 r_{IF} : 電離面の半径

a_{II} : 電離領域内での音速
 a_I : PDRでの音速

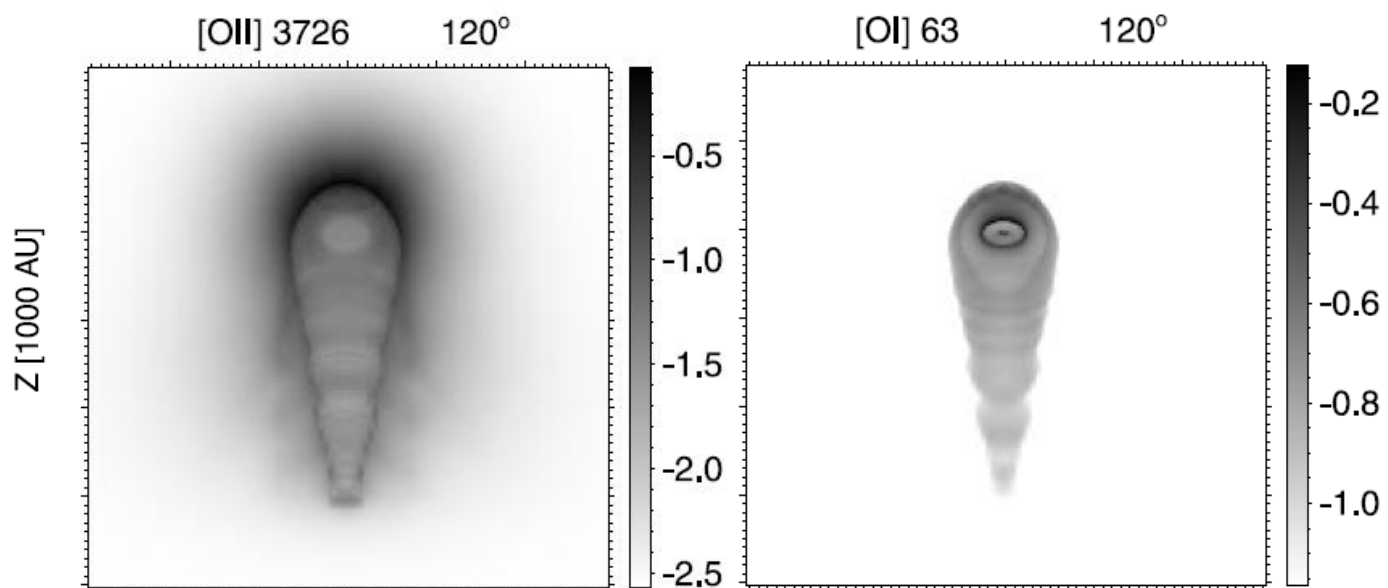


円盤の半径 R_d を 100[au] として値を代入すると

$$\dot{M} = 4\pi \frac{(1+x)^2}{x} R_d^2 n_0 m_I \left(\frac{a_I^2}{2a_{II}} \right) = \begin{cases} 7.5 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{yr}^{-1} & \text{(EUVが支配的な場合)} \\ 1.1 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{yr}^{-1} & \text{(FUVが支配的な場合)} \end{cases}$$

先行研究

原始惑星系円盤の外部輻射の影響については先行研究において2次元流体シミュレーションを用いて調べられている。



Z軸の正の方向から紫外線を輻射した結果。

OIIの輝線強度マップが電離領域の分布、
OIの輝線強度マップが円盤の分布と一致する。

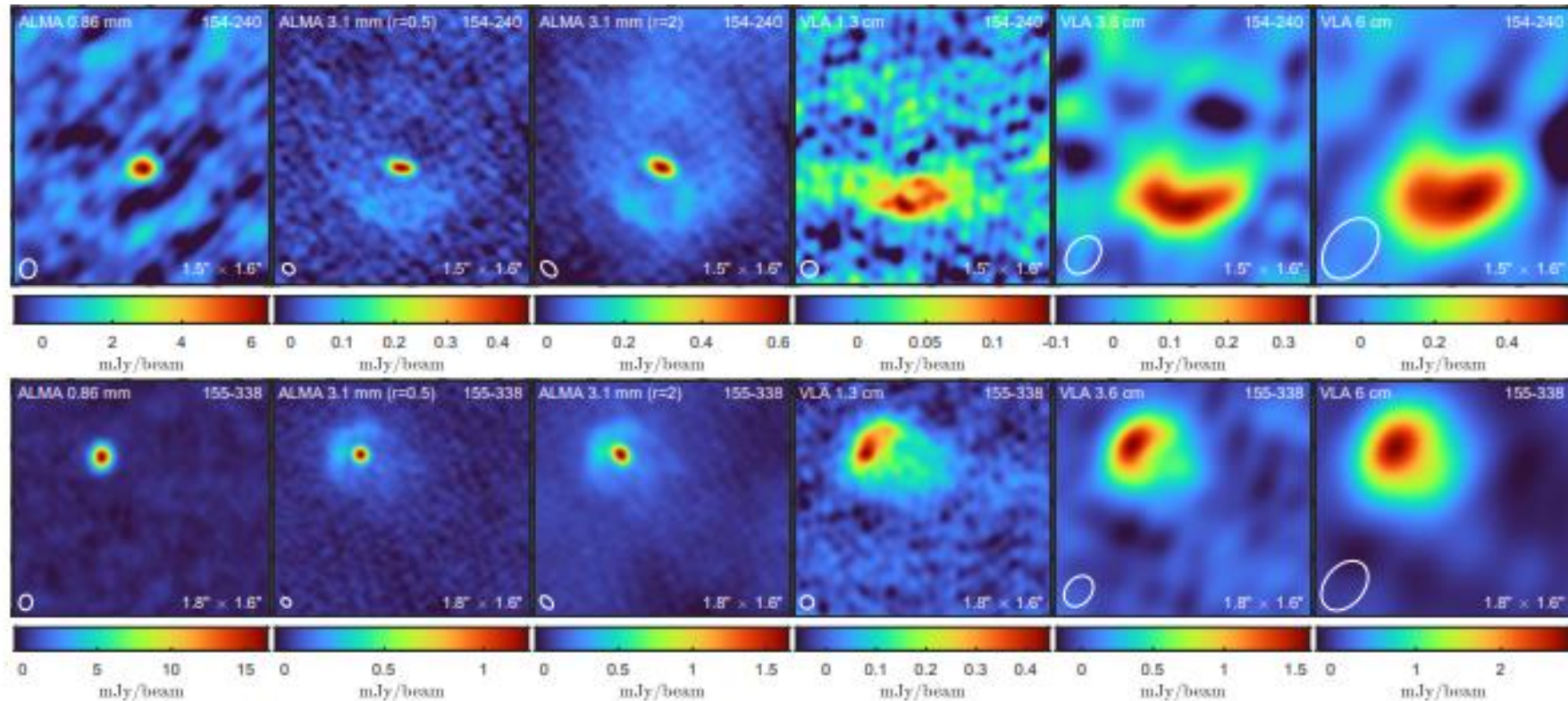
図：輝線強度マップ
(左：OIII、右：OI)(RICHLING et.al 2000)

