

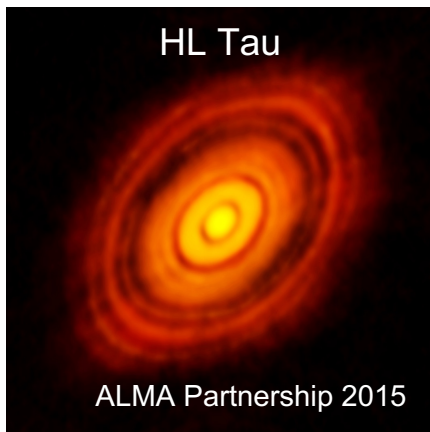
2022/09/01 14:15
国立天文台三鷹キャンパス
すばる棟大セミナー室
(オンライン)

ダスト成長シミュレーションを用いた なめらかな原始惑星系円盤の再現

京都大学理学部3年 北出直也
(指導教員：片岡章雅)

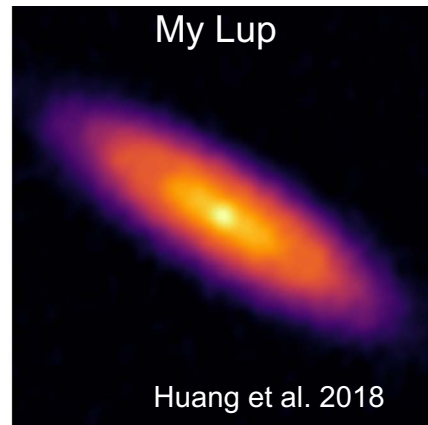
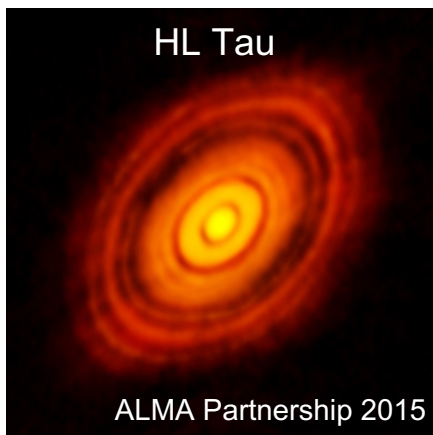
イントロダクション：原始惑星系円盤とは

- ・ 原始星を中心とする**惑星形成の舞台** ・ 中心星の周りにダストとガスが存在する
- ・ ダストはガスと相互作用しながらダスト同士で合体して成長したり中心星方向へ落ちたりする
- ・ 惑星が存在するとダストのせきとめが発生しギャップが生じると考えられている



イントロダクション：原始惑星系円盤とは

- ・ ALMA(ミリ波)で**ダスト分布**が見える
 - ・ 観測よりダストサイズは半径ミリメートルサイズと言われている
 - ・ 円盤内には乱流が存在しその強さはパラメータ α の大きさを表される
 - ・ ダストが壊れる衝突速度をフラグメンテーション速度と言う
- ・ ALMAで見ると主に**リング、ギャップ構造**がある
- ・ しかし**リングギャップ構造のない「なめらかな」構造**も

