

原始惑星系円盤への外部輻射の影響

松本凜, 福島肇 (筑波大学)

2024.10.18-19 天体形成研究会2024 @筑波大学計算科学研究センター

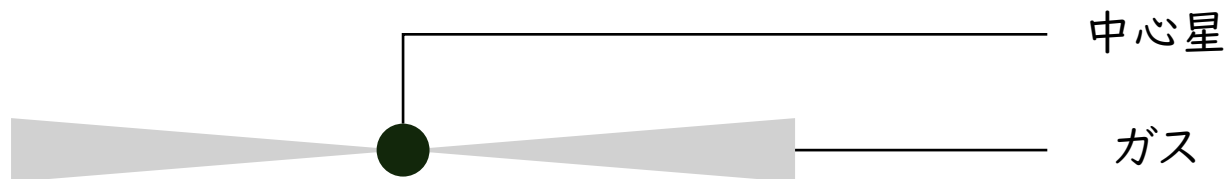
Outline

- 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
- Summary

Introduction

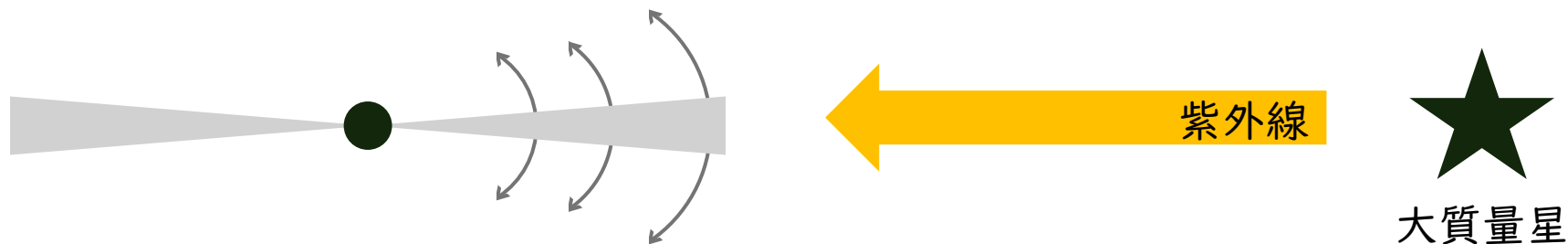
原始惑星系円盤

中心星と周囲のガスで構成される、惑星形成の現場となる構造。
通常100万年程度のタイムスケールで、周囲のガスは中心星の輻射によって蒸発する。



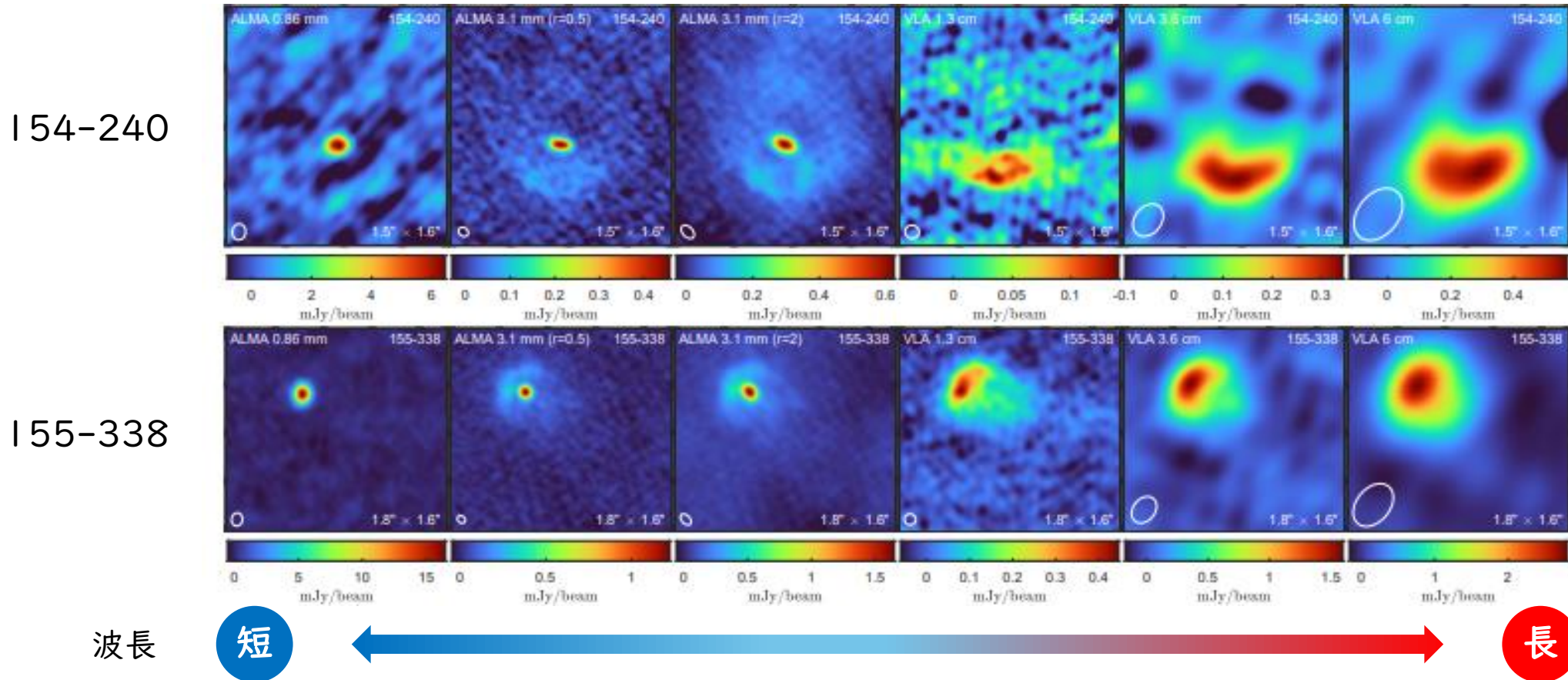
星の形成環境

円盤外から大質量星による紫外線を受けた場合、円盤の外側のガスが光蒸発する。



Introduction

外部輻射を受けた原始惑星系円盤の観測

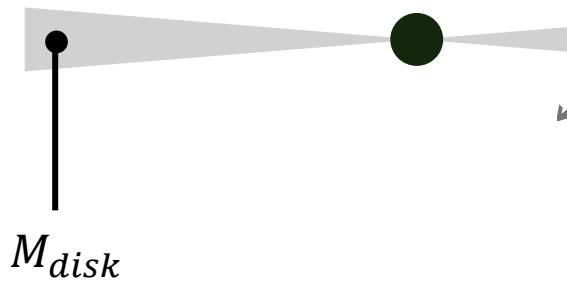


(Nicholas P. Ballering et.al 2023)

