

Multiple dust ring formation in a protoplanetary disk

(原始惑星系円盤におけるダストリング形成)

Ryoki Matsukoba (松木場 亮喜)

計算科学研究センター 宇宙物理理論研究室

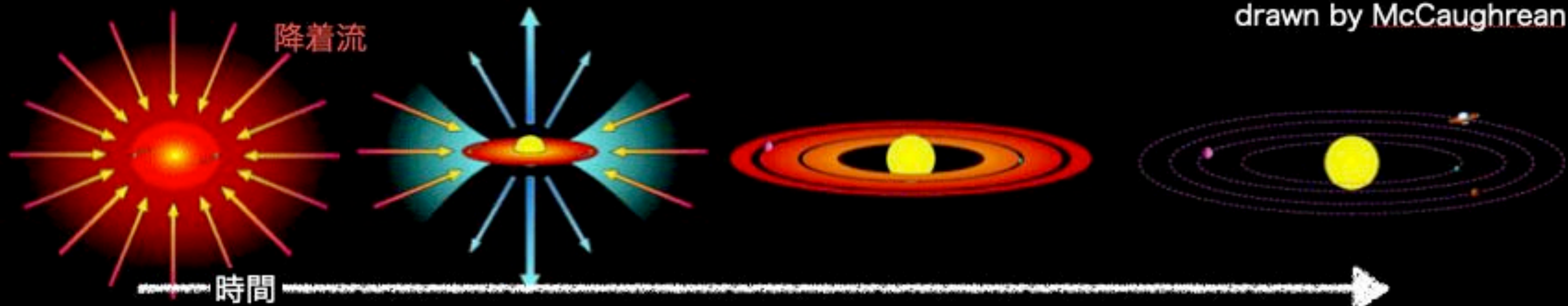


共同研究者

細川 隆史 (京都大学)、Eduard I. Vorobyov (Univ. of Vienna)