この計算を3次元に拡張することで、光子の放射方向に自由度を持たせる。

→ ガス円盤への影響まで考慮することが可能となり、より現実的な計算を行うことができる。

外部輻射の強度や、EUV/FUVの強度比の影響についても並行して調べる。

先行研究



波長

短



長

(Nicholas P. Ballering et.al 2023)

異なる6つの波長で光蒸発する原始惑星系円盤を観測した結果
先行研究の結果や解析的モデルと類似するガス構造を持つ円盤が観測されている
観測された原始惑星系円盤が紫外線の影響をどのように受けているのか解明することが目標

計算手法

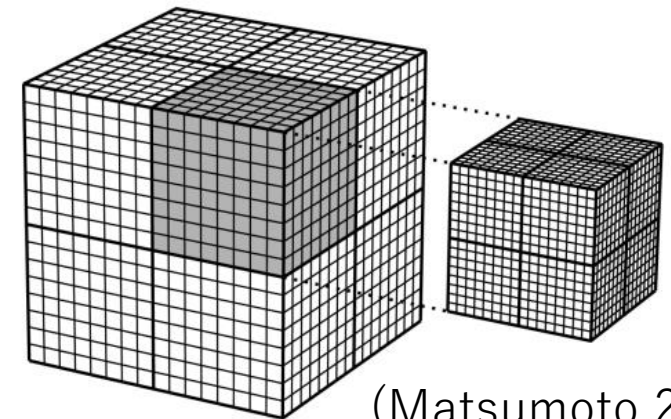
用いる計算コード

{ 流体の基礎方程式
輻射輸送方程式(M1 - closure法) を解くことが可能な

適合格子細分化(AMR)法による自己重力磁気流体コード
「SFUMATO(Matsumoto 2007)」に

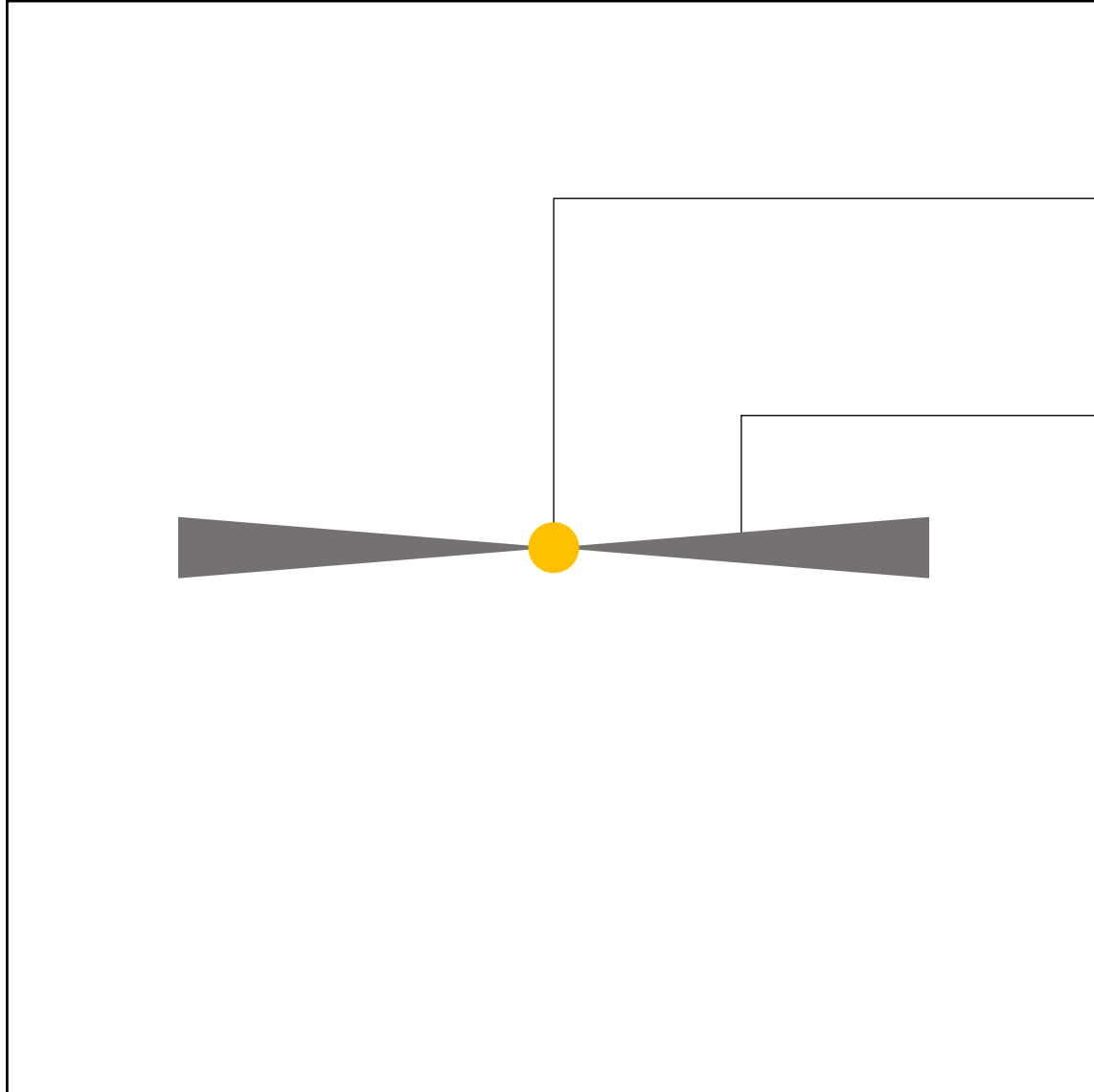
- ・ 非平衡化学
- ・ 熱進化
(電離領域：電離加熱、輝線冷却 | PDR：光電効果、輝線冷却)
- ・ EUV/FUVに関するM1クロージャ法による輻射計算