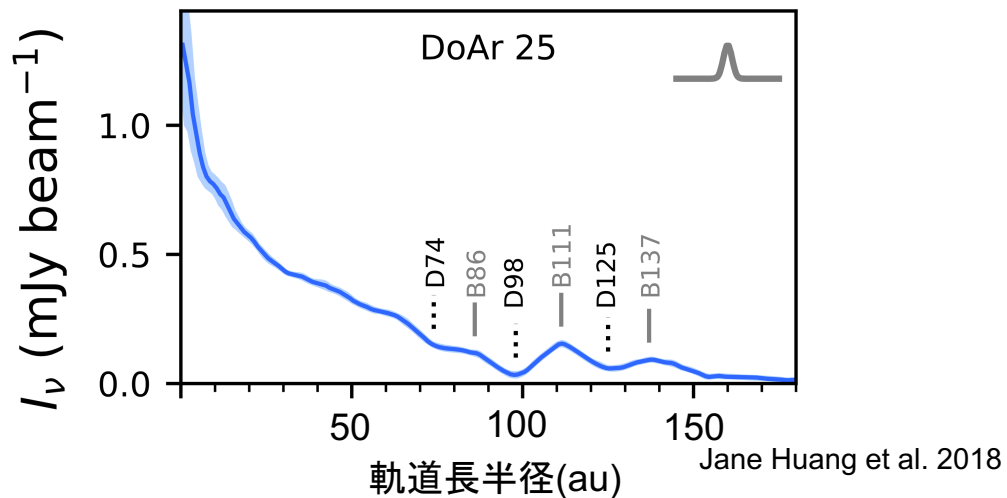
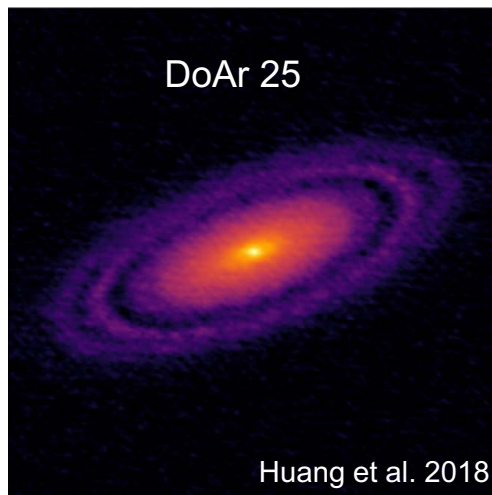


背景・問題意識

- ALMAで見えている円盤は 10^6 年程度たったもの
- 10^6 年たったガス分布のなめらかな円盤は明るい円盤は残せない

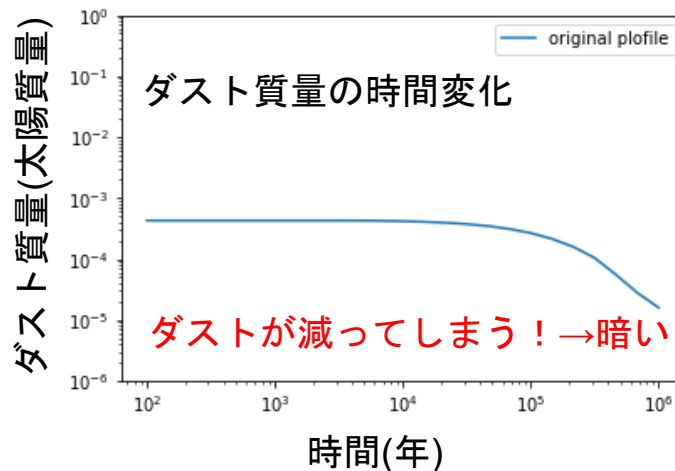
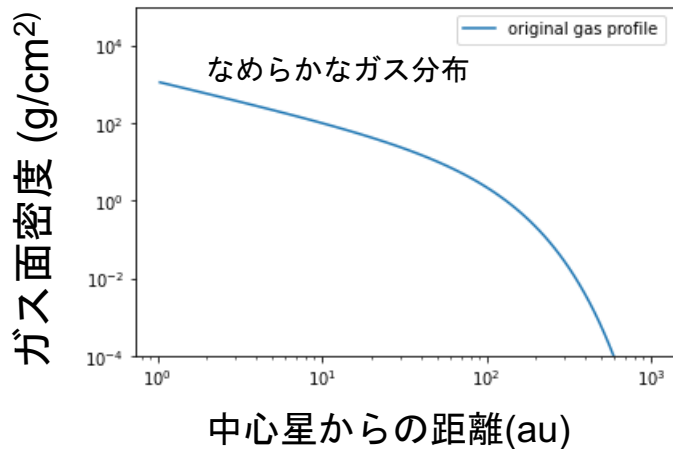
↑ダストが成長する前に中心星に落ちてしまう...

- 惑星があるとダストが落ちず明るい円盤になるがリング構造が現れる
- 軌道長半径約150 auまででなめらかかつ明るい円盤が見つかっている！



ガス分布がなめらかな円盤

- ・ ガス分布がなめらかだとダスト分布もなめらかになる
- ・ しかしダストの成長速度より中心星への落下速度の方が早い
- ・ 10^6 年経つとダストが中心星に落ちて暗くなる...