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

Introduction

惑星形成へ外部輻射が与える影響



外部輻射による円盤の蒸発率が惑星形成への影響を考える上で重要。

▶ \dot{M} を解析的に見積もりたい



外部輻射によって円盤ガスが散逸するタイムスケール

$$\equiv \frac{M_{disk}}{\dot{M}}$$

<

中心星の輻射によってガスが蒸発するタイムスケール $\sim 10^6 \text{ yr}$

▶ 外部輻射による円盤のガス蒸発は、惑星形成を抑止する可能性がある。

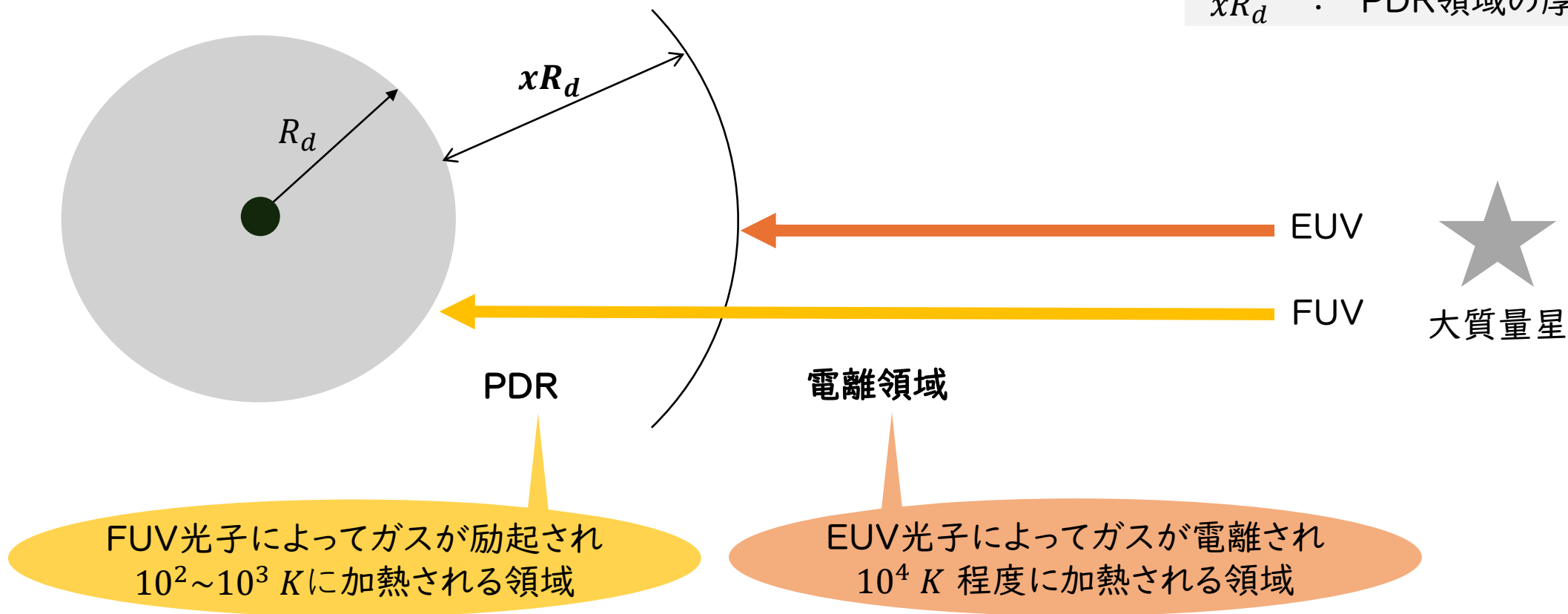
▶ ◎ 原始惑星系円盤への外部輻射による光蒸発の解明

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

R_d : 円盤の半径
 xR_d : PDR領域の厚さ

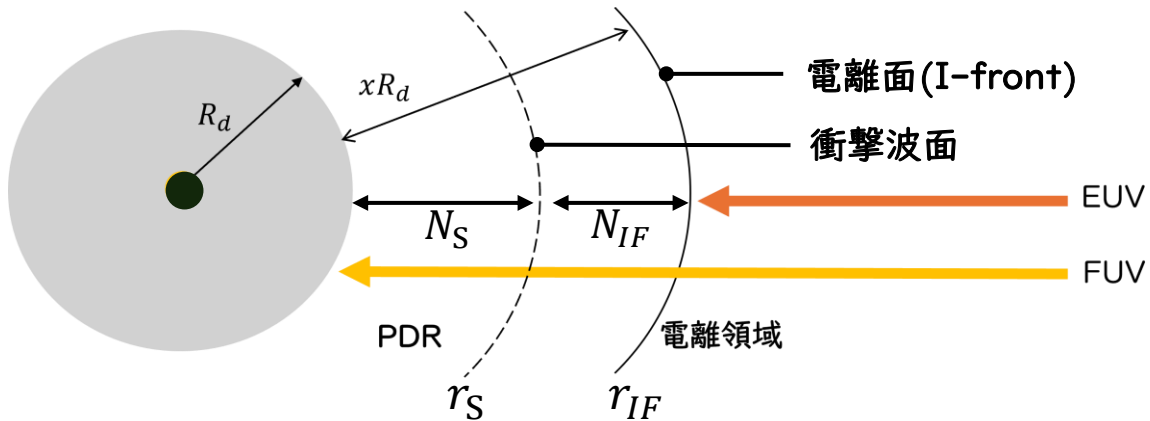


解析的モデル

外部輻射による円盤蒸発の構造は、蒸発を支配する光子の種類に依存する。どちらの光子が支配的かは、PDRの厚さを示す x によって決まる。

R_d	:	円盤の半径
xR_d	:	PDR領域の厚さ
r_{IF}	:	電離面の半径
r_S	:	衝撃波面の半径
M	:	マッハ数

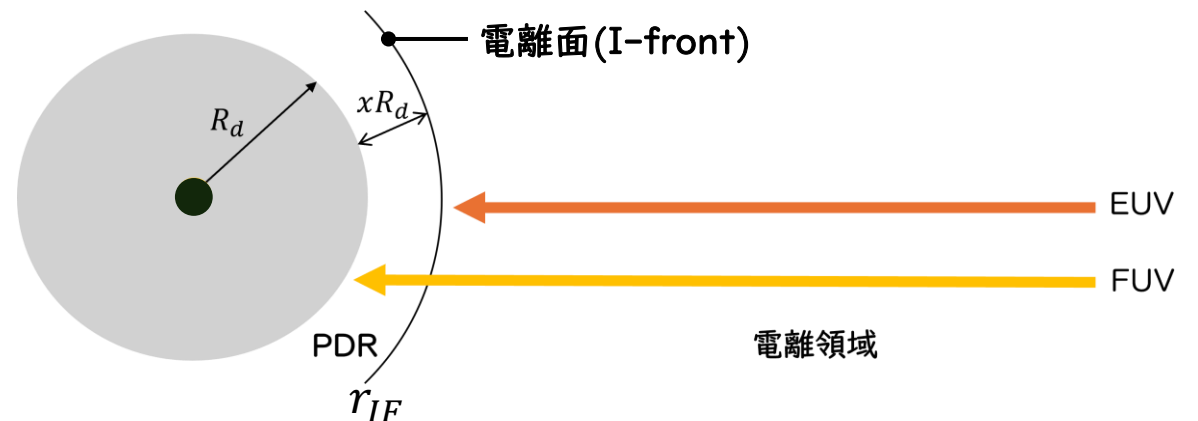
FUVが支配的



- PDR領域が厚くなる。
- I-frontまでの間に衝撃波が生じる。
- 円盤から衝撃波面までの柱密度(N_S)が十分に大きい。

$$N_S > N_{IF} \rightarrow \begin{matrix} N_S \approx n_0 R_d \\ N_{IF} \approx M^2 n_I (R_S) R_S \\ n_I(r) = \frac{R_d^2}{r^2} n_0 \end{matrix} \rightarrow 1 + x \geq \left(\frac{v_0 a_{II}}{a_I^2} \right) \rightarrow \mathbf{x \geq 3.0}$$

EUVが支配的



- PDR領域が非常に薄くなる。
- 衝撃波は生じない。

$$r_S \leq R_d \rightarrow \begin{matrix} r_S = \left(\frac{v_0}{2a_{II}} \right)^{\frac{1}{2}} r_{IF} \\ r_{IF} = (1+x)R_d \end{matrix} \rightarrow 1 + x \leq \left(\frac{2a_{II}}{v_0} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \mathbf{x \leq 1.5}$$