星形成過程

drawn by McCaughrean



原始星

- ・高密度ガス雲が自己重力によって収縮

雲の中心に原始星が誕生

- ・原始星周囲に降着円盤が形成

原始惑星系円盤

前主系列星

- ・ガス降着が落ち着くと前主系列星と呼ばれる

- ・円盤内で惑星形成

主系列星

- ・水素燃焼が始まると主系列星となる

※ 太陽系はここ

原始惑星系円盤の観測

ミリ波・サブミリ波による観測

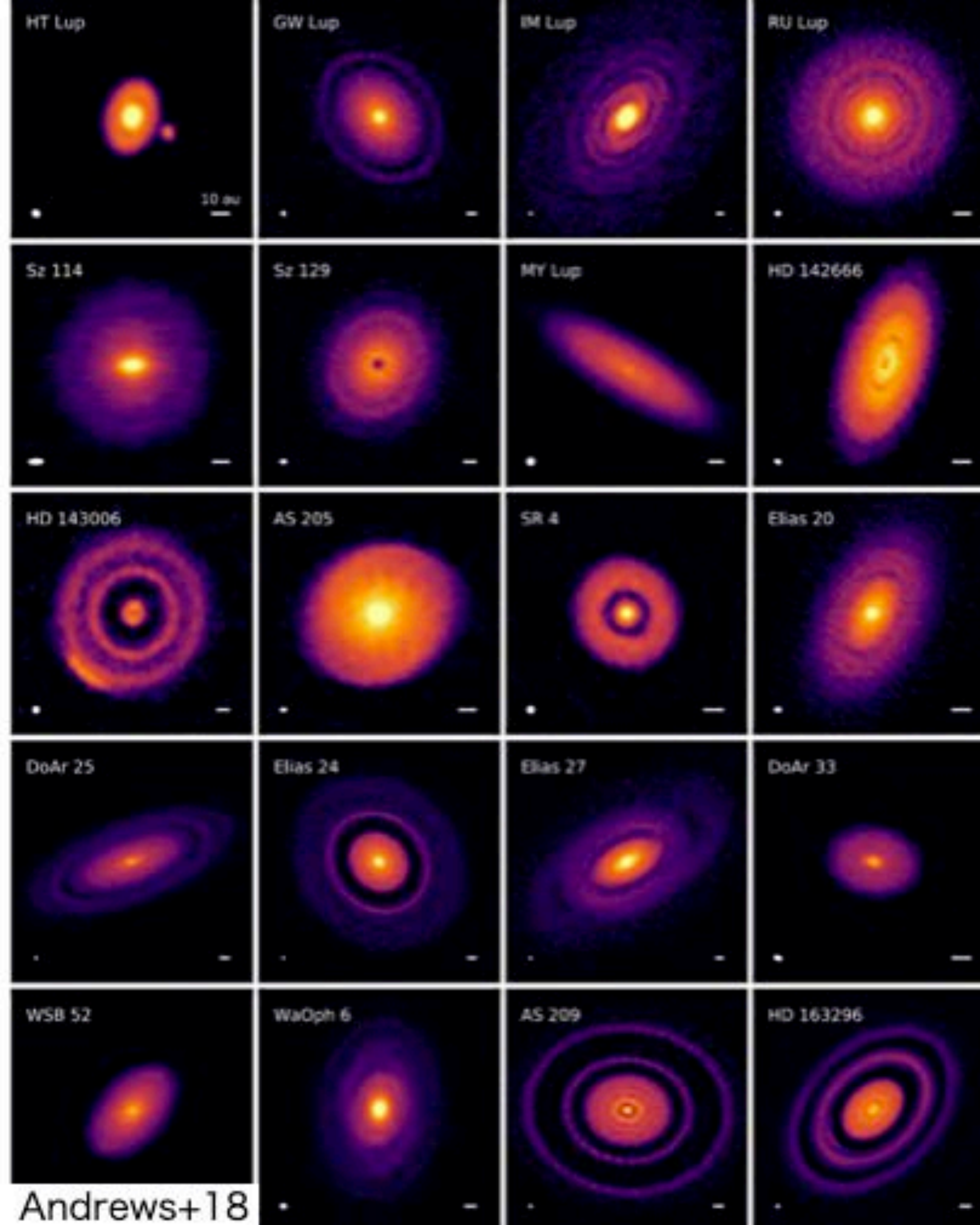
→ 原始惑星系円盤内のダスト粒子のイメージング

2014年 ALMA 登場

円盤の詳細な構造が明らかに
複数のダストリングとギャップ

近年 多くの天体を対象にALMA観測

円盤は多様な構造を持っている
ダストリング構造がいくつもの天体で確認



惑星形成とダストリング

惑星形成

ミクロンサイズのダストから