が組み込まれており、PDRの計算が可能なコードを用いる。
(Fukushima & Yajima 2021, Sugimura et al. 2020)



(Matsumoto 2007)

初期設定



計算領域

中心星

質量を $0.5M_{\odot}$ に設定し、半径は30[au]とする。

ガス

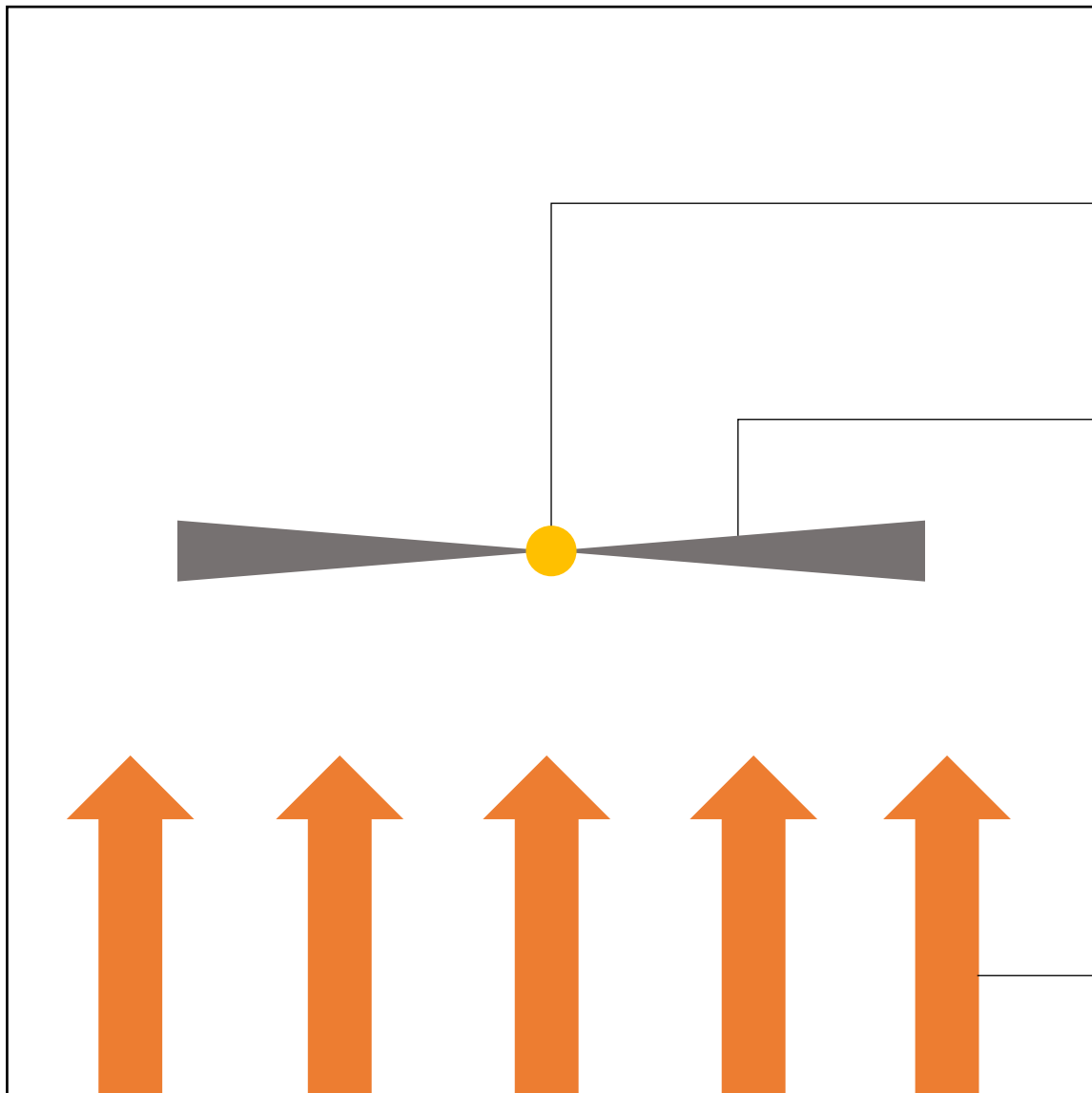
以下の式で原始惑星系円盤の密度分布を設定

$$n_H = n_0 \left(\frac{R}{1\text{au}} \right)^{-9/4} \exp \left[-\frac{z^2}{2h^2} \right]$$

($\because h(\text{円盤の高さ}) = \frac{c_s(\text{音速})}{\Omega_k(\text{ケプラー速度})}$) (Nakatani et.al 2018)

円盤の直径は100[au]で計算領域の1/10程度とし、
円盤外部の密度は円盤の外側の1/100とする。

初期設定



計算領域

中心星

質量を $0.5M_{\odot}$ に設定し、半径は30[au]とする。

ガス

以下の式で原始惑星系円盤の密度分布を設定

$$n_H = n_0 \left(\frac{R}{1\text{au}} \right)^{-9/4} \exp \left[-\frac{z^2}{2h^2} \right]$$