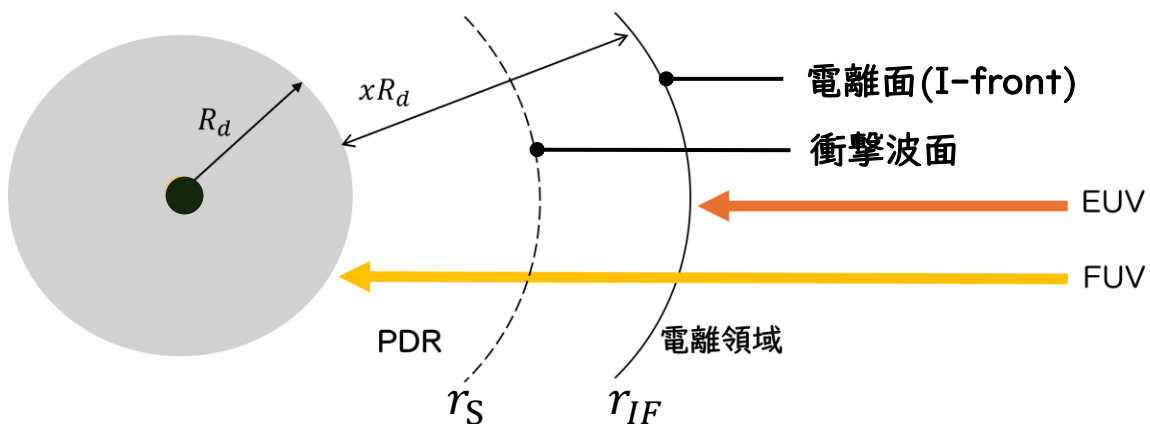
解析的モデル

蒸発率

位置 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 (100 [au])
- xR_d : PDR領域の厚さ
- r_{IF} : 電離面の半径
- r_S : 衝撃波面の半径
- a_I : PDRでの音速
- m_I : PDR領域の平均分子量

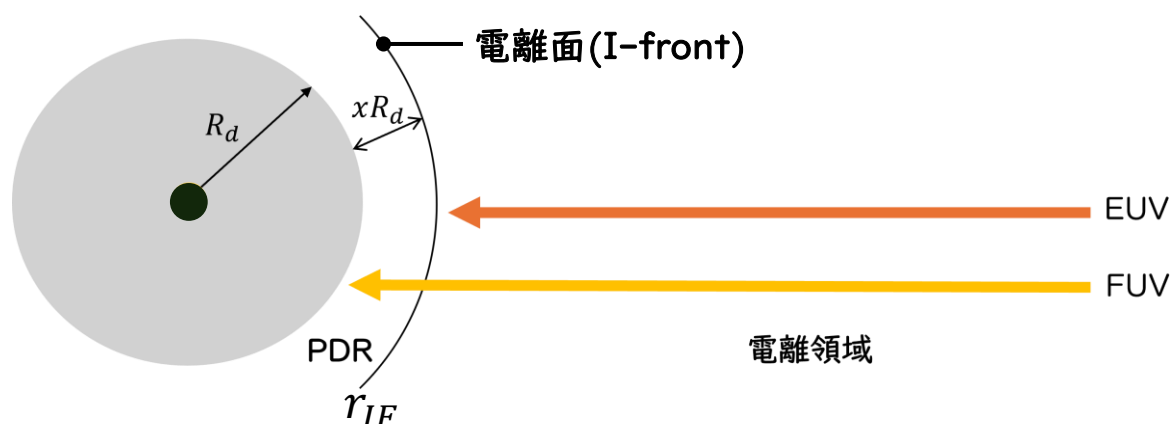
FUVが支配的



円盤の蒸発率として、位置 R_d での蒸発率を見積もる。

$$\begin{aligned} \dot{M} &= 4\pi R_d^2 a_I m_I n_0 \\ &\cong 2.0 \times 10^{-7} \left(\frac{R_d}{100 \text{ au}} \right) M_{\odot}/\text{yr} \end{aligned}$$

EUVが支配的

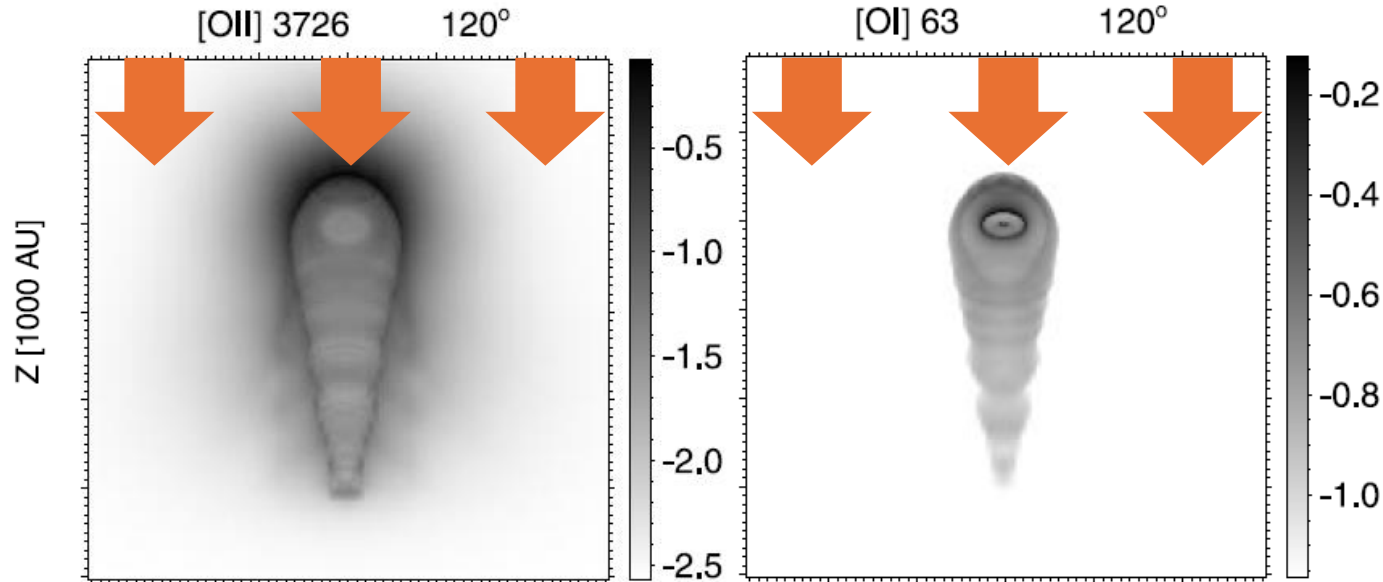


PDRが無視できるほど薄いとして、
円盤の蒸発率として、位置 r_{IF} での蒸発率を見積もる。

$$\begin{aligned} \dot{M} &= 4\pi r_{IF}^2 v_{IF} m_I n_I \\ &\cong 1.2 \times 10^{-7} \left(\frac{R_d}{100 \text{ au}} \right) M_{\odot}/\text{yr} \end{aligned}$$

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。

▶ ◎観測結果と比較 → 原始惑星系円盤における光蒸発の構造解明

計算手法

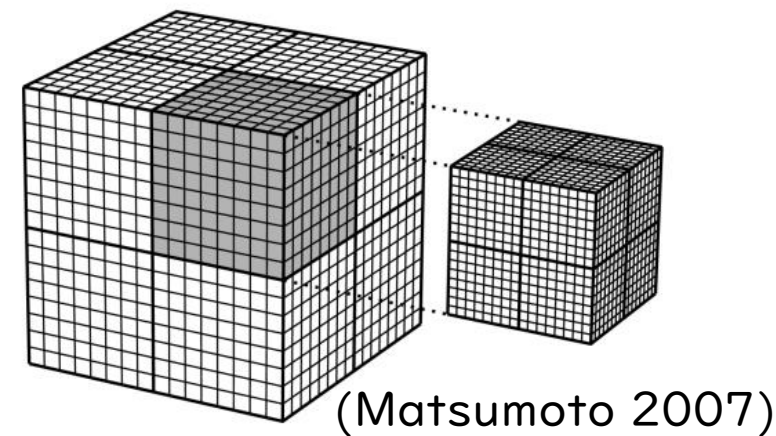
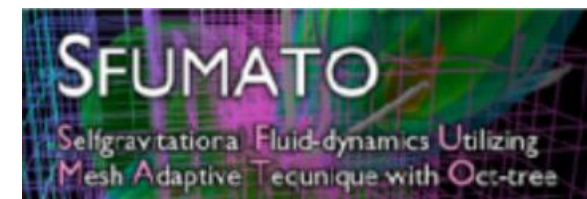
用いる計算コード