10³ kmサイズの岩石コアへ成長

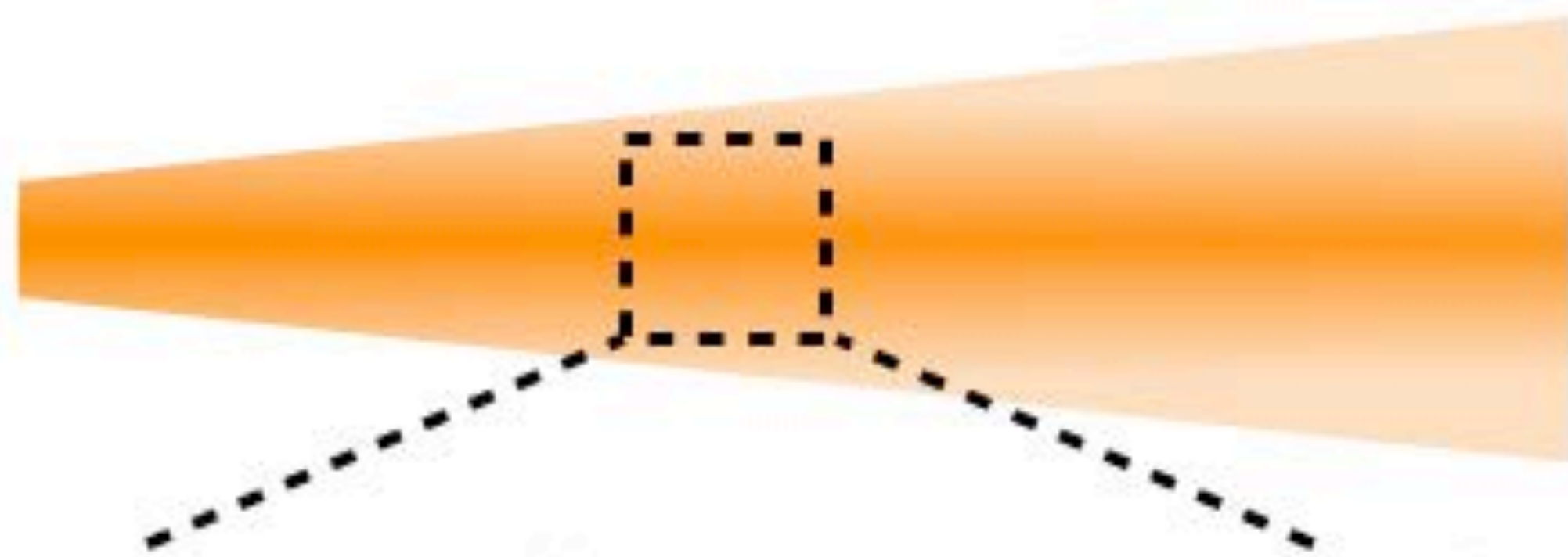
→ ダストが濃集した領域で形成
しやすい

ダストリングは最適な環境

星



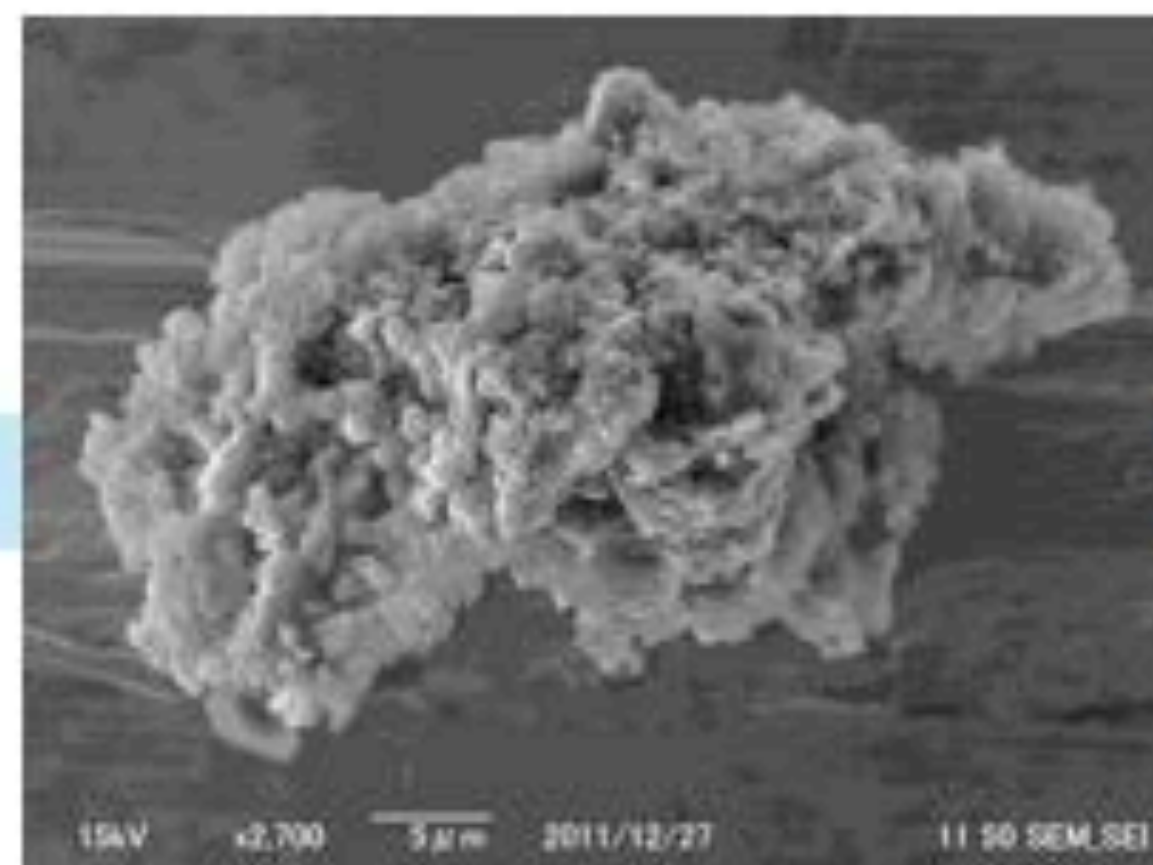
原始惑星系円盤



ダスト < 1 μm

微惑星 ~ km

惑星 10³-10⁴ km

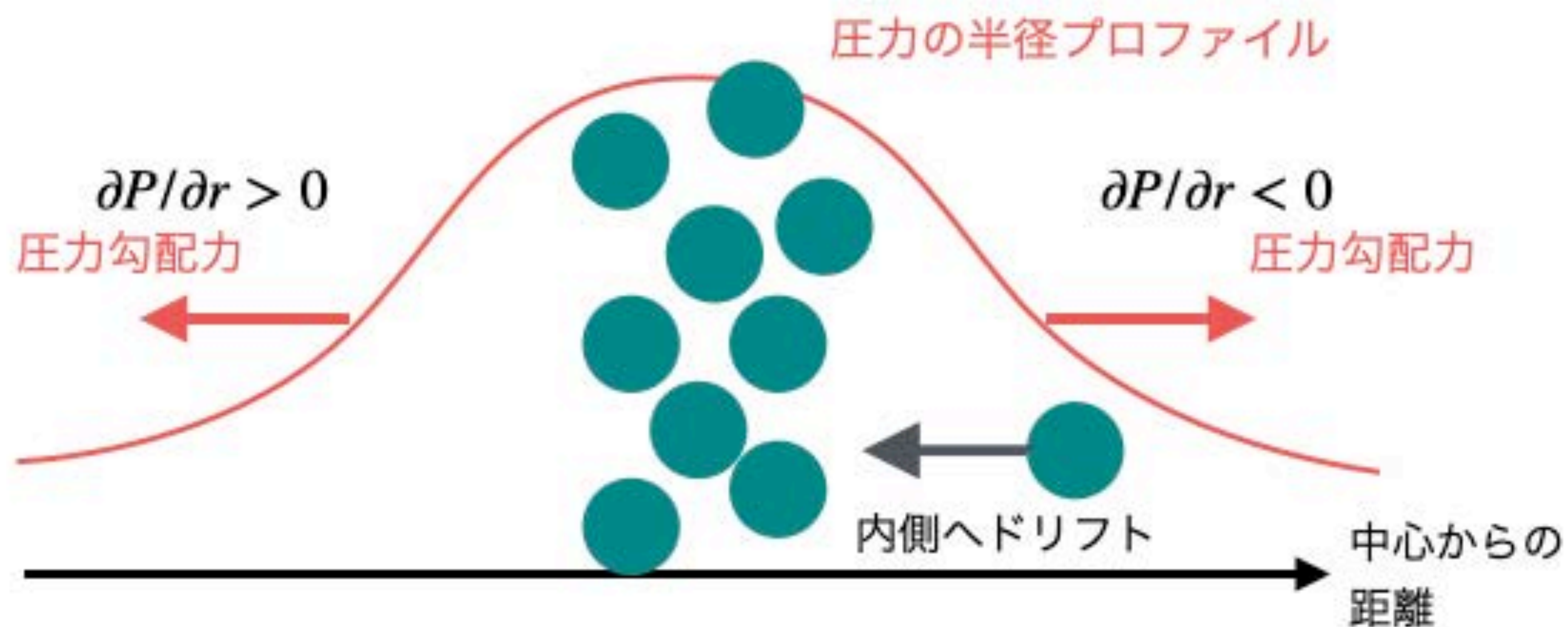


©九州大学・極地研

©JAXA、東京大学など

©NOAA

ダストのドリフト運動



- $\partial P/\partial r < 0$ (負の勾配)
ダストは向かい風を受ける
→ 内側へドリフト運動
- $\partial P/\partial r > 0$ (正の勾配)
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、ドリフト運動によってダストが集積する

→ ダストリングの形成

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 10⁴ au

基礎方程式

ガス

・ 連続の式 $\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_g \mathbf{u}) = 0$ ダストからガスへの抵抗

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

・ エネルギー式 $\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e\mathbf{u}) = -P(\nabla \cdot \mathbf{u}) - Q + (\nabla \mathbf{u}) : \mathbf{\Pi}$