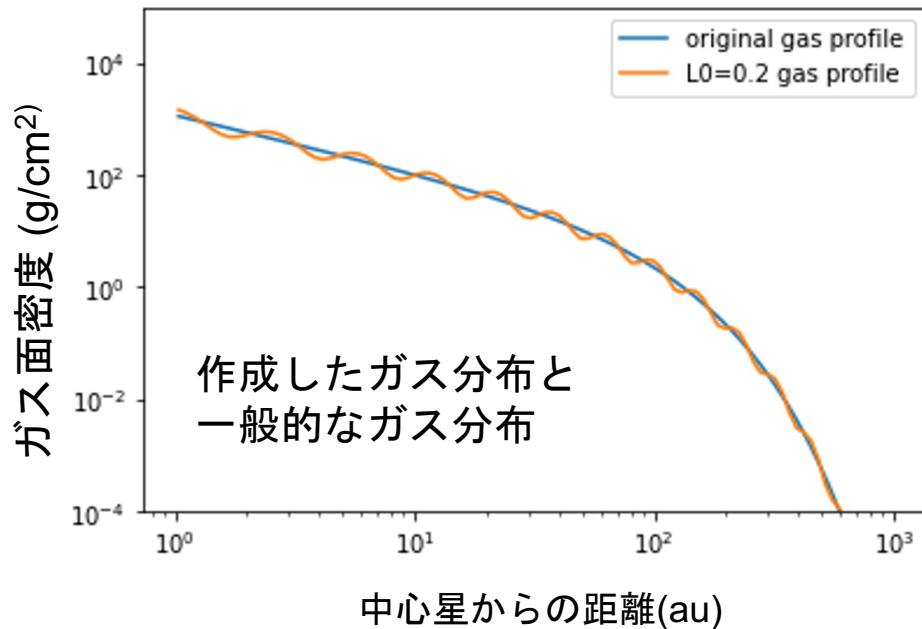
研究のアイデア

- ・ダストが中心星に落ちないような模擬的なガス分布を用意する
→ガスに**摂動を加え**圧力勾配でダストを捕らえる！
- ・なめらかで明るく、ダストが成長するために必要な**パラメータセット**を探す

$$\sum_{gas} = \sum_{original} \times \left(1 + A \cos \left(2\pi \frac{r}{L} \right) \right)$$

$$L = L_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^\beta$$

- ・ガス分布の関数はPinnila et al. 2012とKanagawa et al. 2017を参考にした



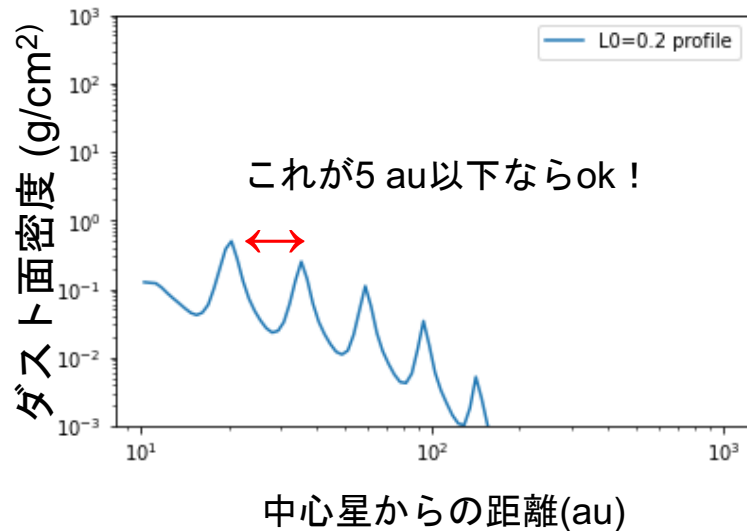
研究の方法

- ・ ダスト移流成長シミュレーションコード
dustpy(Stammler et al. 2022)を用いてシミュレーションした
- ・ ガス分布は時間変化なし
- ・ ガスに影響を受けるダストの成長と動径方向への移流を見ることができる