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

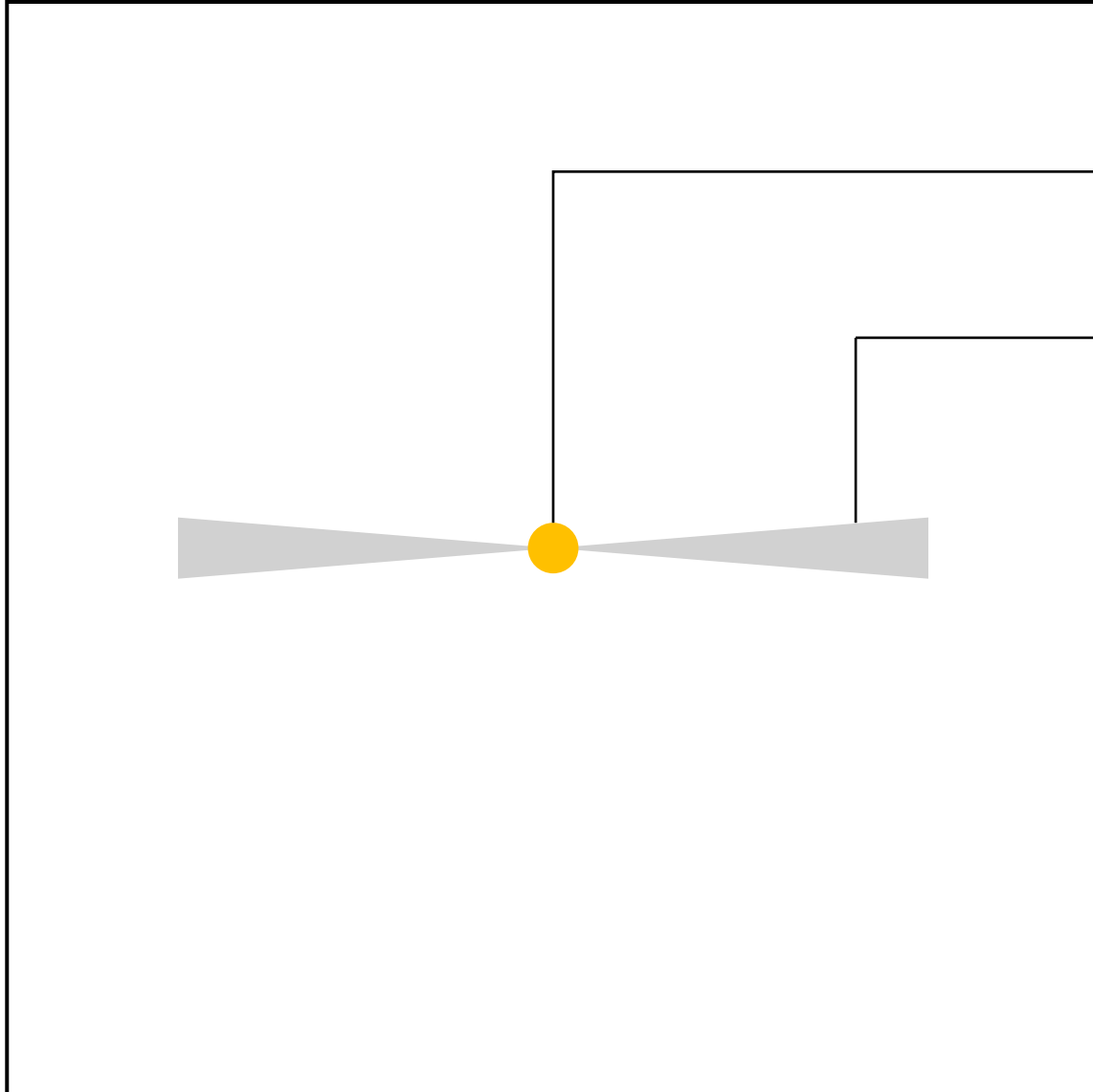
適合格子細分化(AMR)法による自己重力磁気流体コード
「SFUMATO(Matsumoto 2007)」に

{ ・ 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)



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

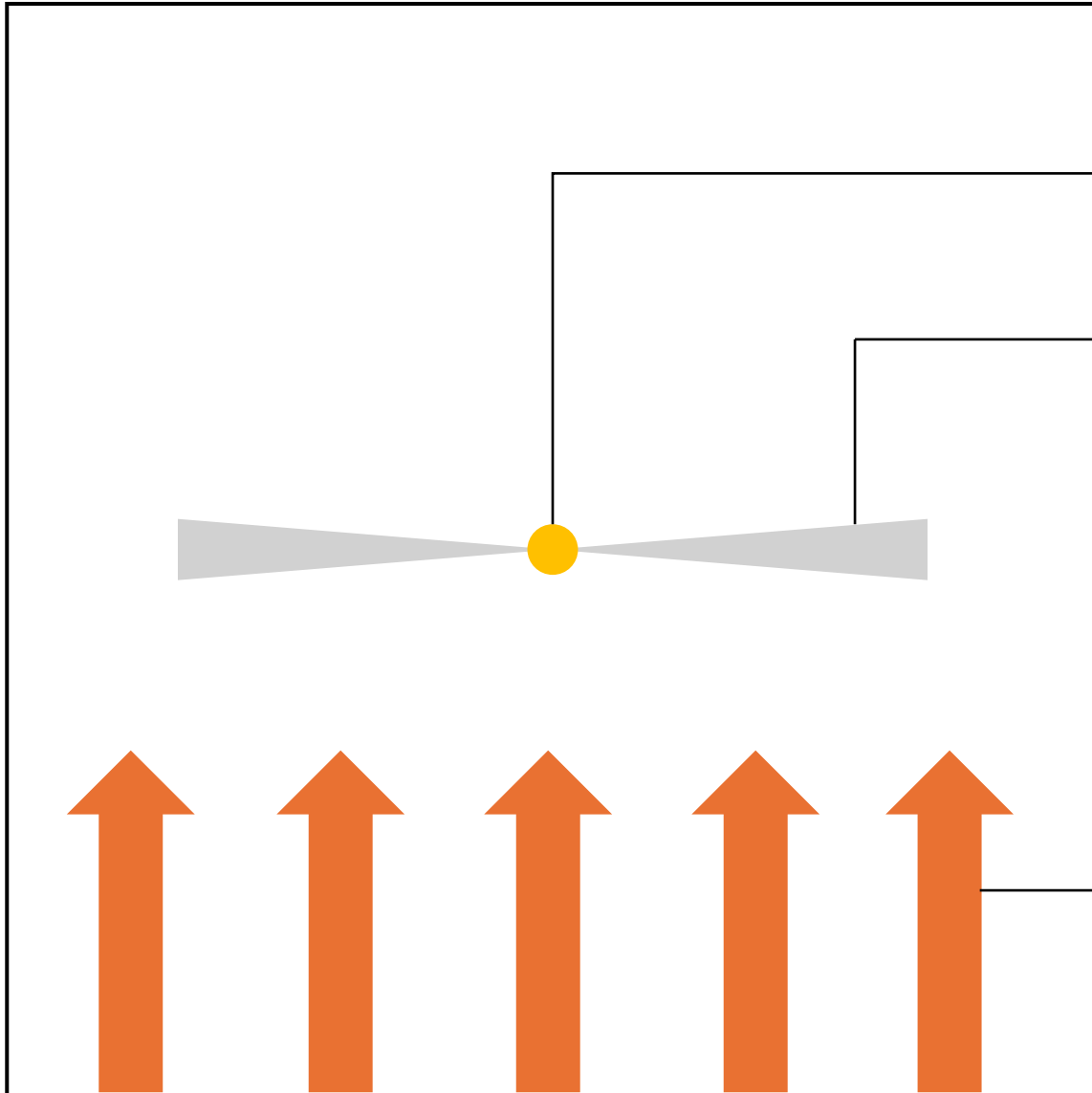
以下の式で原始惑星系円盤の密度分布を設定

$$n_H = n_0 \left(\frac{R}{1au} \right)^{-9/4} \exp \left[-\frac{z^2}{2h^2} \right] \quad (\text{Nakatani et.al 2018})$$

$$\therefore h(\text{円盤の高さ}) = \frac{C_s (\text{音速})}{\Omega_k (\text{ケプラー速度})}$$