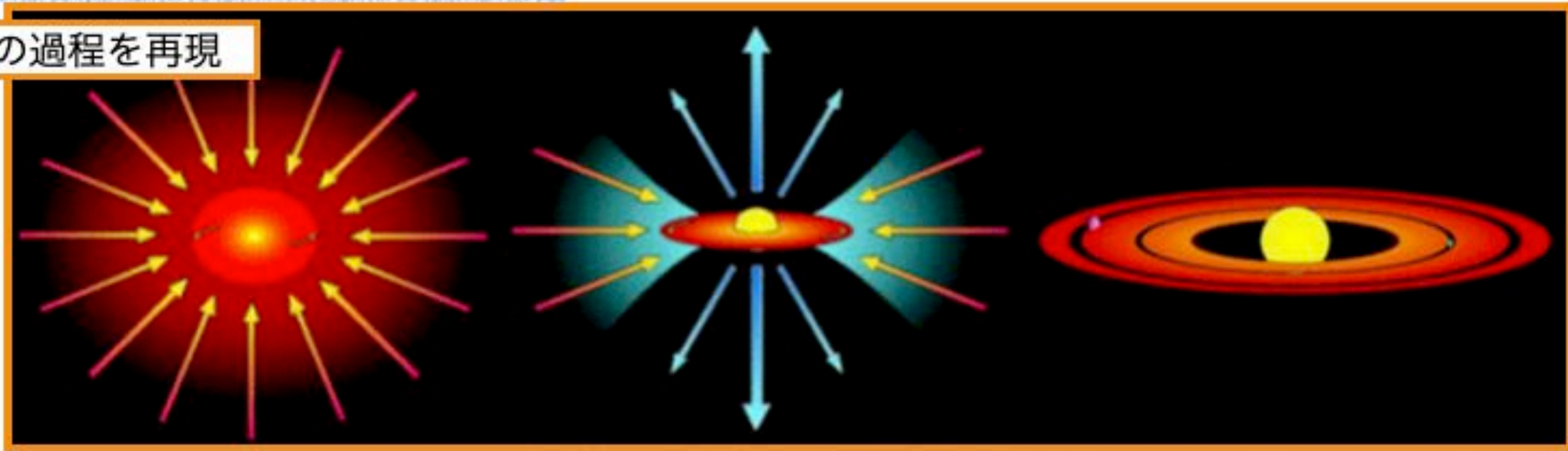
ダストモデル

- ✓ ガスとは別に運動方程式を解く
- ✓ ダストのサイズ成長も解く

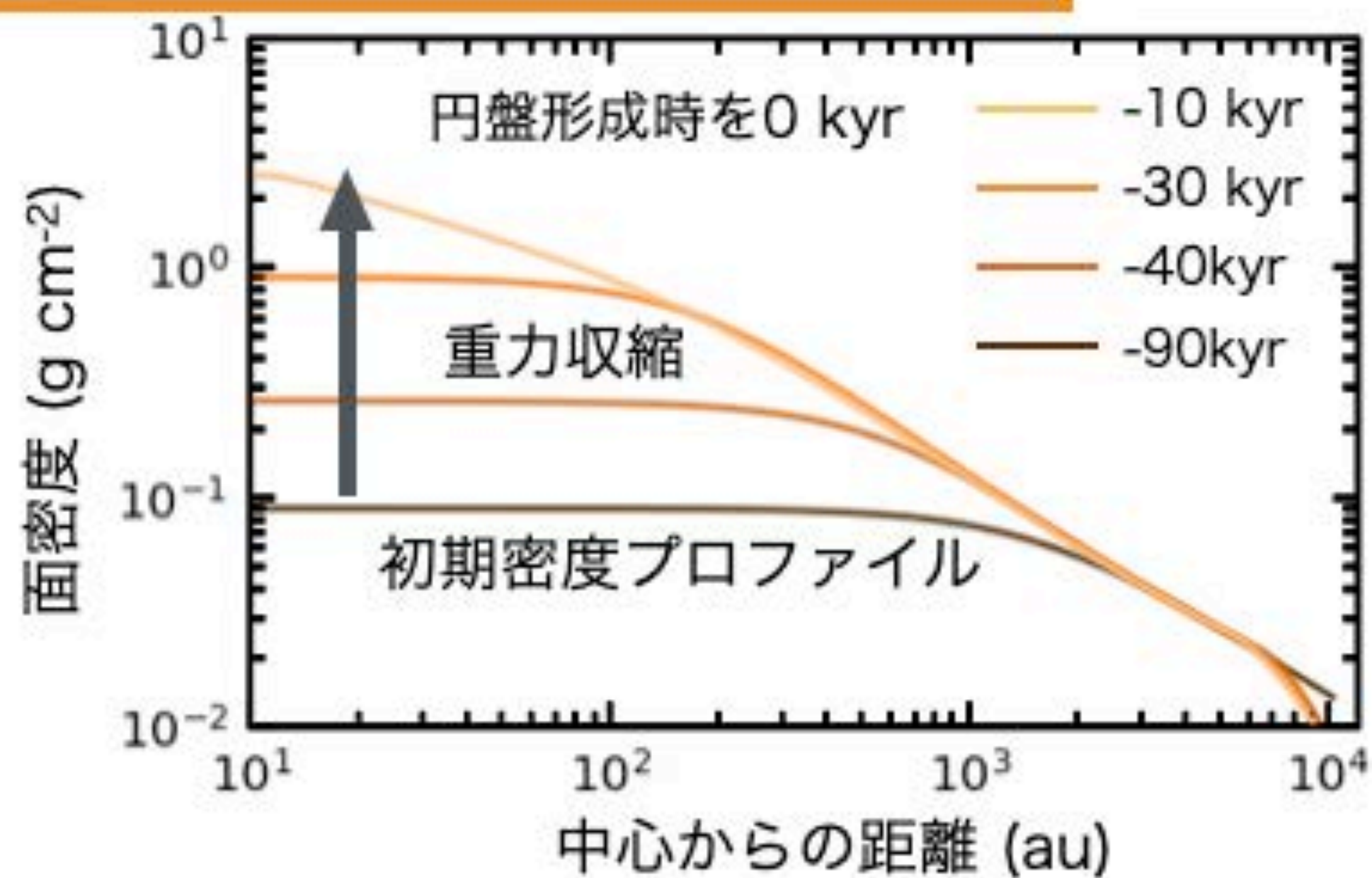
ガスとダストの抵抗はダストサイズに依存 → ガスとダストの非一様な空間分布を作る

計算のセットアップ