($\because h(\text{円盤の高さ}) = \frac{c_s(\text{音速})}{\Omega_k(\text{ケプラー速度})}$) (Nakatani et.al 2018)

円盤の半径は100[au]で計算領域の1/10程度とし、
円盤外部の密度は円盤の外側の1/100とする。

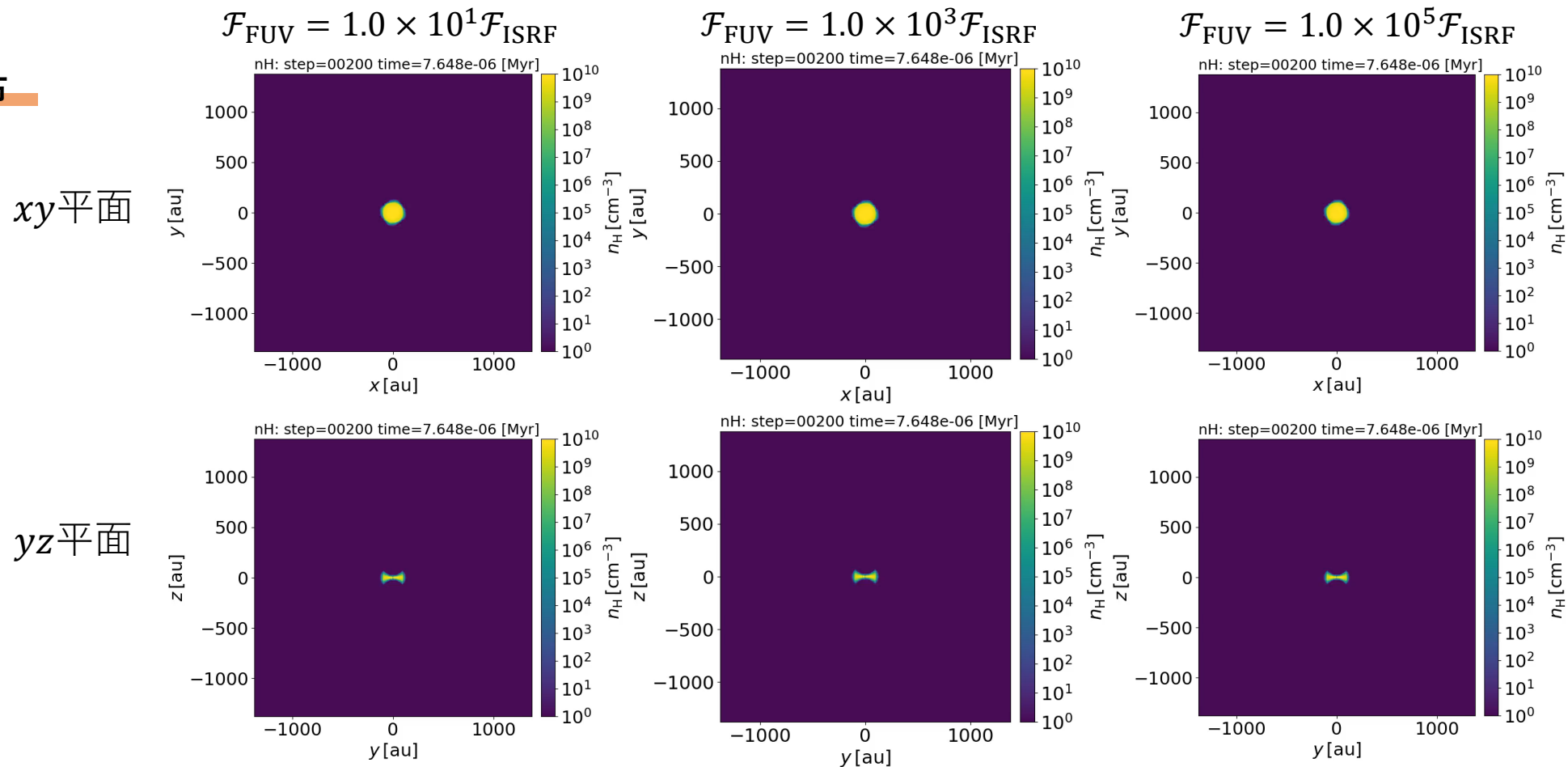
紫外線(FUV・EUV)