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。

初期設定：Face On



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

$$n_H = n_0 \left(\frac{R}{1au} \right)^{-9/4} \exp \left[-\frac{z^2}{2h^2} \right] \quad (\text{Nakatani et.al 2018})$$

$$\therefore h(\text{円盤の高さ}) = \frac{C_s (\text{音速})}{\Omega_k (\text{ケプラー速度})}$$

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。

外部輻射(FUV・EUV)

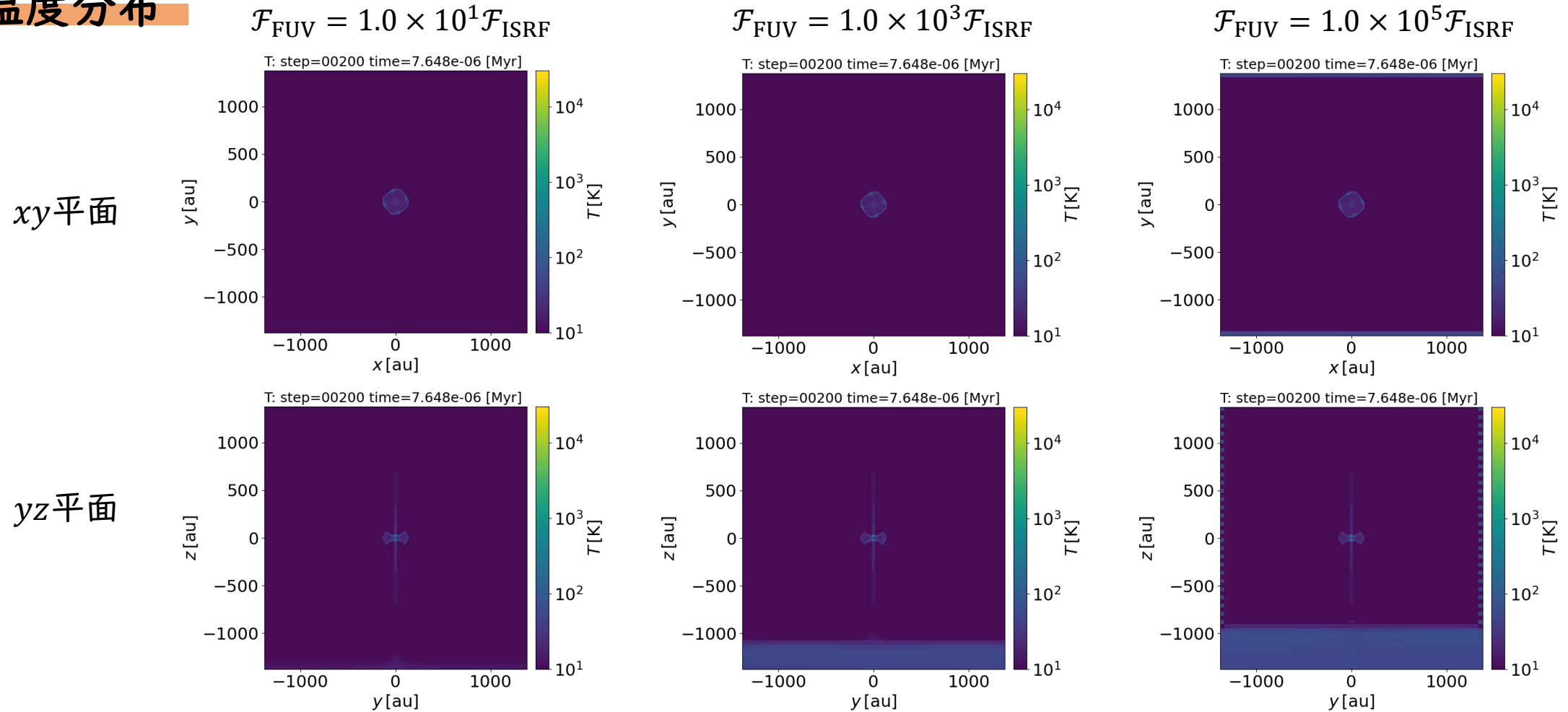
原始惑星系円盤に対してz軸負の方向から **Face On** で輻射。
星間空間内の平均的なエネルギーフラックス $\mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ を基準に
3強度 ($\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^1 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$, $1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$, $1.0 \times 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$)

Results : Face On

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

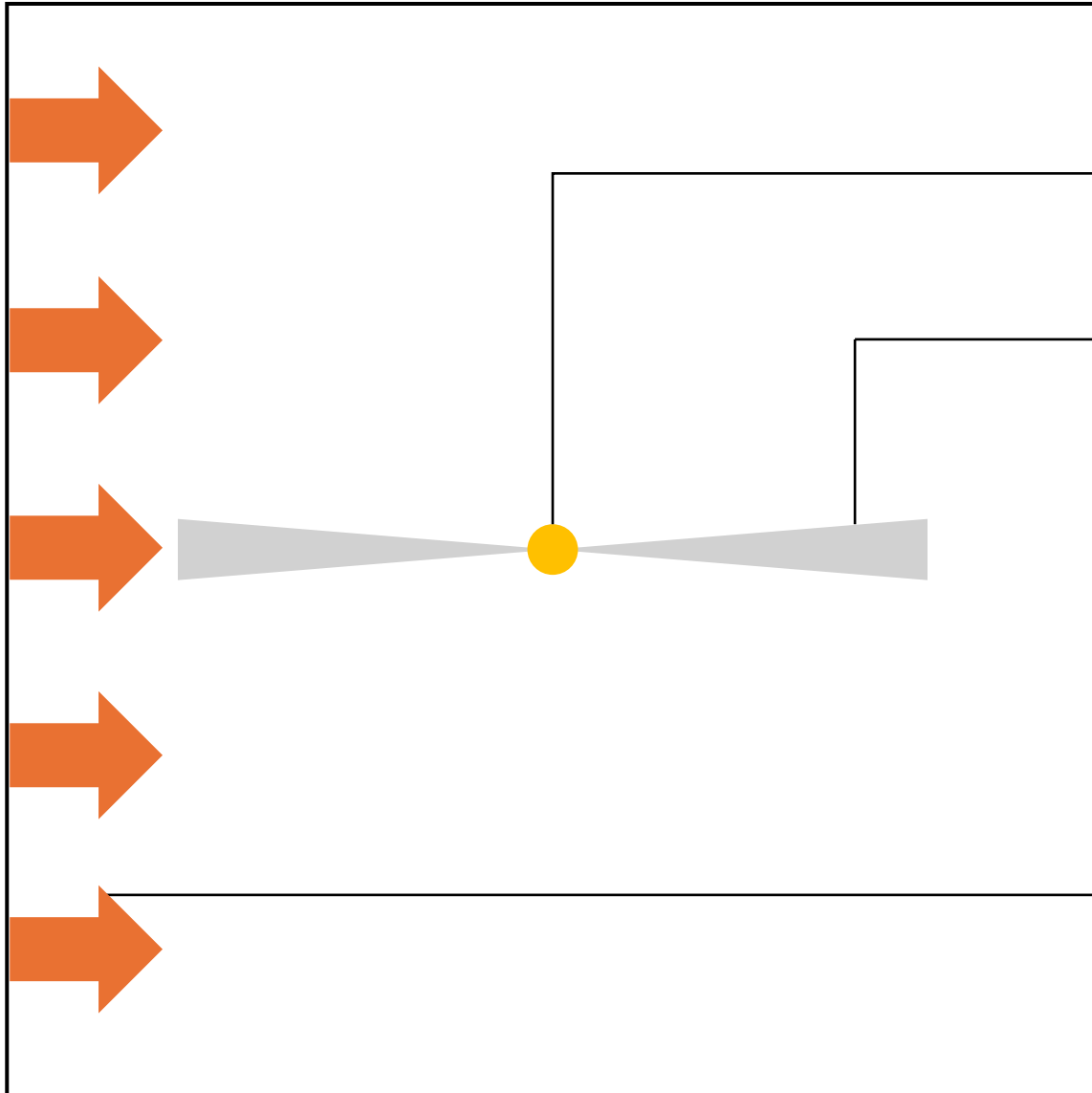
(星間空間内の平均的なエネルギーフラックス)