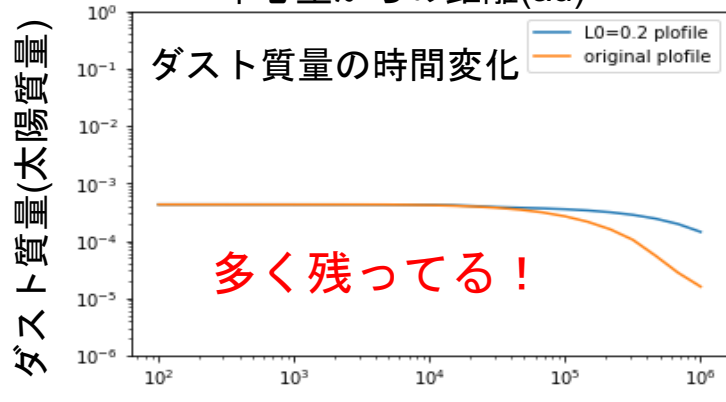
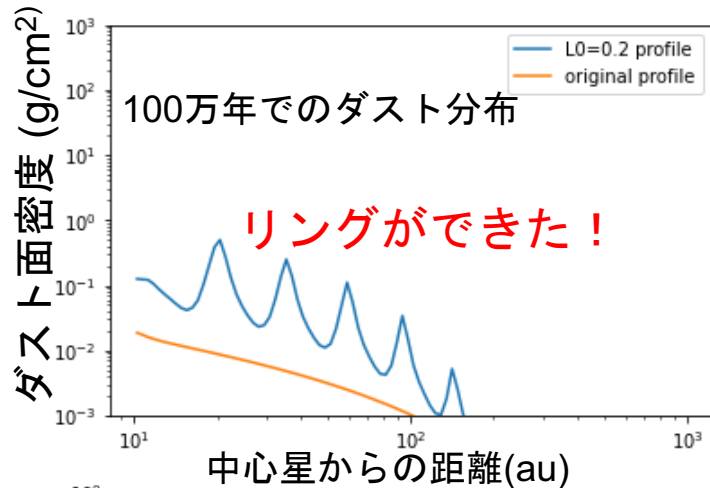
- ・ **なめらかな円盤を再現するパラメータセット**を探す
- ・ ALMAの空間分解能はおよそ5 au

- ・ 空間分解能5 auでなめらかな円盤とは
リング間の距離が5 au以下である時を指すとする

- ・ ダストサイズは1mm以上



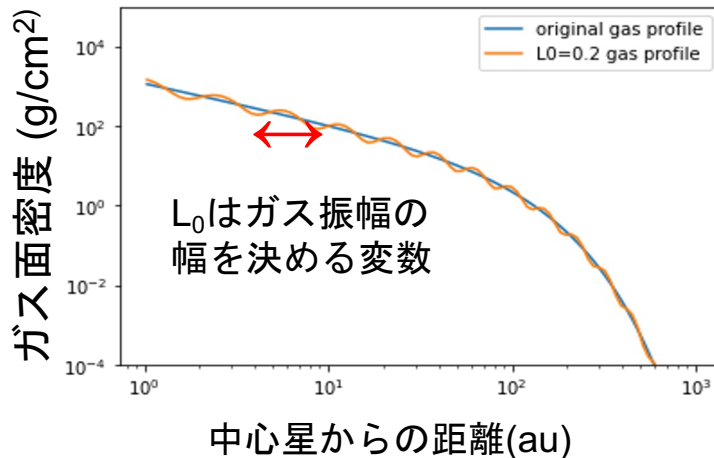
シミュレーションの結果($L_0=0.2$ au)



$$\sum_{gas} = \sum_{original} \times \left(1 + A \cos\left(2\pi \frac{r}{L}\right)\right)$$

