

初代星・初代銀河研究会2023

低金属量原始惑星系円盤における ダストリング形成

松木場 亮喜 (京都)

共同研究者

E. I. Vorobyov (Univ. of Vienna)

細川 隆史 (京都大学)

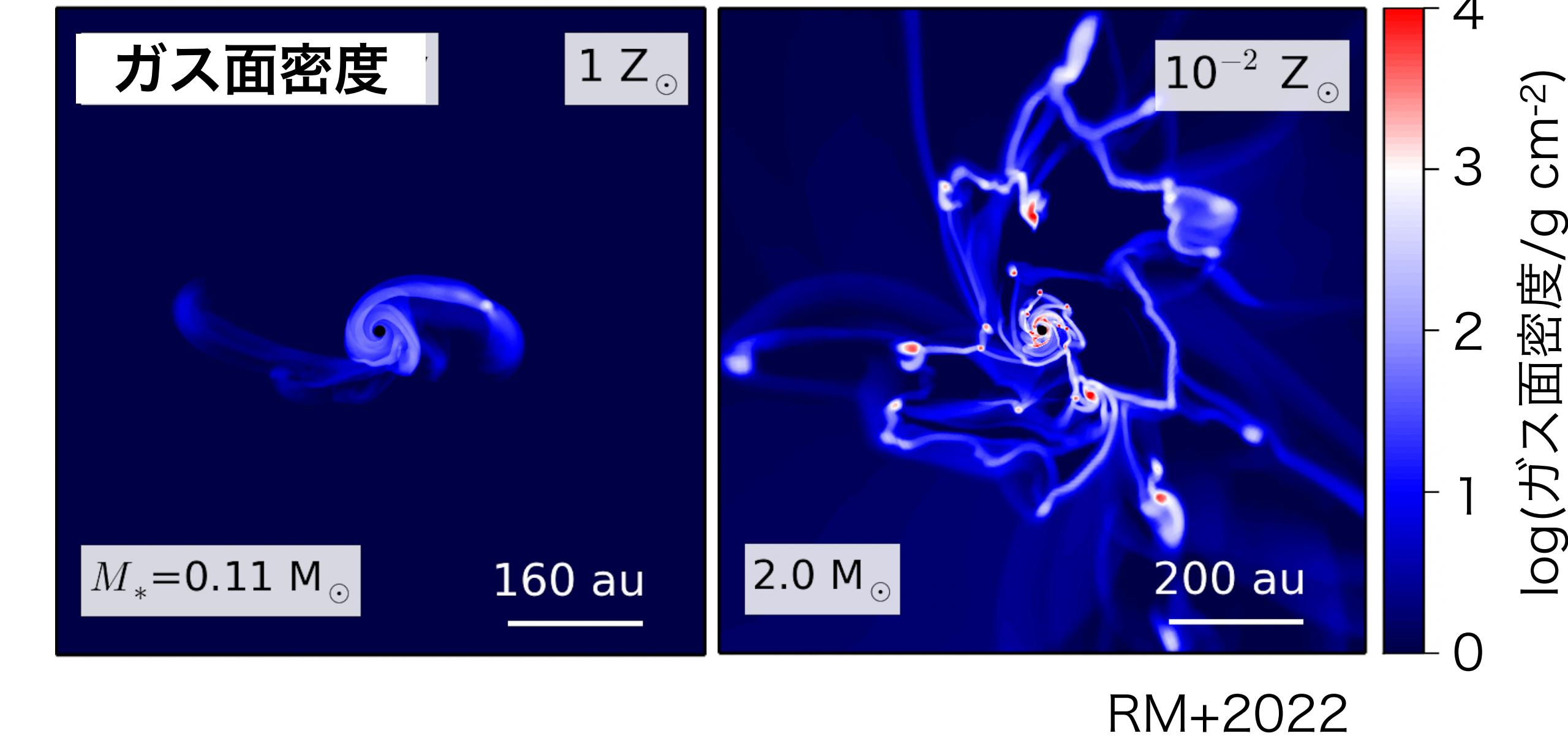


円盤分裂の金属量依存

- ・金属量 $10^{-2} - 10^{-5}$ Zsunで分裂が激しい
- ・高金属量(> 0.1 Zsun)では比較的安定
 - e.g. Tanaka & Omukai 2014, Machida & Nakamura 2015, Chon et al. 2021, RM+22