原始惑星系円盤に対してz軸負の方向から **Face On** で輻射

結果 Face On

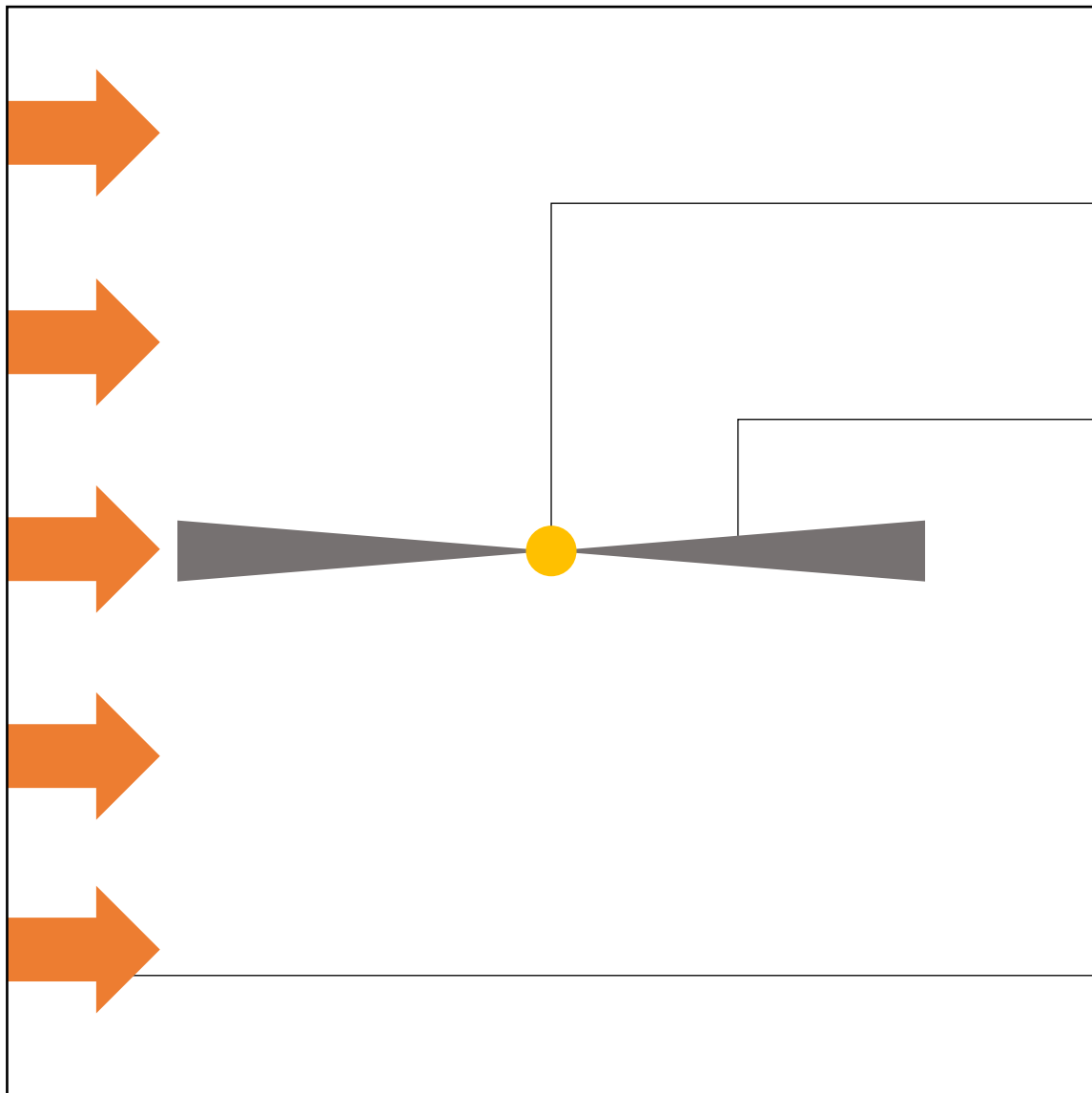
$$\mathcal{F}_{\text{ISRF}} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

密度分布



$\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^1 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ と $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ では外部輻射によって電離領域が円盤付近まで近づいている
 $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ では円盤からのフィードバックが顕著にみられる

初期設定



計算領域

中心星

質量を $0.5M_{\odot}$ に設定し、半径は30[au]とする。

ガス

以下の式で原始惑星系円盤の密度分布を設定

$$n_H = n_0 \left(\frac{R}{1\text{au}} \right)^{-9/4} \exp \left[-\frac{z^2}{2h^2} \right]$$

($\because h(\text{円盤の高さ}) = \frac{c_s(\text{音速})}{\Omega_k(\text{ケプラー速度})}$) (Nakatani et.al 2018)

円盤の半径は100[au]で計算領域の1/10程度とし、
円盤外部の密度は円盤の外側の1/100とする。

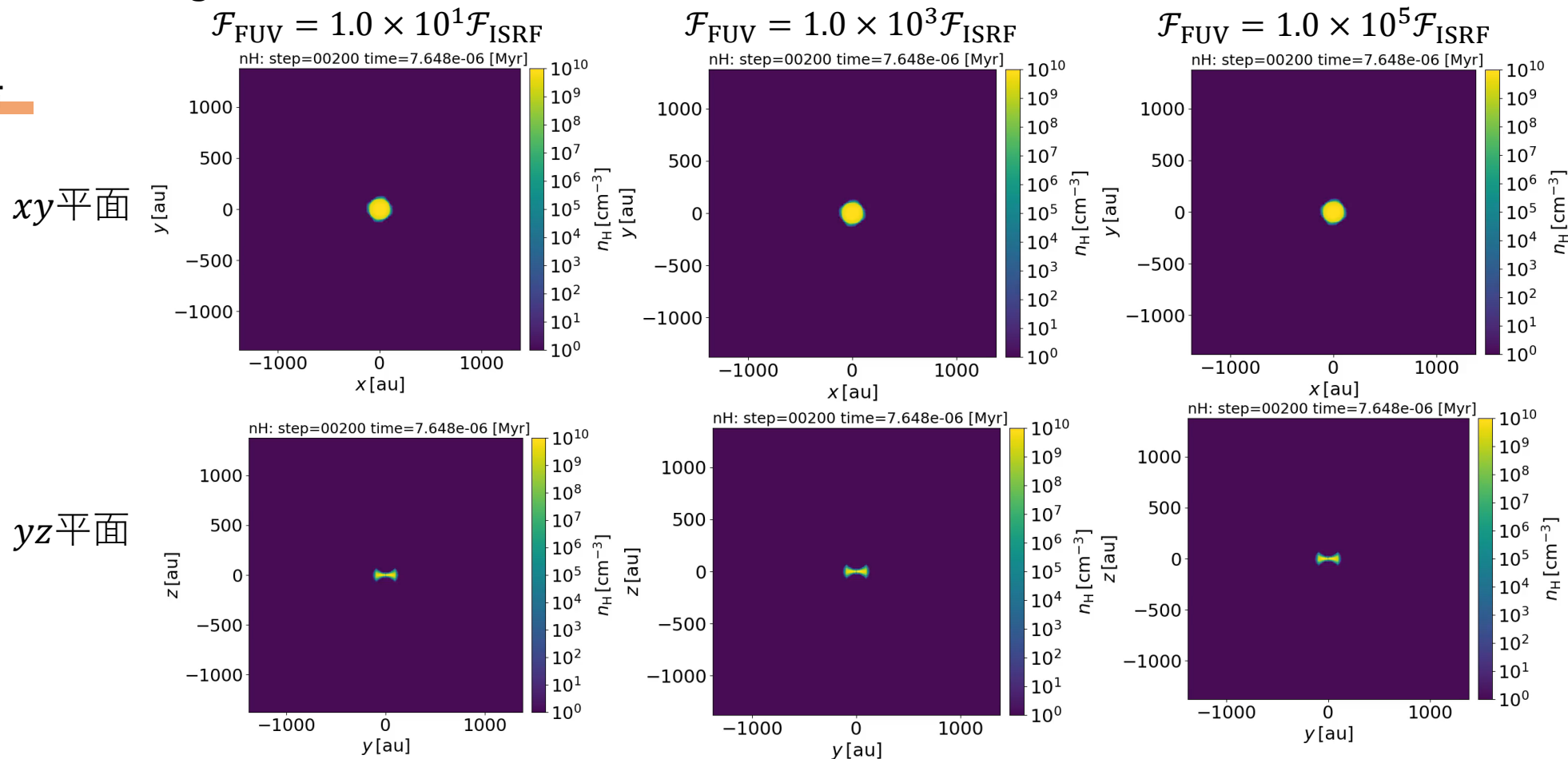
紫外線(FUV・EUV)