$$L = L_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^\beta$$

用意したガス分布

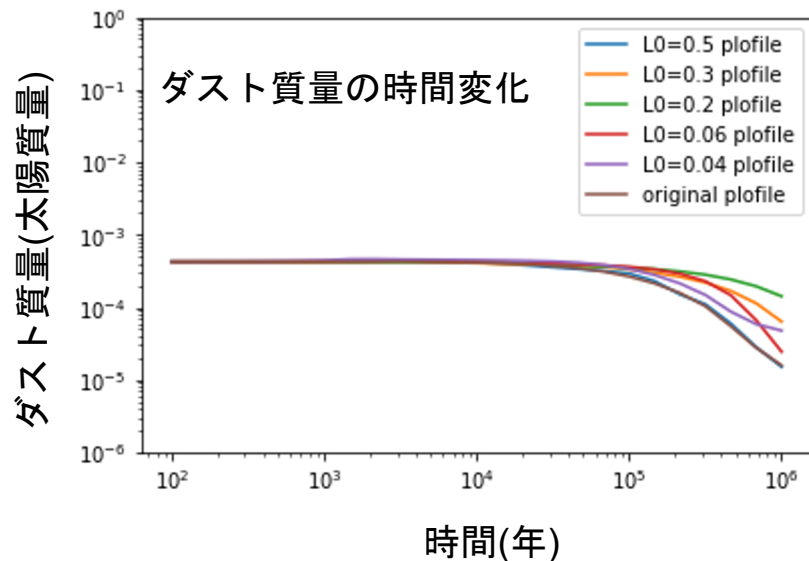
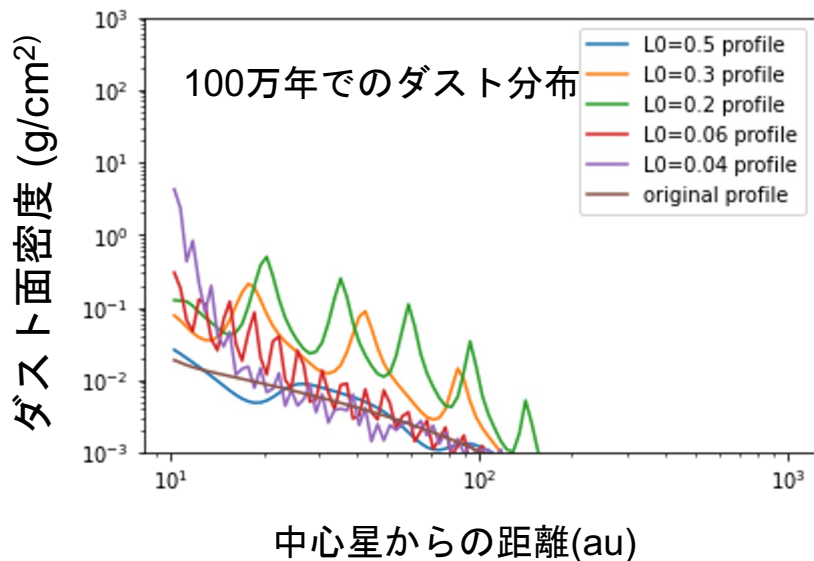


結果(L_0 auを変化させた場合)

- ・ L_0 auは振幅の幅を決める変数

$$\sum_{gas} = \sum_{original} \times \left(1 + A \cos\left(2\pi \frac{r}{L}\right)\right)$$

$$L = L_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^\beta$$



$L_0=0.04$ auと 0.06 auはリング間距離十分小さい！ $L_0=0.06$ auはちょっと少なすぎる...

ここまで分かったこと

$$\Sigma_{gas} = \Sigma_{original} \times \left(1 + A \cos\left(2\pi \frac{r}{L}\right)\right)$$