金属量依存がある原因

ダスト量が違うことでダスト冷却の効き方が異なるから



ガス-ダスト2流体の効果は分裂の金属量依存性へ影響しないのか？

分裂を抑える？

高密度領域にダストが集積 → 実効的に金属量を上げる

分裂を促進する？

ダストはドリフトでガスより先に降着 → 実効的に金属量を下げる

本研究の概要

疑問

ガス-ダスト2流体の効果は円盤分裂にどれほど影響するのか？

やること

ガスとダスト2流体の数値計算を行い、原始惑星系円盤の形成と進化を長時間 (~700 kyr) 追跡

→ 他の多次元計算よりも長い

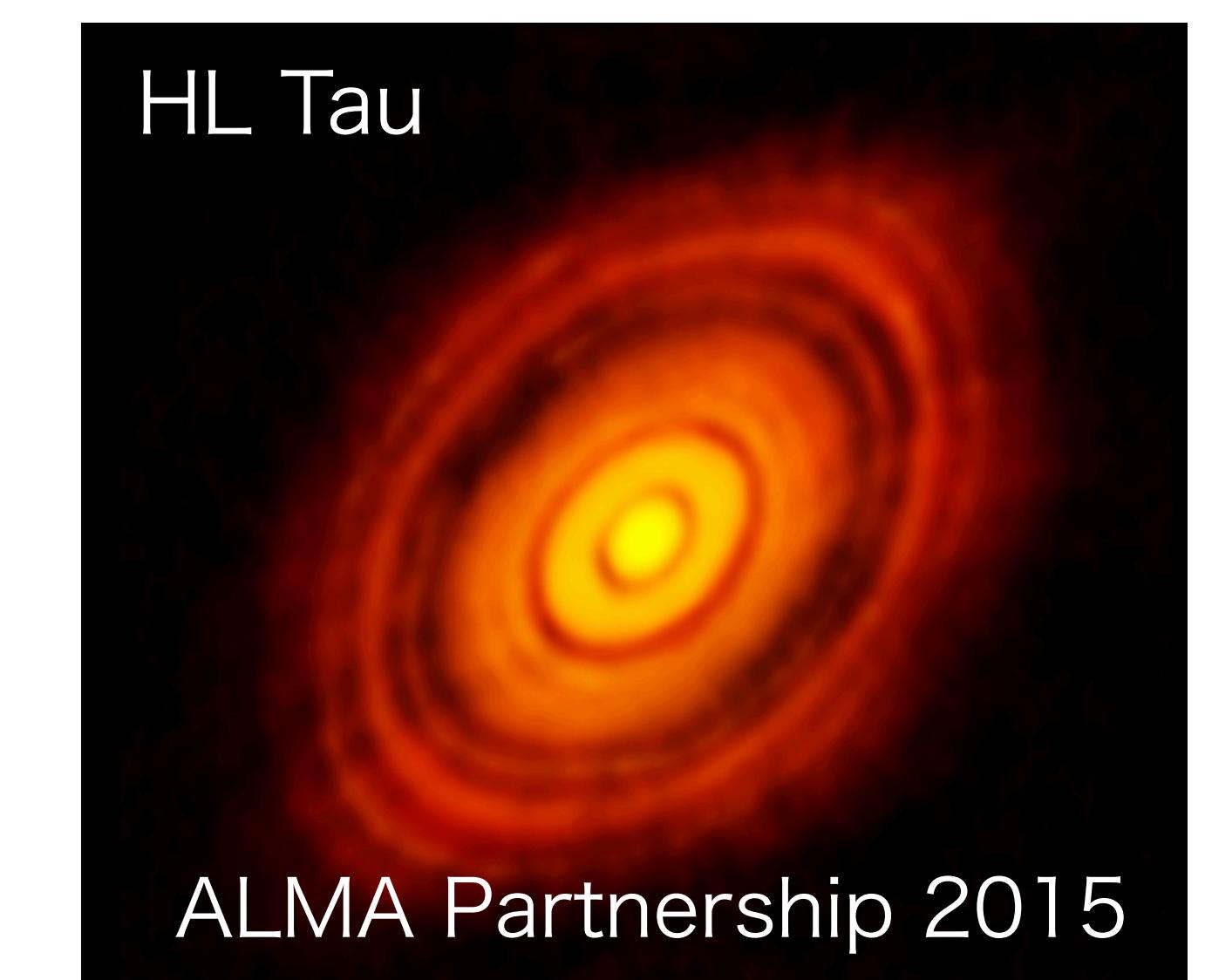
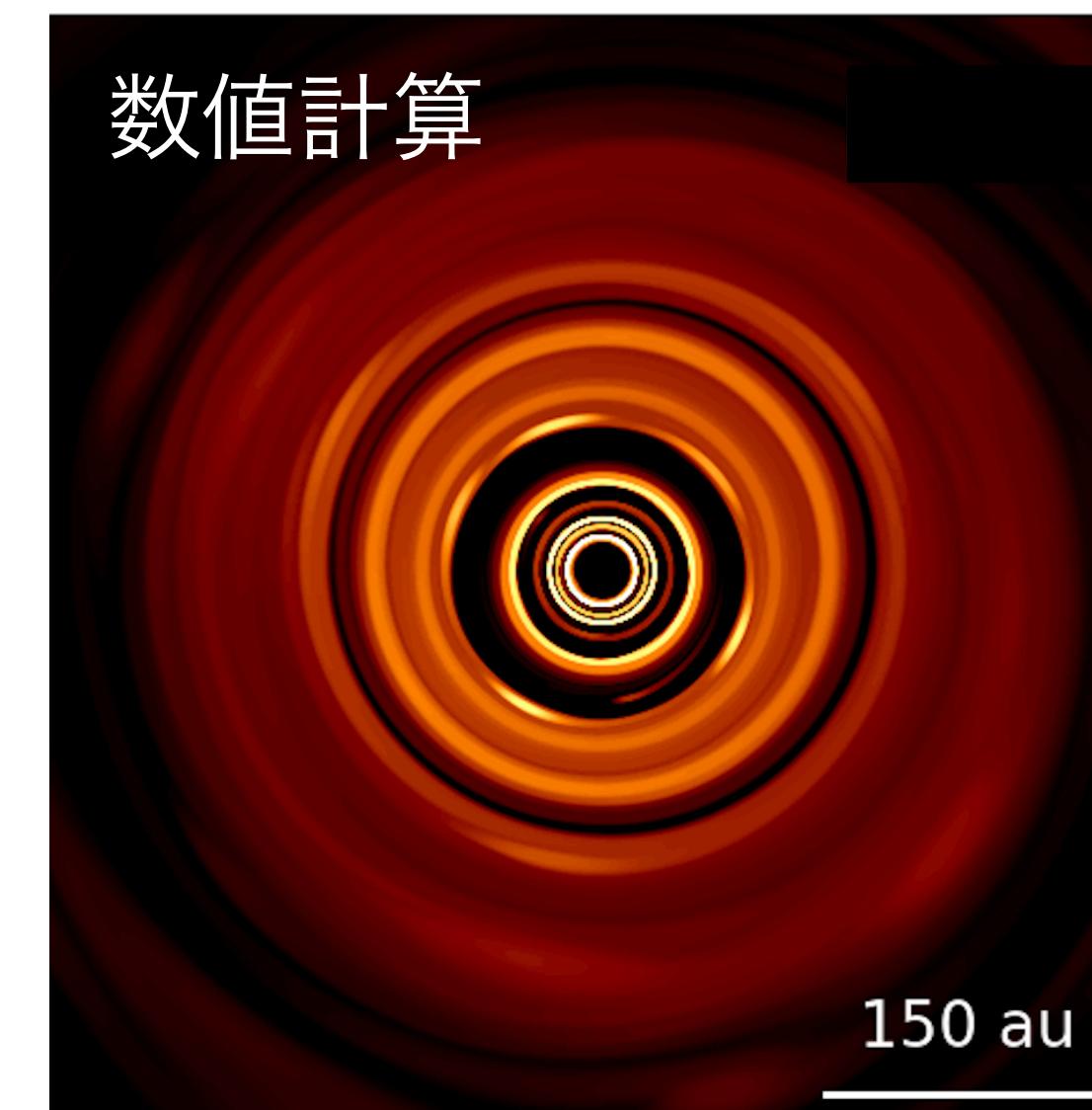
ダストの成長やダイナミクスはダスト量に依存する → ダスト-ガス質量比 10^{-2} - 10^{-4} の範囲で調査