この過程を再現



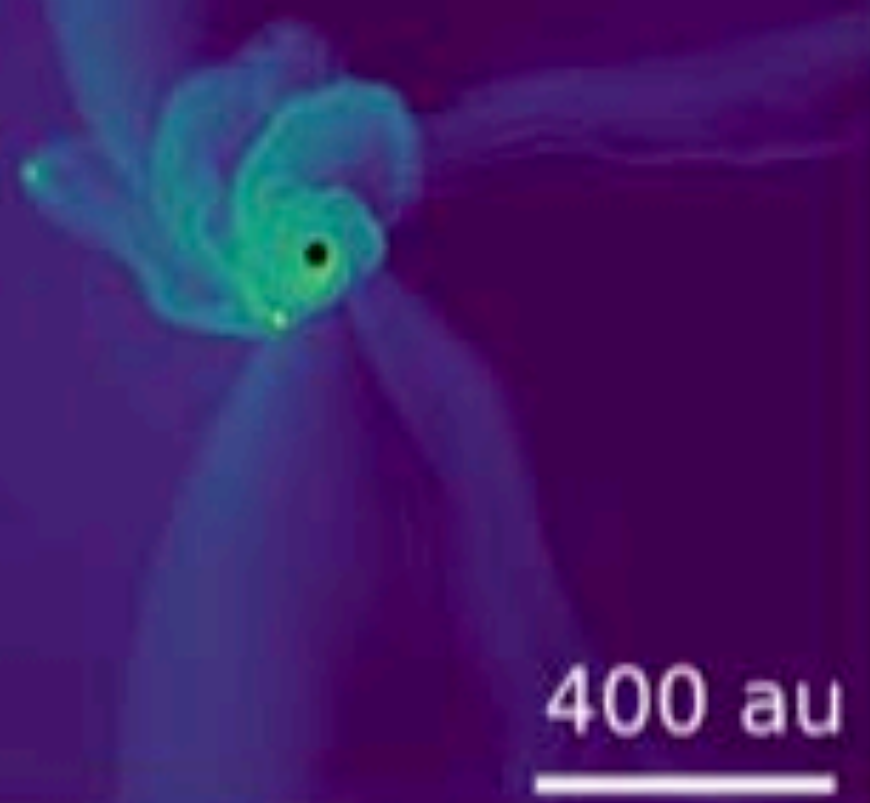
- ✓ 高密度ガス雲の収縮からガス降着が落ち着くまでを計算
- ✓ 高密度ガス雲を模した面密度プロファイルを初期条件として設定
 - 自己重力によって収縮 中心の密度が増加
- ✓ 高密度ガス雲は初期に回転あり
 - ガス雲中心付近に円盤が形成 その後の進化を追跡