温度分布



- $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^1, 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ 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 : EUVが支配的な構造
- $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ ではPDR領域が広がっている : FUVが支配的な構造

初期設定 : Edge On



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

$$n_H = n_0 \left(\frac{R}{1\text{au}} \right)^{-9/4} \exp \left[-\frac{z^2}{2h^2} \right] \quad (\text{Nakatani et.al 2018})$$

$$\therefore h(\text{円盤の高さ}) = \frac{C_s (\text{音速})}{\Omega_k (\text{ケプラー速度})}$$

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。

外部輻射(FUV・EUV)

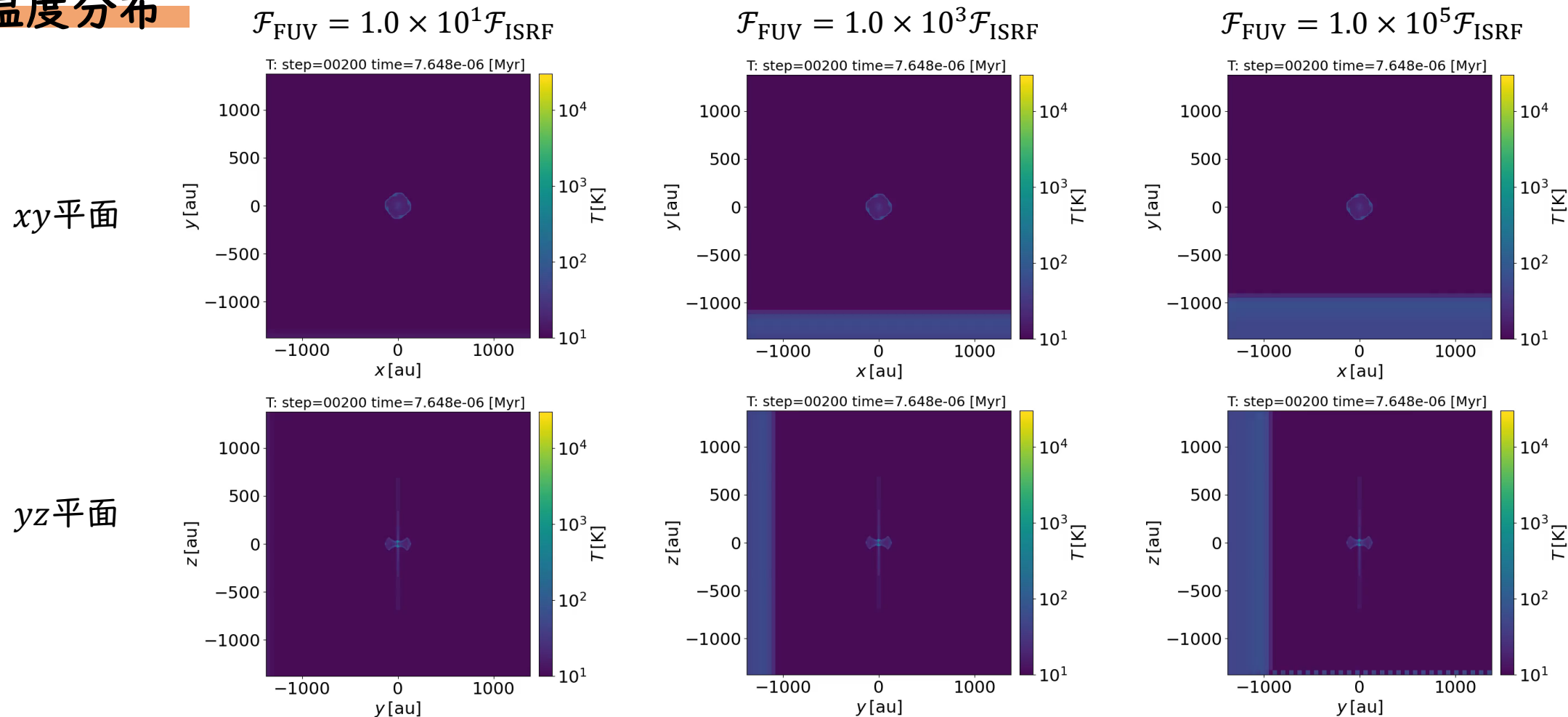
原始惑星系円盤に対してy軸負の方向から **Edge On** で輻射。
星間空間内の平均的なエネルギーフラックス $\mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ を基準に
3強度 ($\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^1 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$, $1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$, $1.0 \times 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$)

Results : Edge On

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

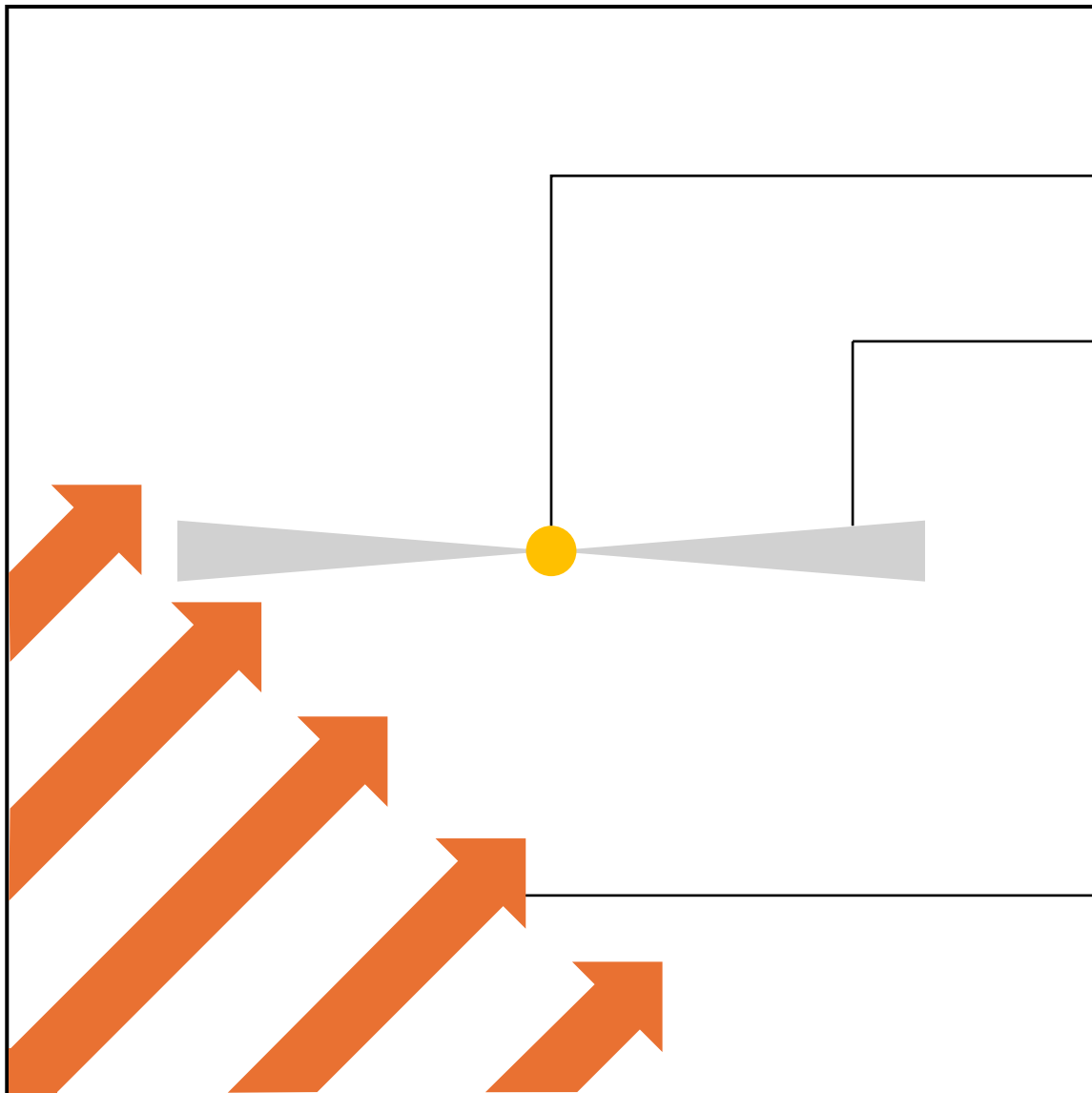
(星間空間内の平均的なエネルギーフラックス)