金属量で表すと、 $1\text{-}10^{-2}$ Zsunに相当

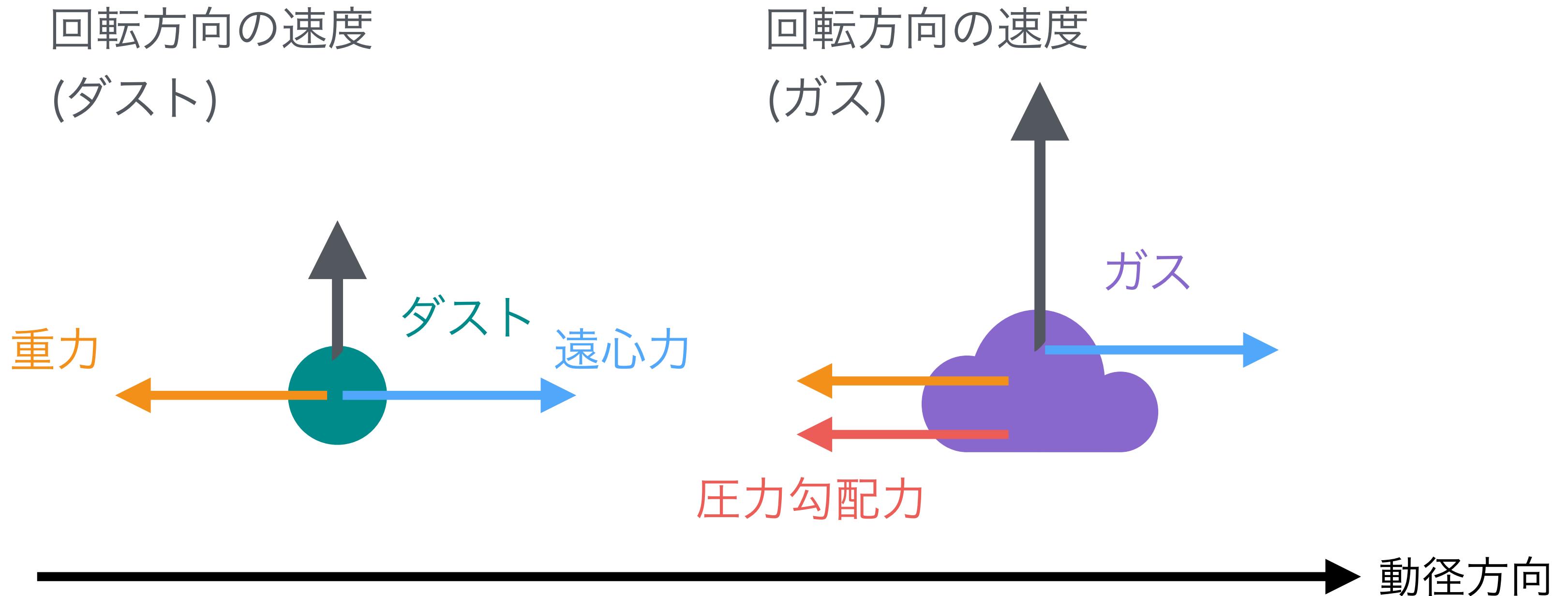
発見

多重のダストリングが現れた！

→ 円盤分裂ではなく、
ダストリング形成に注目していく

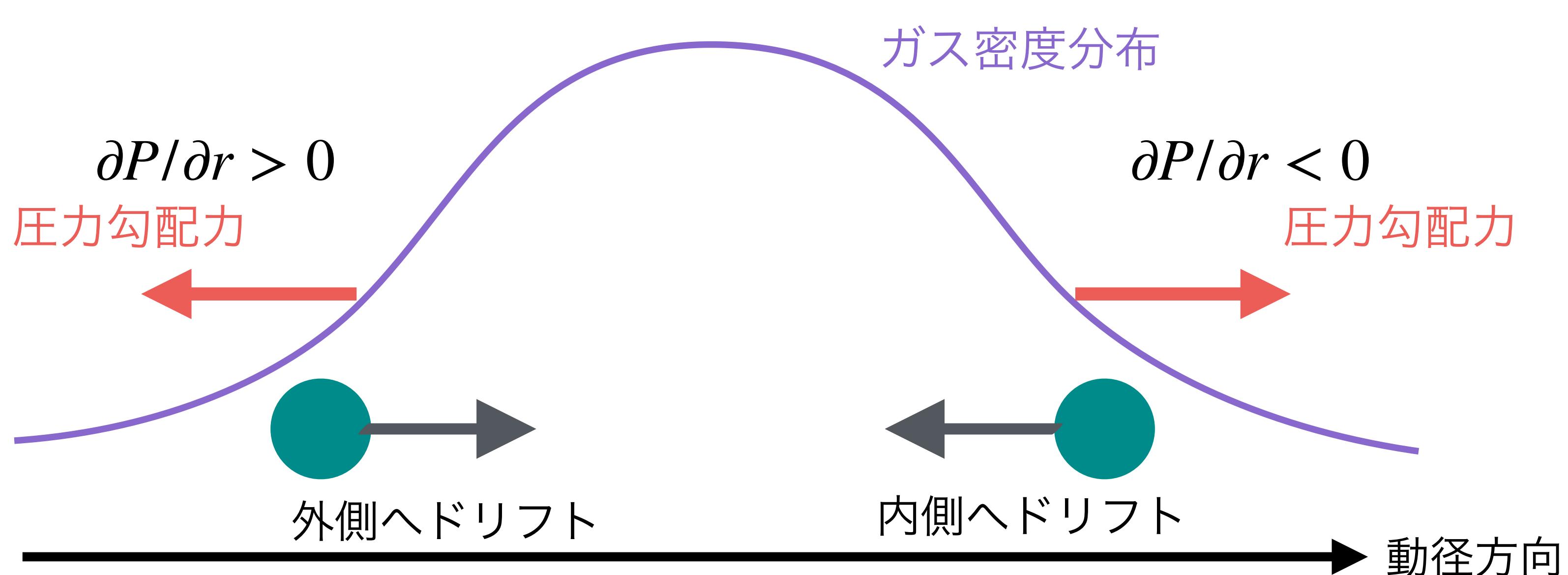


ダストのドリフト運動



- $\partial P / \partial r < 0$ のとき
ダストは向かい風を受ける
内側へドリフト運動
- $\partial P / \partial r > 0$ のとき
ダストは追い風を受ける
外側へドリフト運動

ダストのドリフト運動



- $\partial P / \partial r < 0$ のとき
ダストは向かい風を受ける
内側へドリフト運動
- $\partial P / \partial r > 0$ のとき
ダストは追い風を受ける
外側へドリフト運動

圧力バンプがあると、その中央にドリフト運動によってダストが集積する

→ ダストリングができるかもしれない

2次元数値流体シミュレーション

2次元極座標系 (face-on view), グリッド数 1024x1024, 中心に10 auのシンクセル, 計算領域外縁 10^4 au

基礎方程式

ガス

- EOC for gas

$$\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_g \mathbf{u}) = 0$$

- EOM for gas

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Sigma_g \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\Sigma_g \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla P + \Sigma_g \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\Pi} - \Sigma_{d,gr} \mathbf{f}$$

- energy eq.

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e \mathbf{u}) = -P(\nabla \cdot \mathbf{u}) - Q + (\nabla \mathbf{u}) : \boldsymbol{\Pi}$$

ダスト

- EOC for small dust

$$\frac{\partial \Sigma_{d,sm}}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_{d,sm} \mathbf{u}) = -S(a_{max})$$

- EOC for grown dust

$$\frac{\partial \Sigma_{d,gr}}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_{d,gr} \mathbf{v}) = S(a_{max})$$

- EOM for grown dust

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Sigma_{d,gr} \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\Sigma_{d,gr} \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \Sigma_{d,gr} \mathbf{g} + \Sigma_{d,gr} \mathbf{f}$$