原始惑星系円盤に対してy軸負の方向から **Edge On** で輻射

結果 Edge On

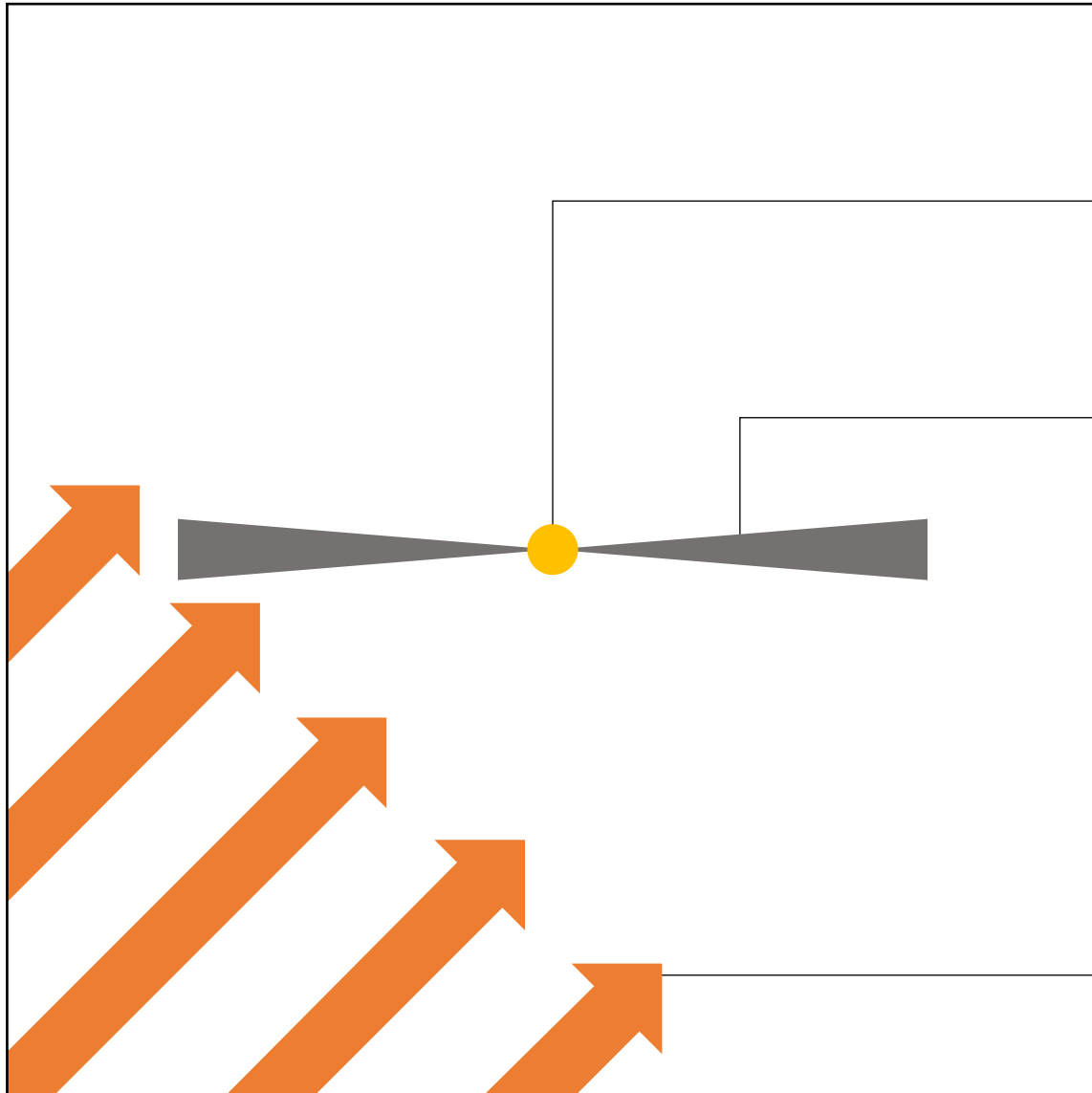
$$\mathcal{F}_{\text{ISRF}} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

密度分布



円盤の回転方向（ z 軸正の方向から見て反時計回り）に歪みが見られる
 $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ でより顕著に影響がみられる

初期設定



計算領域

中心星

質量を $0.5M_{\odot}$ に設定し、半径は30[au]とする。

ガス

以下の式で原始惑星系円盤の密度分布を設定

$$n_H = n_0 \left(\frac{R}{1\text{au}} \right)^{-9/4} \exp \left[-\frac{z^2}{2h^2} \right]$$

($\because h(\text{円盤の高さ}) = \frac{c_s(\text{音速})}{\Omega_k(\text{ケプラー速度})}$) (Nakatani et.al 2018)