温度分布



- Face Onと同様に $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ においてFUVが支配的、 $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^1, 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ においてEUVが支配的。
- 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)

初期設定：ななめ方向



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

$$n_H = n_0 \left(\frac{R}{1\text{au}} \right)^{-9/4} \exp \left[-\frac{z^2}{2h^2} \right] \quad (\text{Nakatani et.al 2018})$$

$$\therefore h(\text{円盤の高さ}) = \frac{C_s (\text{音速})}{\Omega_k (\text{ケプラー速度})}$$

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。

外部輻射(FUV・EUV)

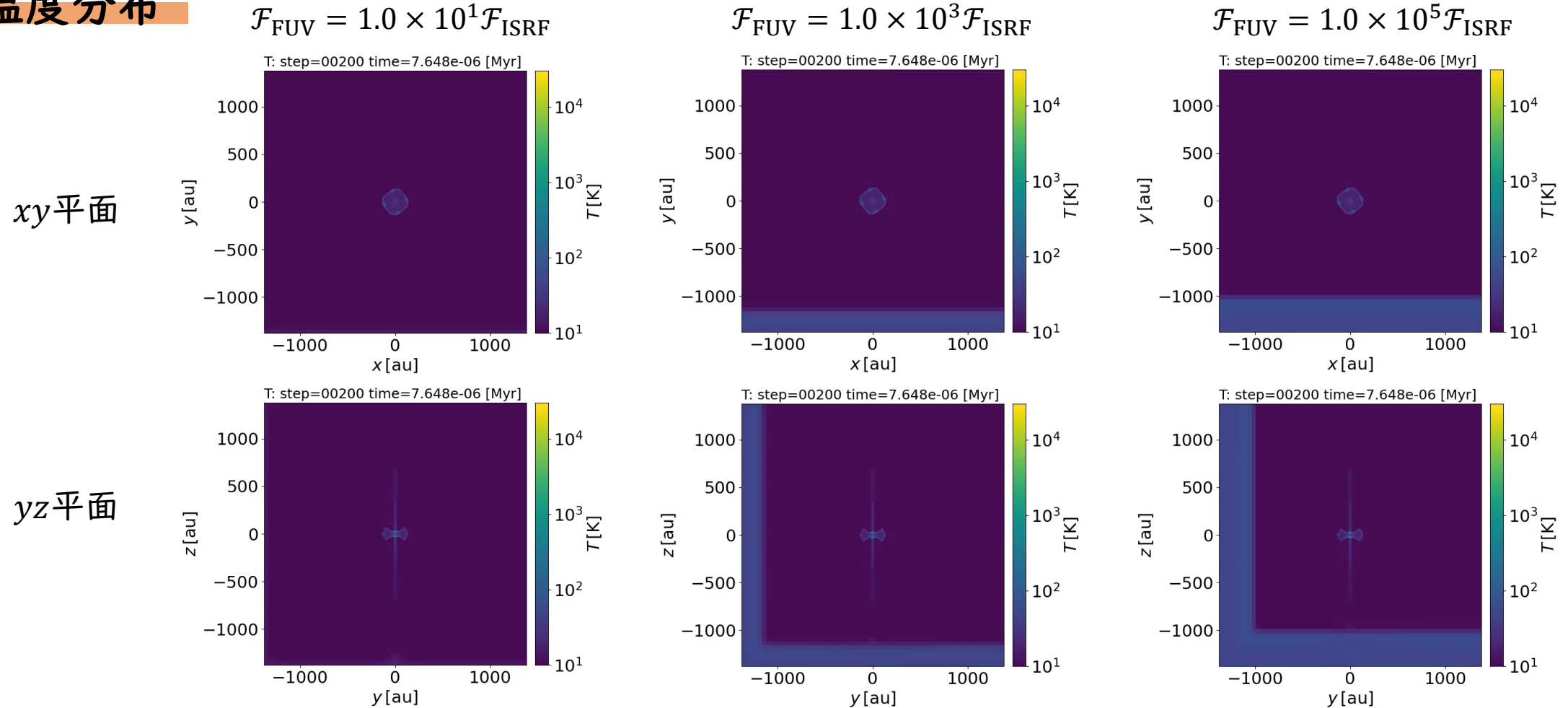
原始惑星系円盤に対して **ななめ方向** から輻射。
星間空間内の平均的なエネルギーフラックス $\mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ を基準に
3強度 ($\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^1 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$, $1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$, $1.0 \times 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$)

Results : ななめ方向

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

(星間空間内の平均的なエネルギーフラックス)

温度分布

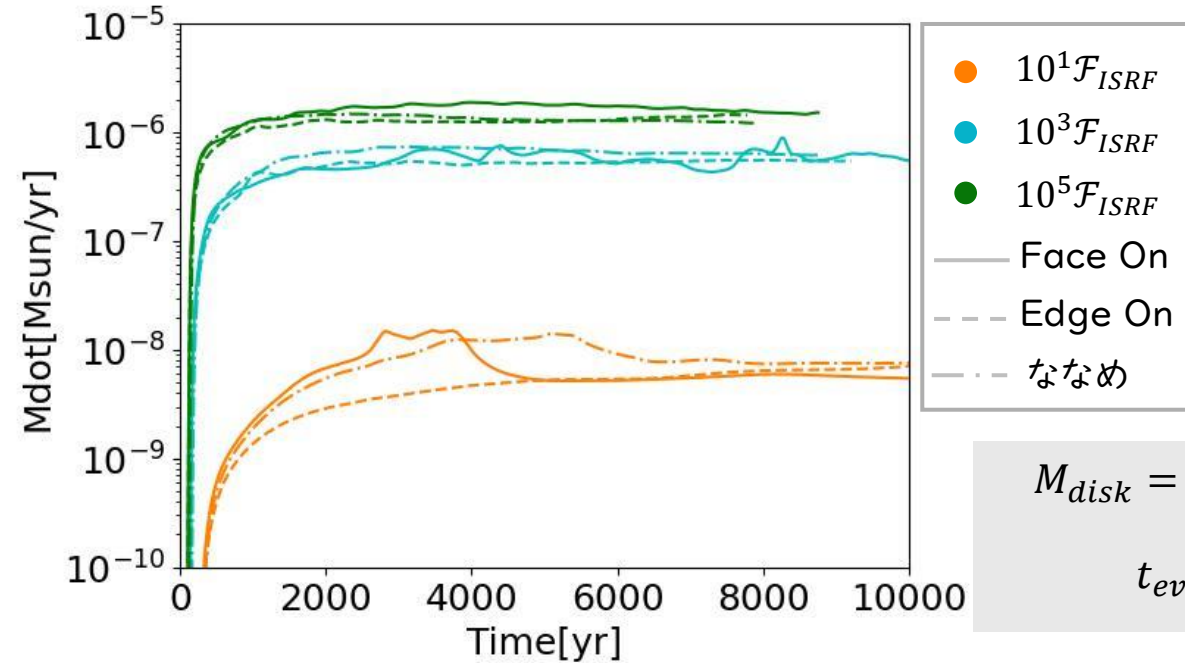
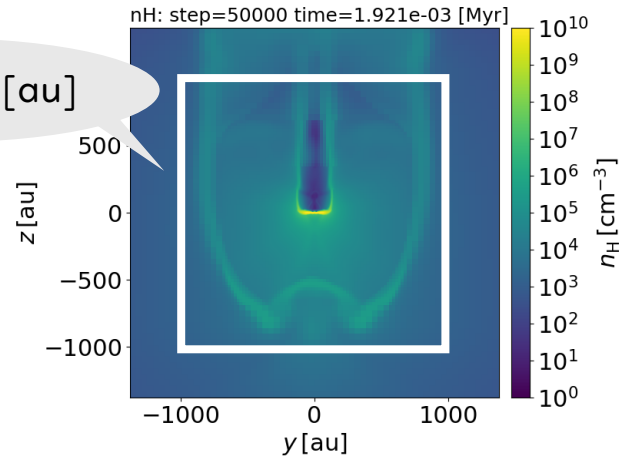