分子冷却 (H_2 , HD), ガスとダストの熱放射

金属輝線 (CII, OI), 化学冷却, **中心星輻射**

ダストモデル

small dustとgrown dustの2成分に分ける

ダストの運動

small dustはガスにcoupleして運動

grown dustはガスにdecoupleして運動

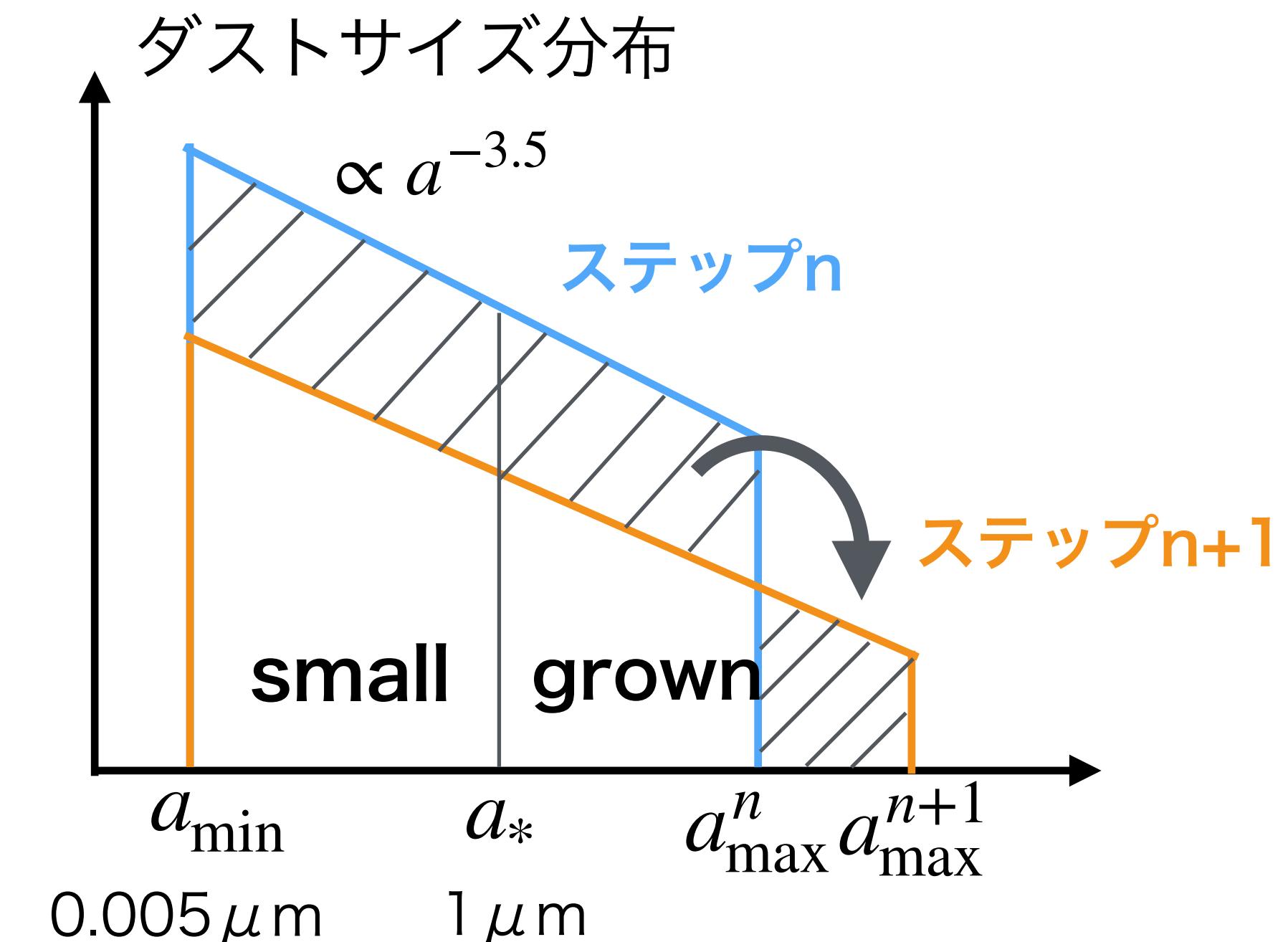
→ ガスとダストの非一様な分布を作る

$$\text{drag force } \mathbf{f} = (\mathbf{u} - \mathbf{v})/t_{\text{stop}}, \quad t_{\text{stop}} = \rho_s a / \rho_g c_s \propto a$$

ダストのサイズ成長

同サイズのダスト衝突による成長モデル

最大ダストサイズ a_{\max} を計算



初期条件

重力的に不安定なガス雲の崩壊からスタート

3つのモデルで計算

- ・ダスト-ガス質量比 : $10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$

- ・ガス雲質量 : 0.9 Msun

- ・ガス雲のエネルギー比

$$(\text{熱}) / (\text{重力}) = 0.7$$

$$(\text{回転}) / (\text{重力}) = 7 \times 10^{-3}$$

- ・温度は空間一様

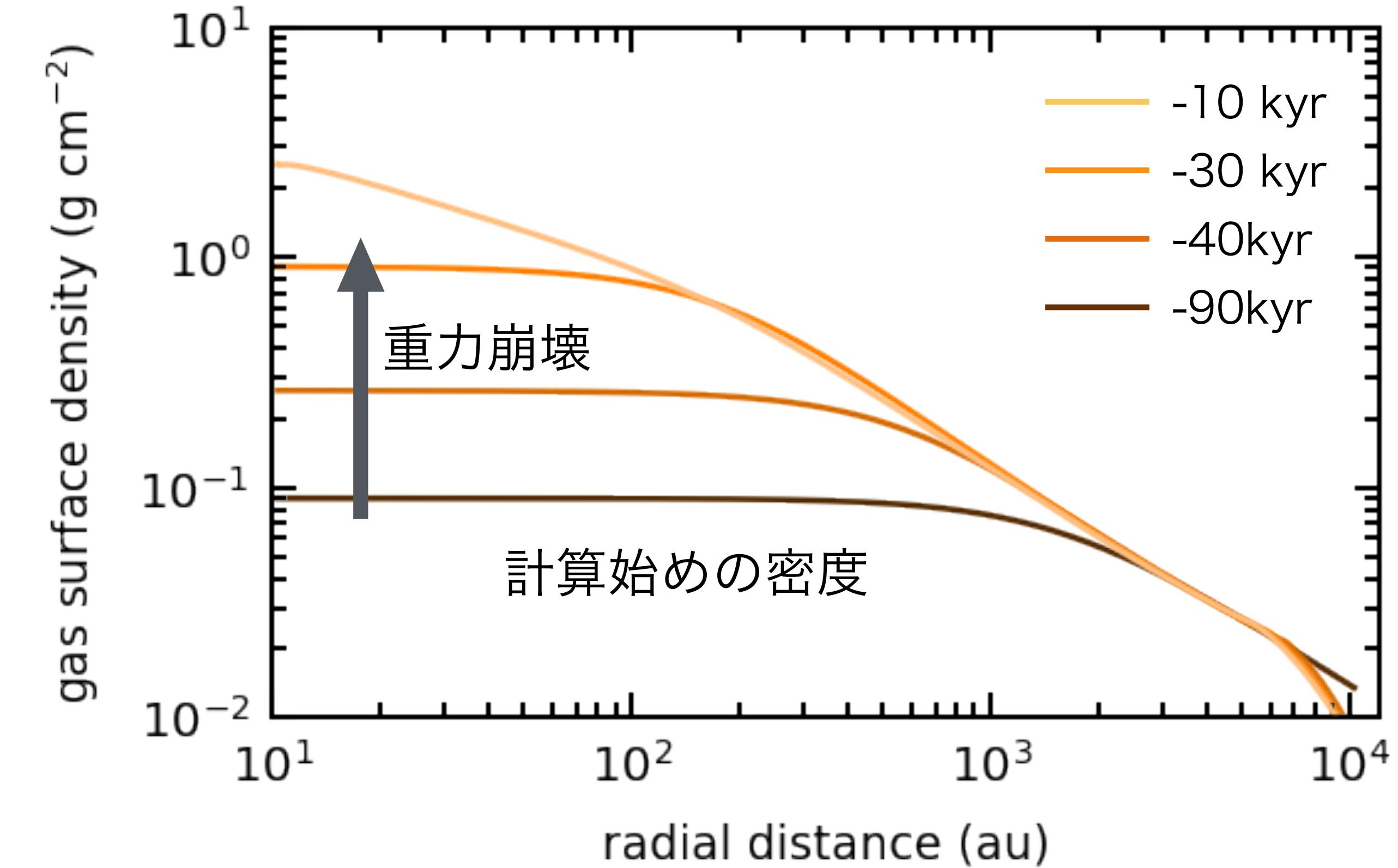
10 K (ダスト-ガス質量比 $10^{-2}, 10^{-3}$)