$$L = L_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^\beta$$

- ・ L_0 はガス振幅の幅を決める変数
- ・ なめらかな円盤(リング間距離5 au以内)を作るには→

$L_0=0.04$ auもしくは 0.06 au

- ・ その上で明るい円盤となるには→

$L_0=0.04$ auは明るい！

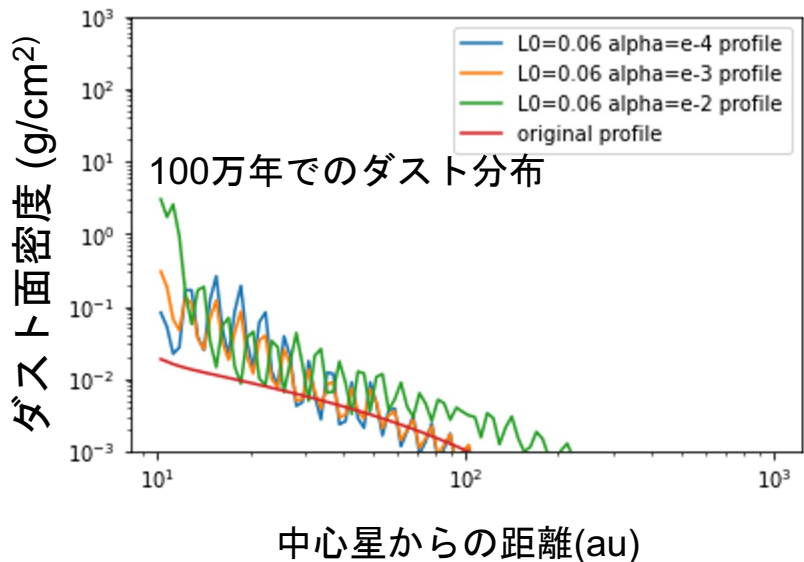
$L_0=0.06$ auはこのままだと暗い...



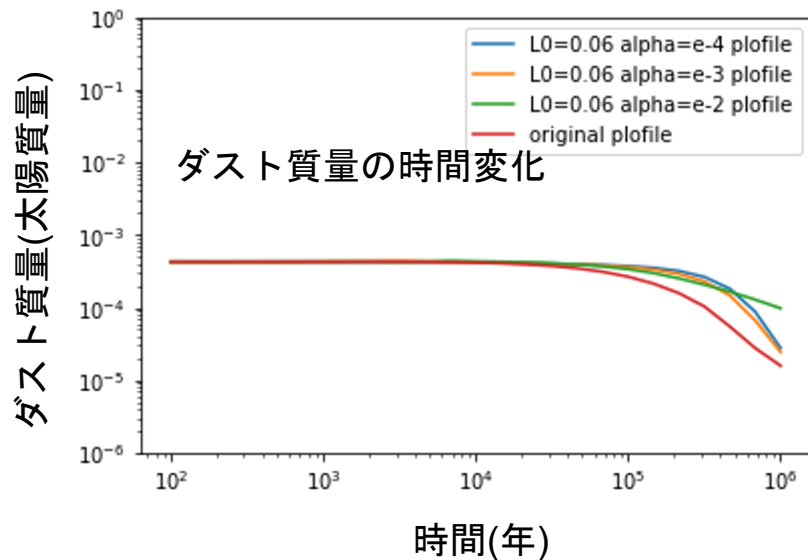
$L_0=0.06$ auに対して他のパラメータを変えてみる！！

結果($L_0=0.06$ auについて乱流係数 α を変化させた場合)

- ・ α は乱流変数
- ・ α の値としては 10^{-3} が期待されている



どれもリング間距離十分せまい！



$\alpha=10^{-2}$ なら十分残る！

議論

- $L_0=0.04$ auと 0.06 auが明るく滑らかな

円盤を最もよく再現

- 上の L_0 の値に対応する惑星の質量は、前述のガス分布関数

$$\sum_{dust} = \sum_{original} \times \left(1 + A \cos\left(2\pi \frac{r}{L}\right)\right)$$