円盤の半径は100[au]で計算領域の1/10程度とし、
円盤外部の密度は円盤の外側の1/100とする。

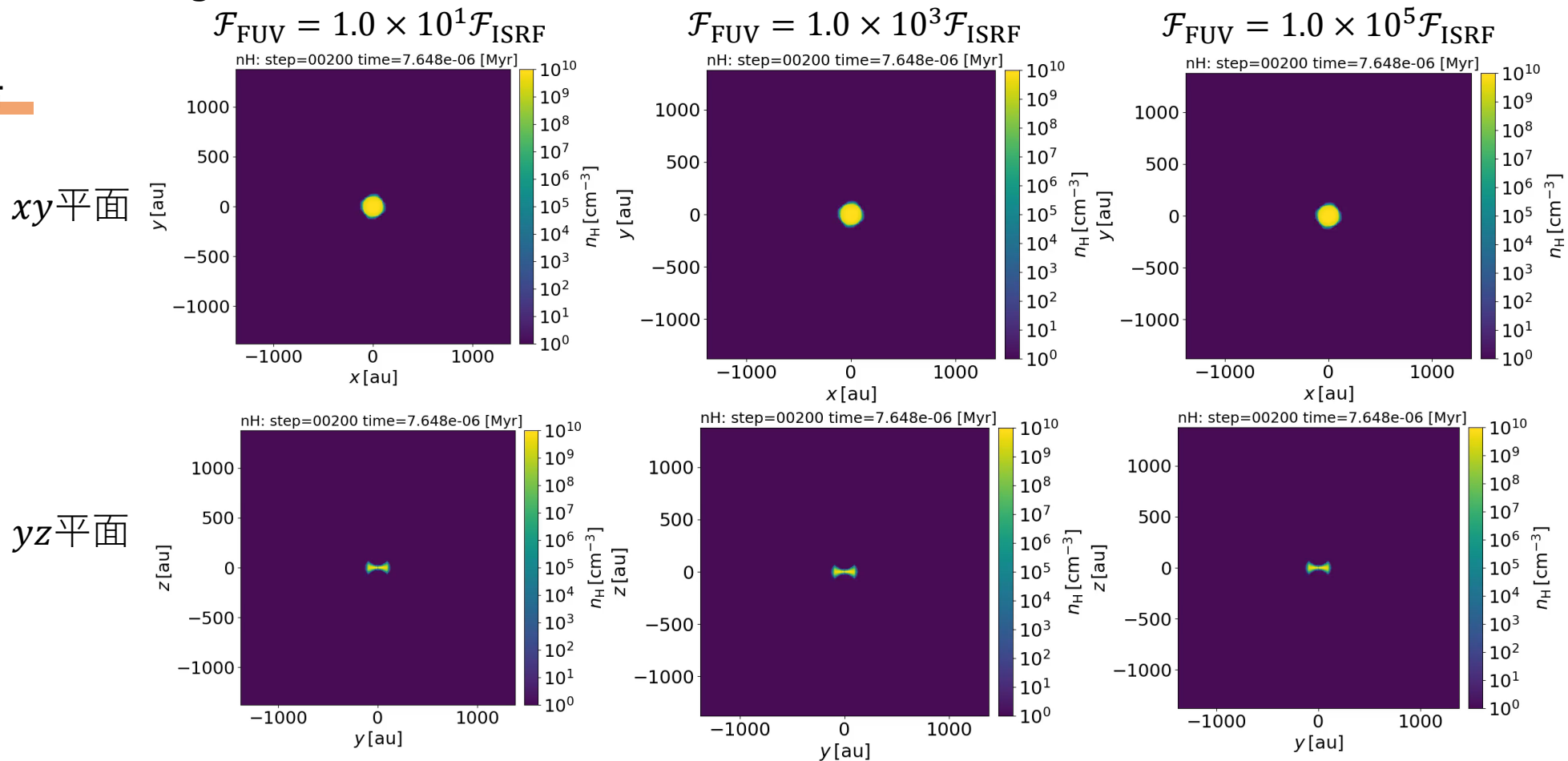
紫外線(FUV・EUV)