30 K (ダスト-ガス質量比 10^{-4})

空間一様10 Kの外部輻射場を導入 フロア温度

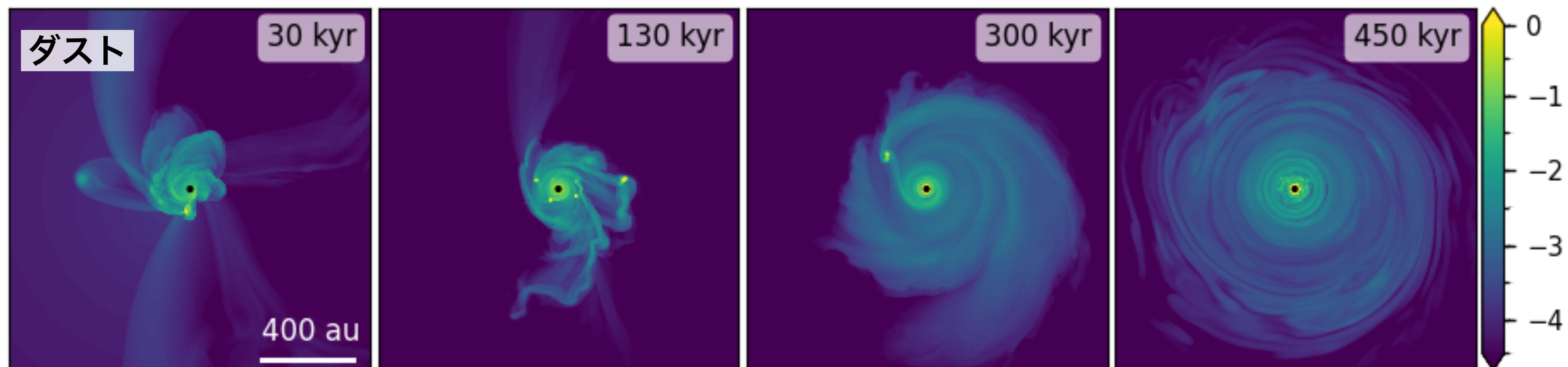
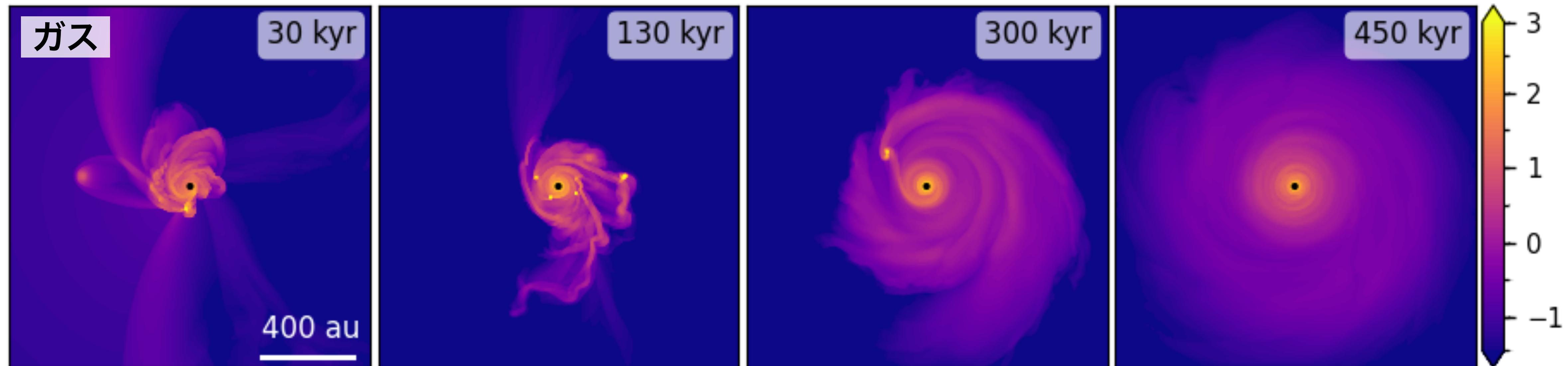
円盤形成後、700 kyrまで計算