$$L = L_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^\beta$$

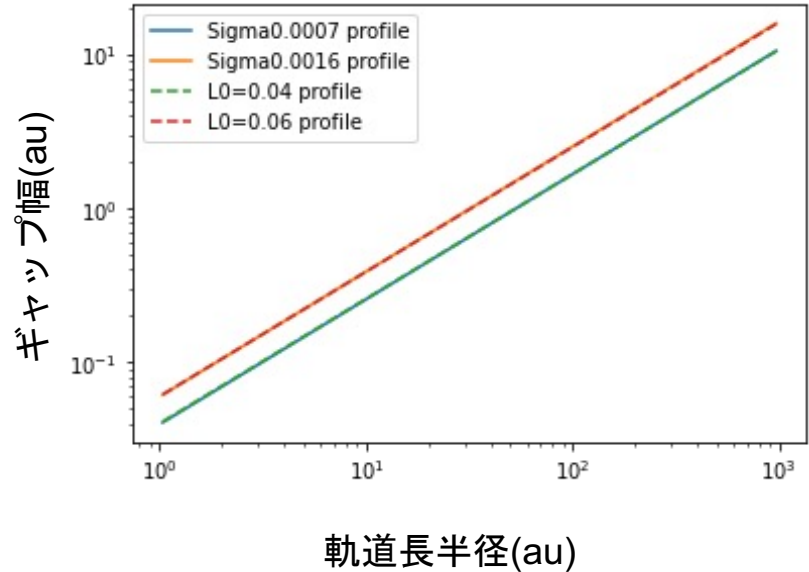
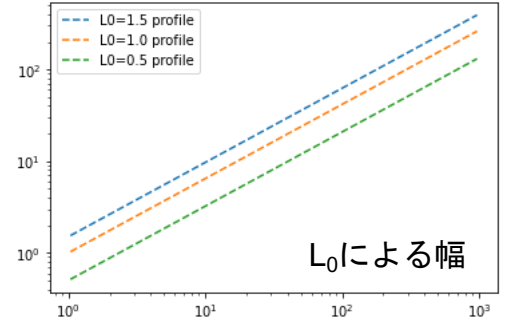
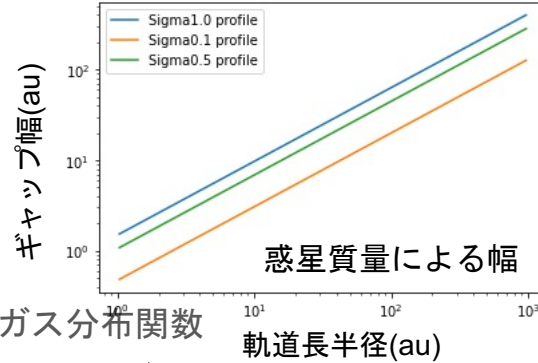
が、ガス分布の経験則を示したKanagawa et al. 2017 の式

$$\Delta r = 0.66 \sqrt[4]{K' r}$$

$$K' = \left(\frac{M_{planet}}{M_{star}}\right)^2 \left(\frac{H_p(r)}{r}\right)^{-3} \alpha^{-1}$$

を満たすようにとる。

→ $L_0=0.04$ auは 7×10^{-4} 木星質量、 $L_0=0.06$ auは 1.6×10^{-3} 木星質量と求まる。

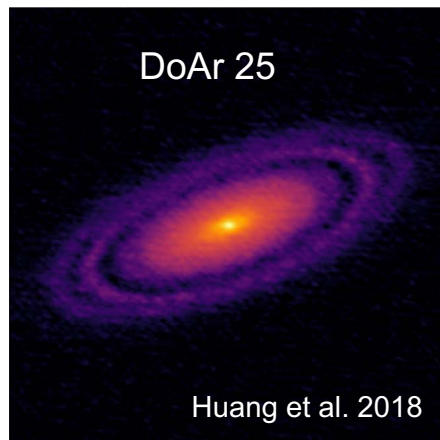


議論2

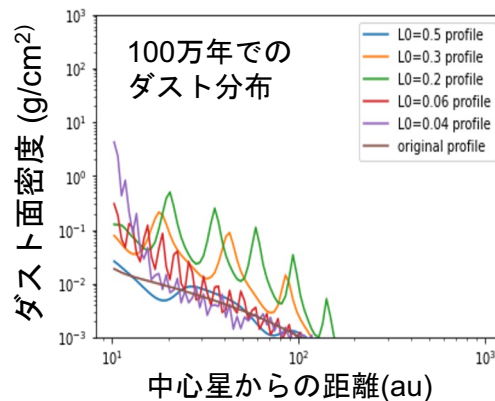
- ・ ガスの振幅の大きさに関するパラメータA、フラグメンテーション速度について今回は $A=0.5$ 、 $V_{\text{frag}}=10^3$ cm/sを試しただけなので、値を変えると結果が大きく変わる可能性がある。今後の課題である。
- ・ $L_0=0.04$ や 0.06 の際のガスはパータベーションが細かい分、半径方向のグリッド幅が十分細かいと言えるか疑わしい。
- ・ 「なめらか」な円盤の定義について、今回はリング間距離が空間分解能の5 au以下の場合としたが正確にはシミュレーションの結果を疑似観測すべきである。またリングの定義は極大値をとる部分としたが再考の余地がある。