- ななめ方向でも同様に $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ においてFUV、 $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^1, 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ においてEUVが支配的。
- Edge Onでみられた円盤の歪みは、あまり見られない。

結果：蒸発率

以上9モデルの蒸発率を比較する。

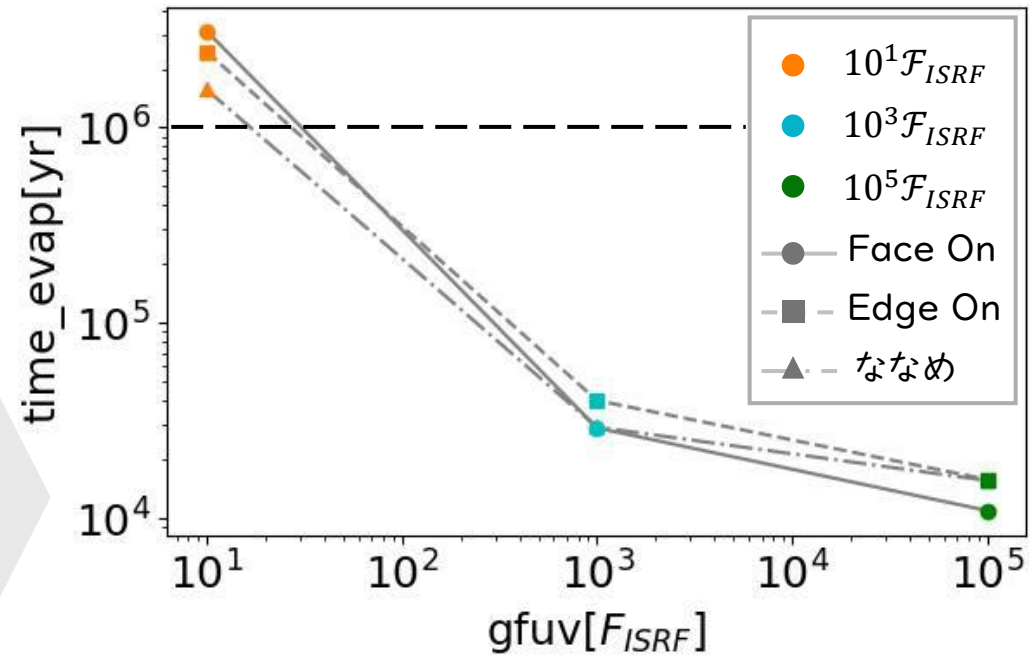
蒸発率は各タイムステップにおいて、1辺が2000auのボックスから出ていくガスの量。



蒸発率 \dot{M} の時間依存性

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

$$t_{evap} = \frac{M_{\odot}}{\dot{M}}$$



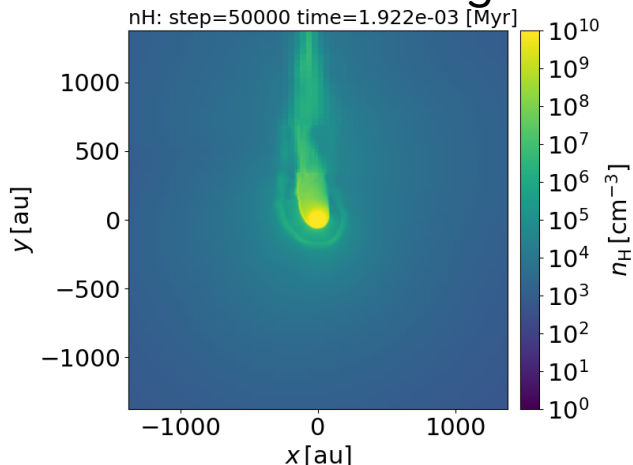
円盤が蒸発する時間の紫外線強度依存性

- 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**

Summary

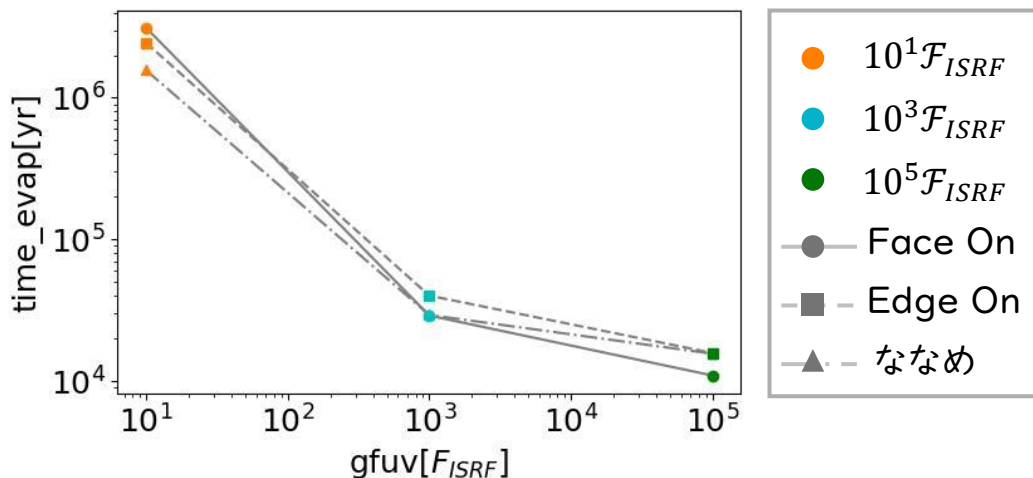
結果

Edge On・Face On・ななめ の3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を調べた。



- 輻射を与える方向によらず、 $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ においてはFUVが支配的、 $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^1 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$, $1.0 \times 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ においてはEUVが支配的となる蒸発構造が見られた。
- 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。

▶ 蒸発流の構造解析を行う必要がある。



円盤が蒸発するタイムスケールは外部輻射の強度に依存し、 $\mathcal{F}_{\text{FUV}} = 1.0 \times 10^3 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$, $1.0 \times 10^5 \mathcal{F}_{\text{ISRF}}$ で 10^4 [yr] のスケールになる。

▶ 中心星の輻射による蒸発 (10^6 [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

- 蒸発率 \dot{M} の円盤内位置依存性を調べる。
- 加熱源・冷却源の変化等のケミカル面の解析を行う。