例: ダスト-ガス質量比 10^{-2} 円盤ができた時間を 0 kyr



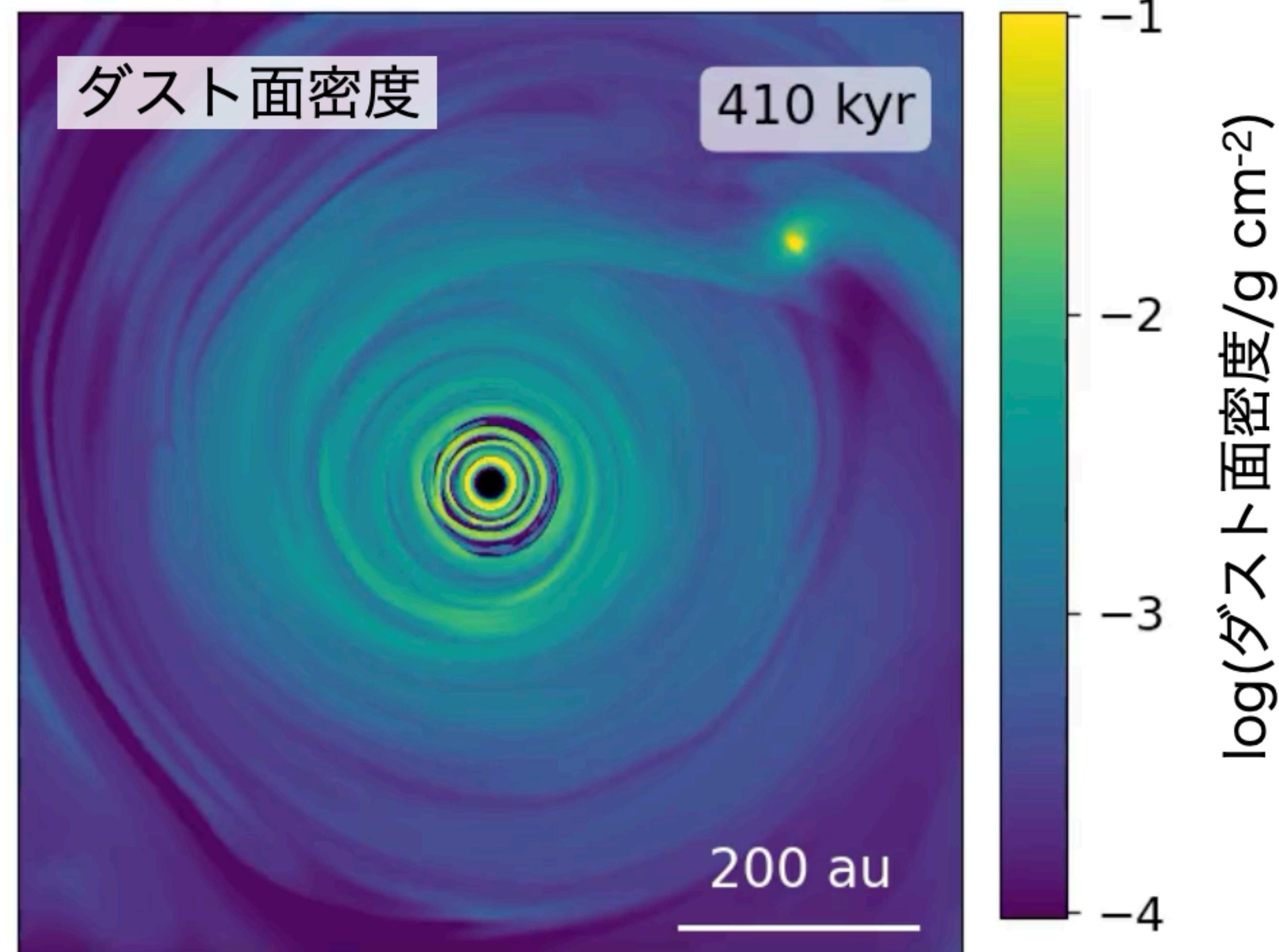
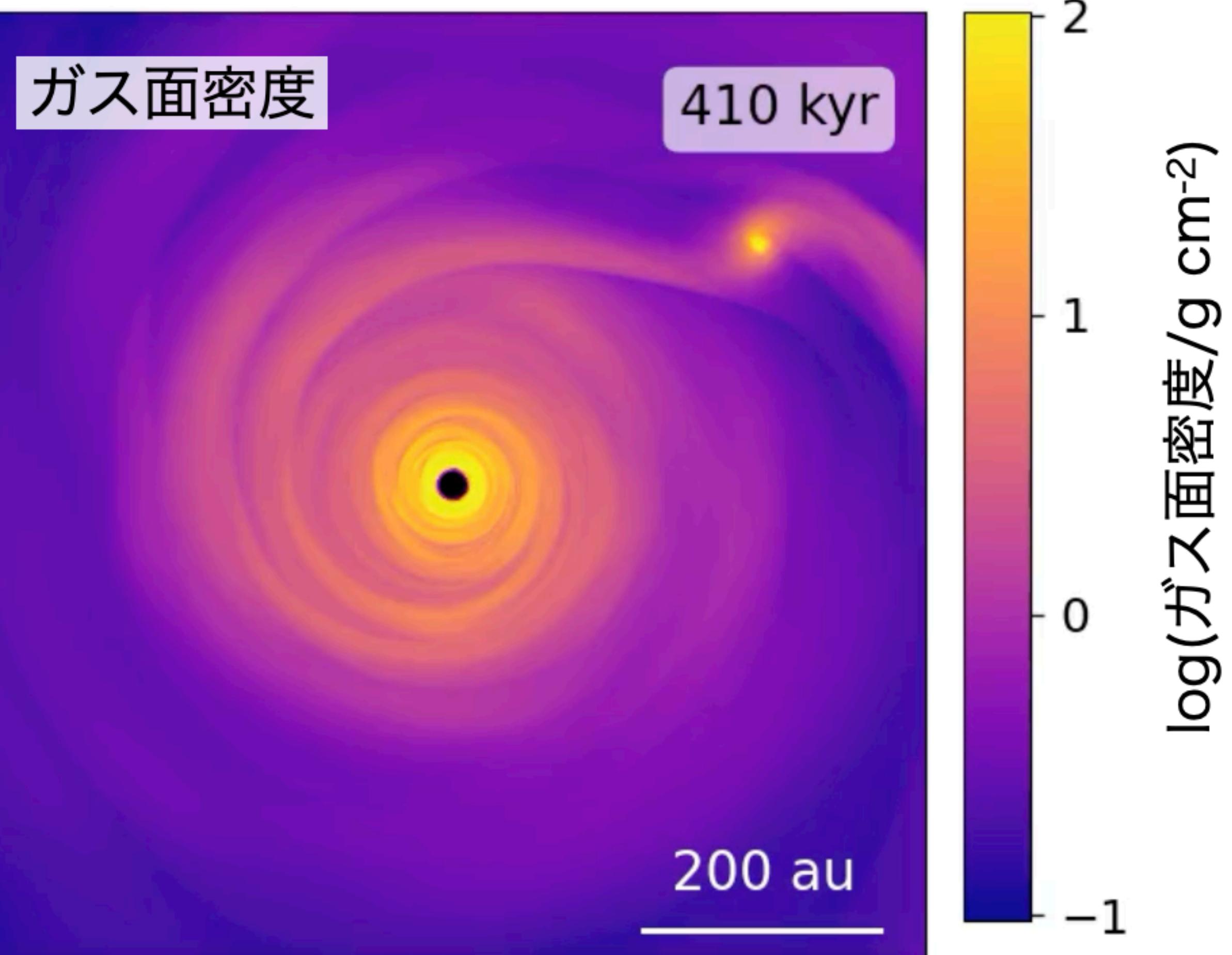
円盤の形成と進化