まとめ

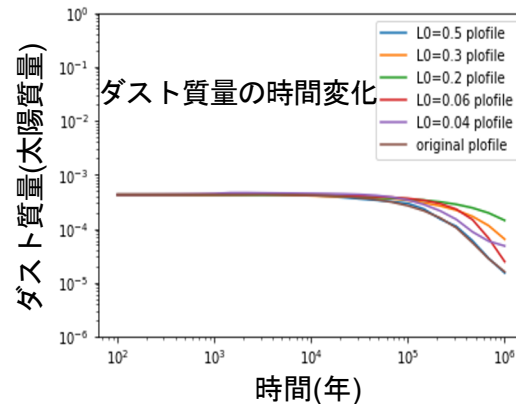
- ALMA観測で得られたなめらかかつ明るい円盤が形成される条件を考えた



- 100万年たった円盤が明るくなめらかであるためには、ガスの摂動のパラメータについて $L_0=0.04$ auという条件が得られた
これは 7×10^{-4} 木星質量の惑星によるギャップが必要であることを示している



- 乱流係数 $\alpha=10^{-2}$ cm/s、つまり強乱流の円盤では $L_0=0.06$ auの摂動、つまり 1.6×10^{-3} 木星質量の惑星で再現可能である



- 試せていないパラメータセットも多数あるので今後の課題

補足1

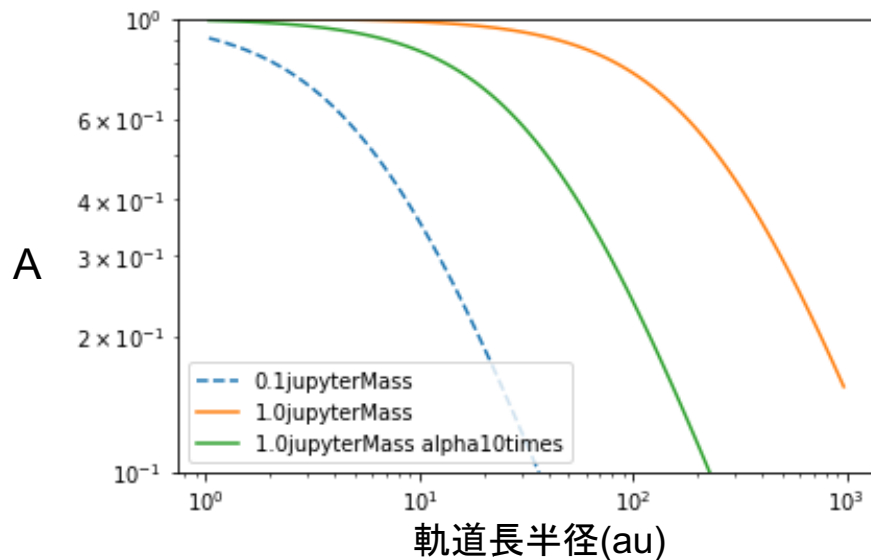
- ・ 結果スライドで示したシミュレーションの結果は、

$$A=0.5 \quad \beta=0.81 \quad r_0=1 \text{ au} \quad V_{\text{frag}}=e3 \text{ cm/s}$$

のパラメータセットでe6年たった時のもの

- ・ Σ_{original} はdustpyが与える攪乱のないダストの分布を用いた

- ・ Aの中心星からの距離、惑星質量に対する依存性をグラフに示す



補足2

- ・ β の値はKanagawaの関数で定められたギャップの幅 Δr から計算した

$$\Delta r = 0.66 \sqrt[4]{K' r}$$

$$K' = \left(\frac{M_{planet}}{M_{star}}\right)^2 \left(\frac{H_p(r)}{r}\right)^{-3} \alpha^{-1}$$

ただし H_p はスケールハイト
これをグラフに表す
この傾きが β である($\beta=0.81$)