原始惑星系円盤に対して **ななめ45度** で輻射

結果 ななめ45度

$$\mathcal{F}_{\text{ISRF}} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

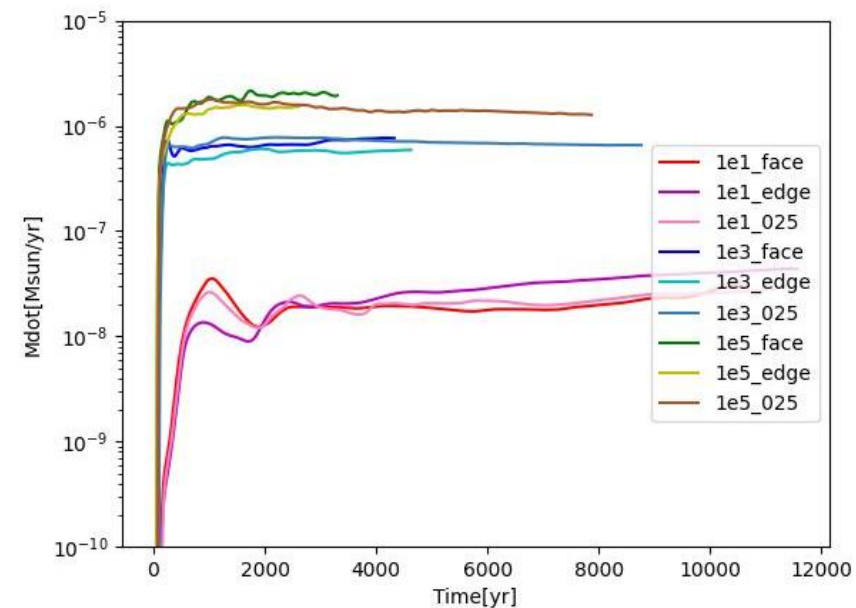
密度分布



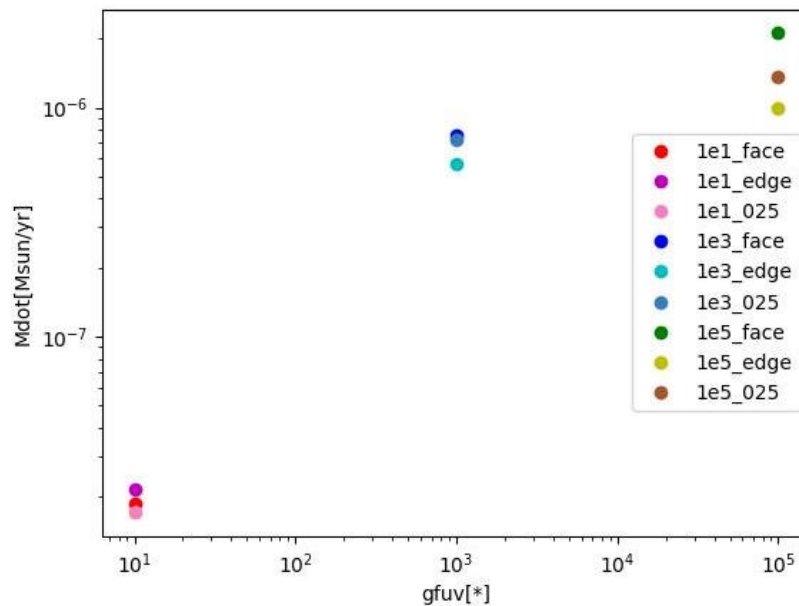
Face Onと同様に、 $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ では円盤からのフィードバックが顕著にみられる
Edge Onでみられた円盤の歪みは、あまり見られない

結果 蒸発率

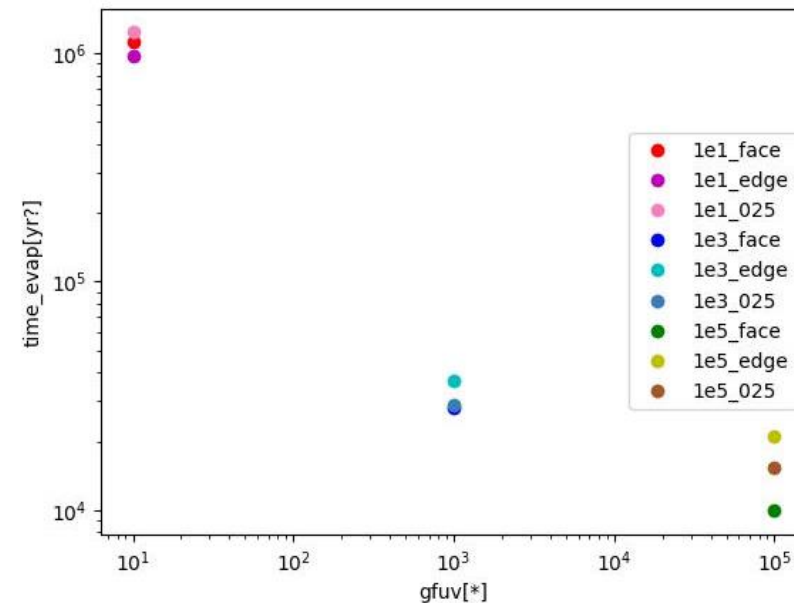
$$M_{disk} = 2.1 \times 10^{-2} M_{\odot}$$



蒸発率 \dot{M} の時間依存性



蒸発率 \dot{M} の紫外線強度依存性



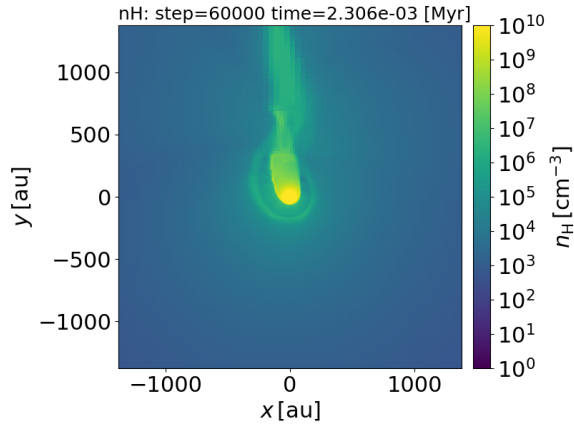
円盤が蒸発する時間の紫外線強度依存性

- 角度依存性は小さい
- 円盤が蒸発するタイムスケールは紫外線強度に依存するが、
 $\mathcal{F}_{FUV} = 1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{ISRF}$ と $\mathcal{F}_{FUV} = 1.0 \times 10^5 \mathcal{F}_{ISRF}$ で 10^4 [yr] スケール → 中心星の輻射による蒸発より早い

まとめ

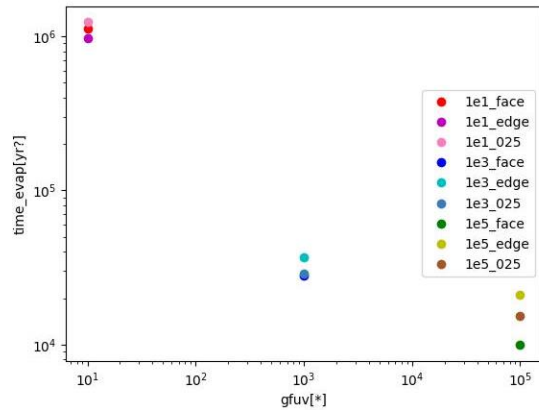
結果

Edge On・Face On・ななめ45度の3つの方向からの紫外線の輻射による原始惑星系円盤への影響について調べた。



Edge On で輻射した場合、円盤の回転方向にガス蒸発の構造の歪みが見られた。

▶ 解析的モデルで考えられる蒸発流の構造と異なるため、観測結果と比較するためには蒸発流の構造について、解析を進める必要がある。



円盤が蒸発するタイムスケールは紫外線強度に依存し、 $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ と $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ で $10^4[\text{yr}]$ のスケールになる

▶ 中心星の輻射による蒸発($10^6[\text{yr}]$ スケール)より短いため、惑星形成に影響を与える可能性がある。

今後の展望

最終的に観測されたオーバーフローの様子から円盤の様子がわかることを目標に研究を進める。

- ・ 蒸発率 \dot{M} の円盤内位置依存性を調べる。
- ・ 紫外線内の FUV/EUV の強度比を変化させる。