ダスト-ガス質量比 10^{-3}

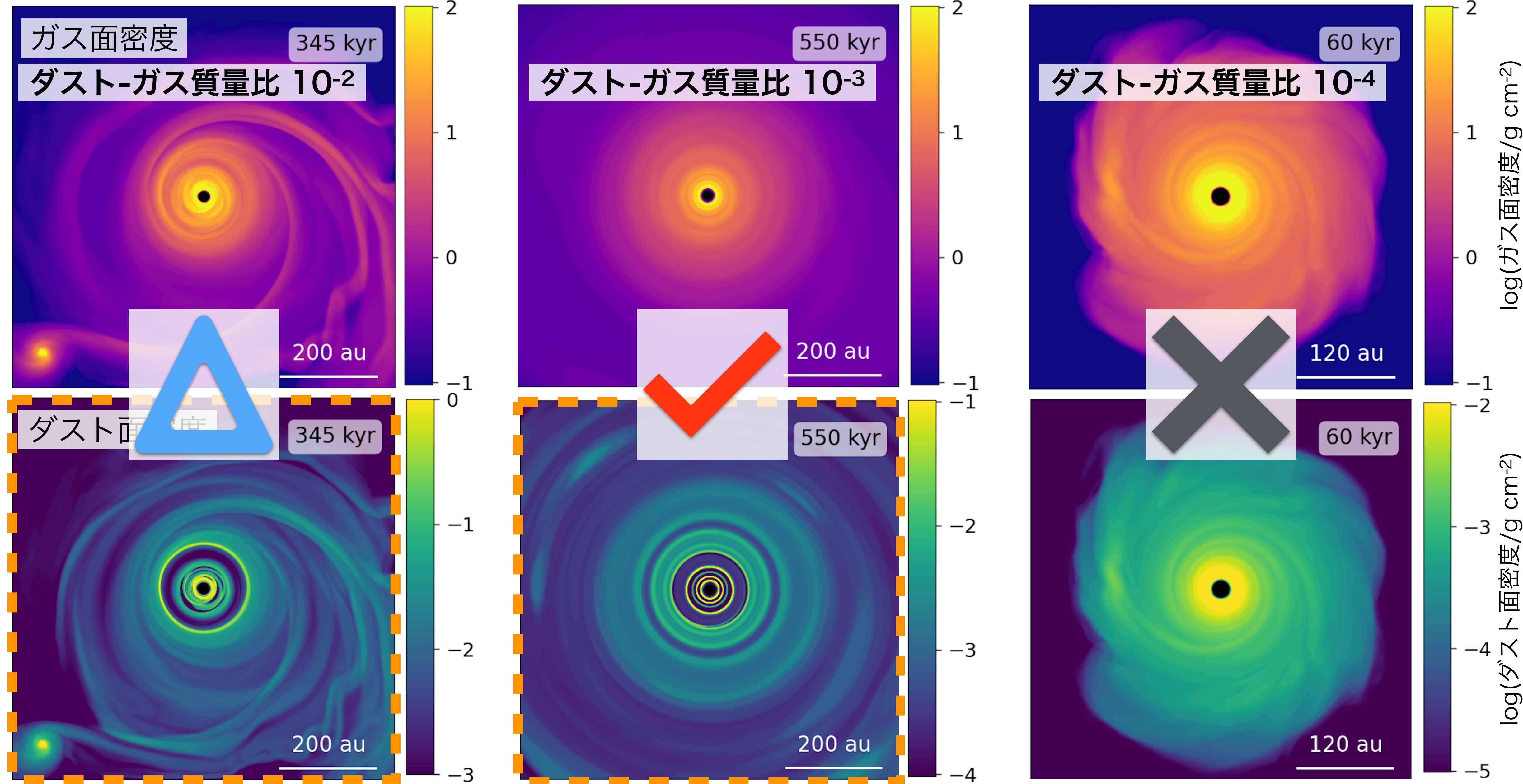


ダストリング形成

ダスト-ガス質量比 10^{-3}



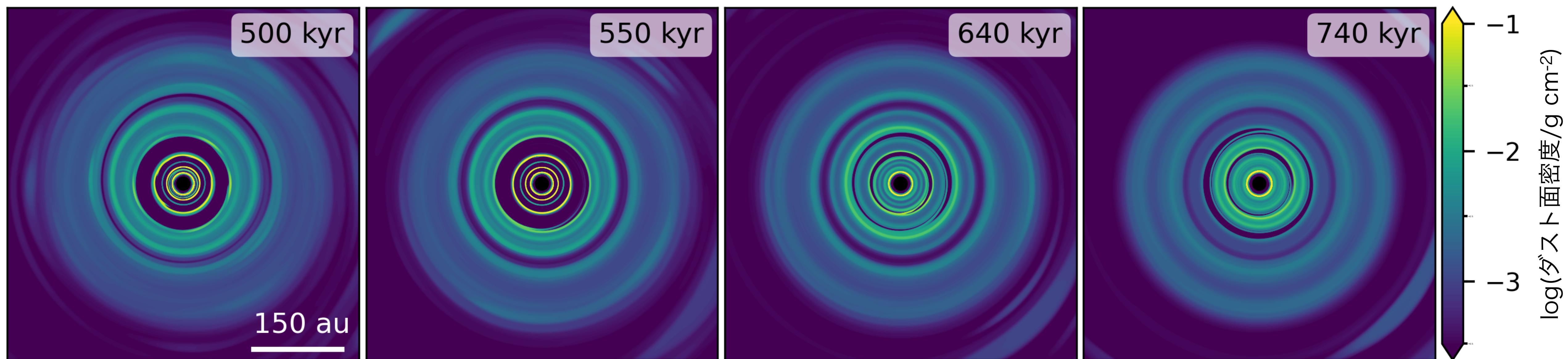
ダスト-ガス比への依存性



ダストリングの長時間進化

ダスト-ガス質量比 10^{-3}

ダスト面密度

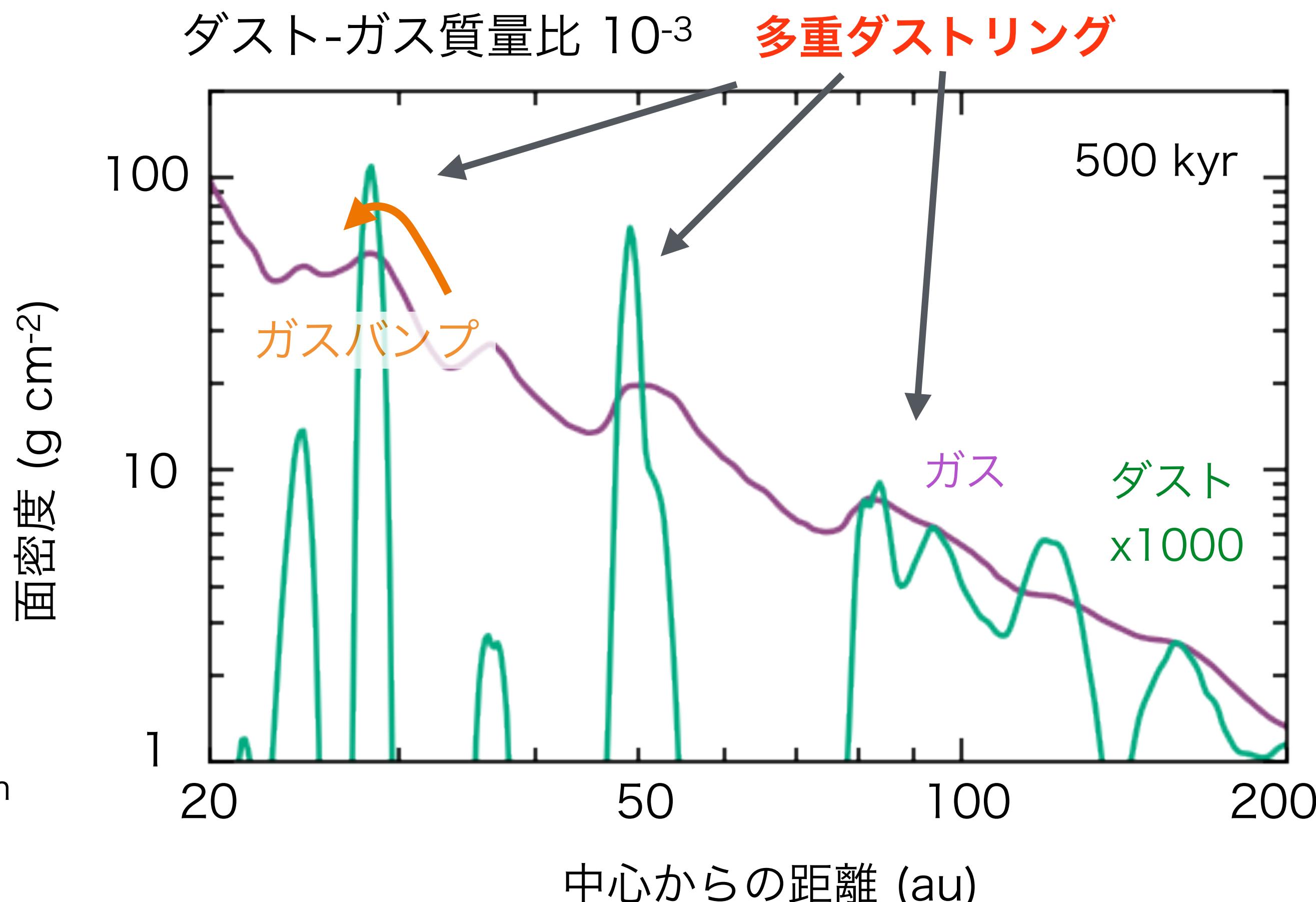


多重ダストリングは長時間 (>200 kyr) 残る

内側 (< 100 au) のリングの位置は時間により変化が見られる

ダストの集積

- ・ガスバンプの位置とダストリングの位置が一致
→ ドリフトによる集積
- ・複数のダストリングが形成
- ・各々のダストリングの質量 $10 - 100 M_{\text{Earth}}$
ガス惑星形成に必要な固体コア質量 $5 - 8 M_{\text{Earth}}$
- 低金属量環境における惑星形成の可能性



議論: なぜバンプが保たれるのか?

Lin M.-K. (2015)

$m=1$ の腕(tightly winding)が背景場と角運動量を交換することによって発達する不安定を発見

解析的にも数値的にも証明する

成長率

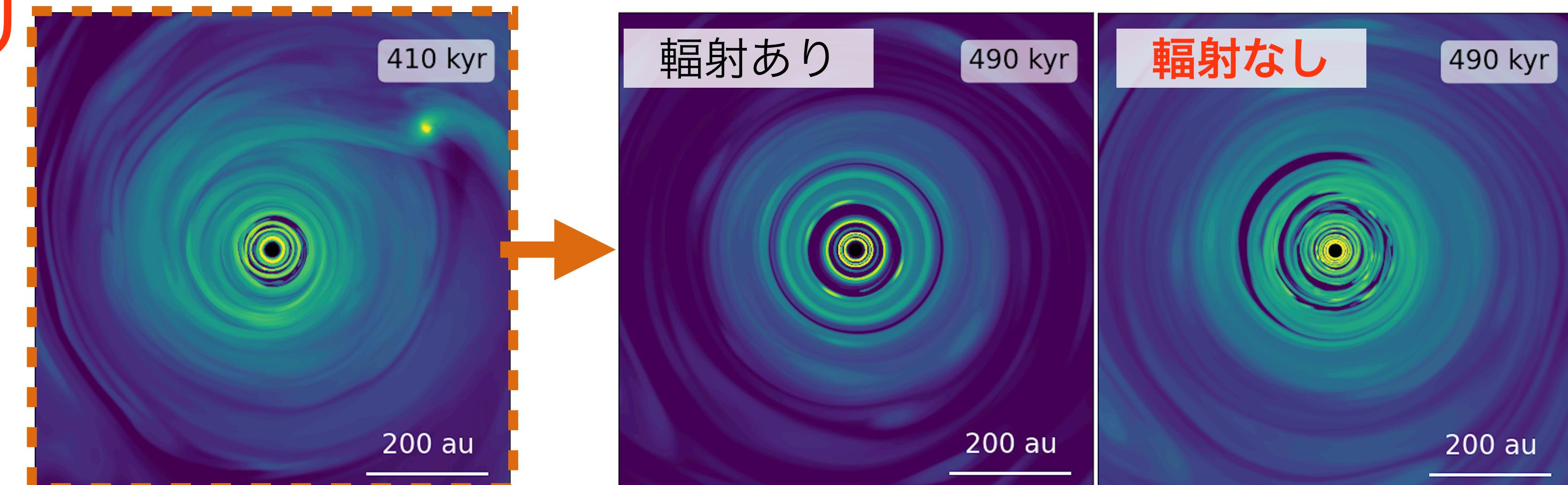
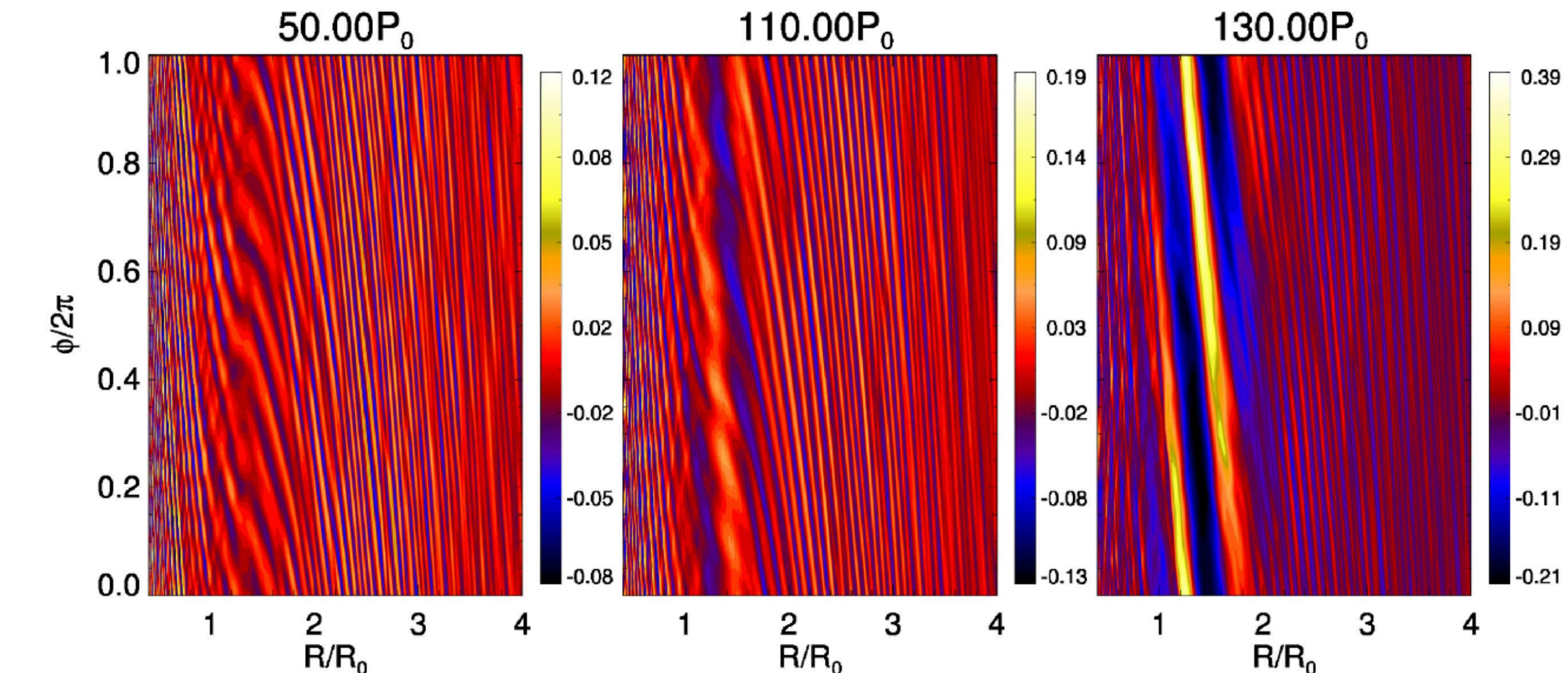
$$\gamma_{\text{grow}} \sim -\frac{dc_s^2}{dr} \frac{k}{m\Omega}$$

- 温度勾配の大きさに依存

数値実験

中心星輻射をオフにして円盤の温度勾配を無くす

→ 多重リングが現れない



まとめ

ダストリング形成

円盤の形成、円盤が自己重力不安定な時期を経て安定化するまでの長時間(~700 kyr)計算した

- ✓ ダスト-ガス質量比 $10^{-2}, 10^{-3}$ でダストリングが形成

特に質量比 10^{-3} では、**多重ダストリング**が見られた

リングのダスト質量 $> 10 M_{\text{Earth}}$ ガス惑星形成の可能性

- ✓ 中心星輻射をオフにするとダストリング形成は見られない

バンプ構造は、 $m=1$ の腕(tightly winding)と背景場の角運動量の交換で保たれているかもしれない

- ✓ 今後の課題

観測との比較

いつまでダストリングは残る？ 数Myrの円盤のリングは説明できる？