円盤の形成と進化

30 kyr

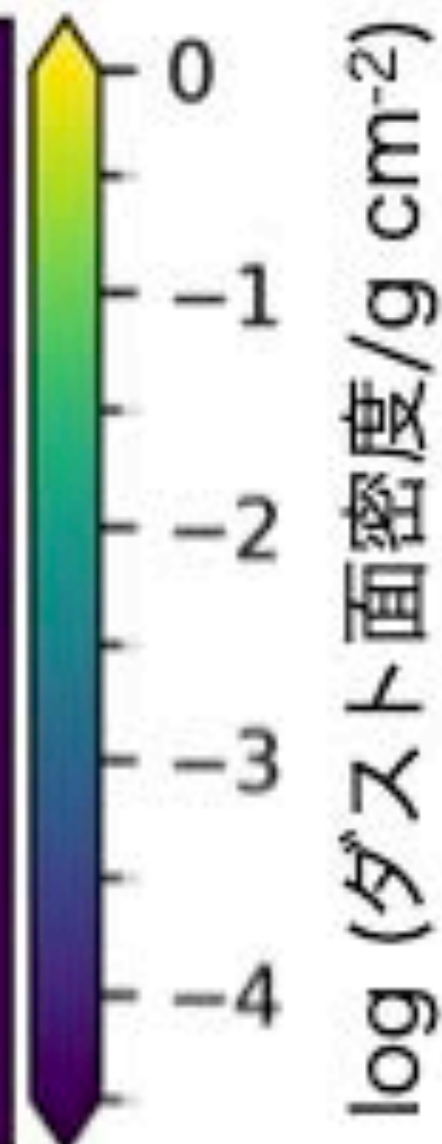
ダスト



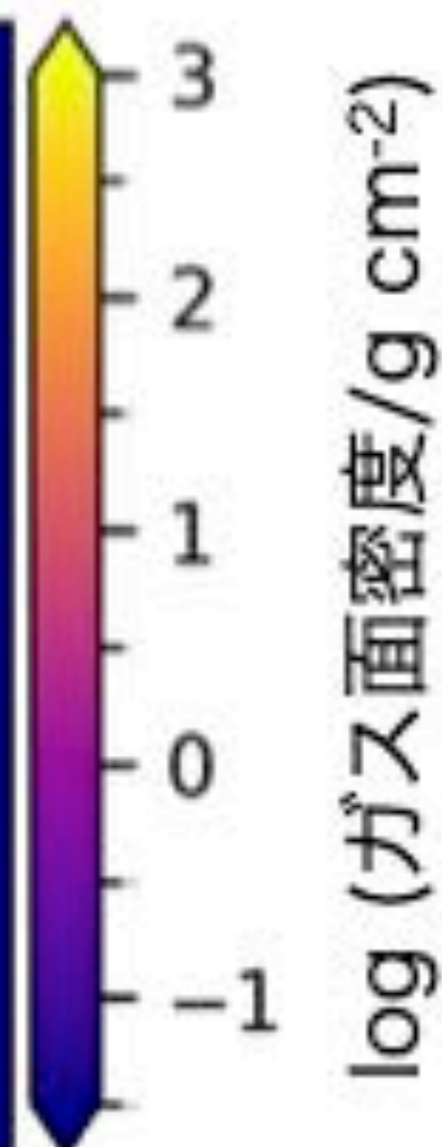
170 kyr

310 kyr

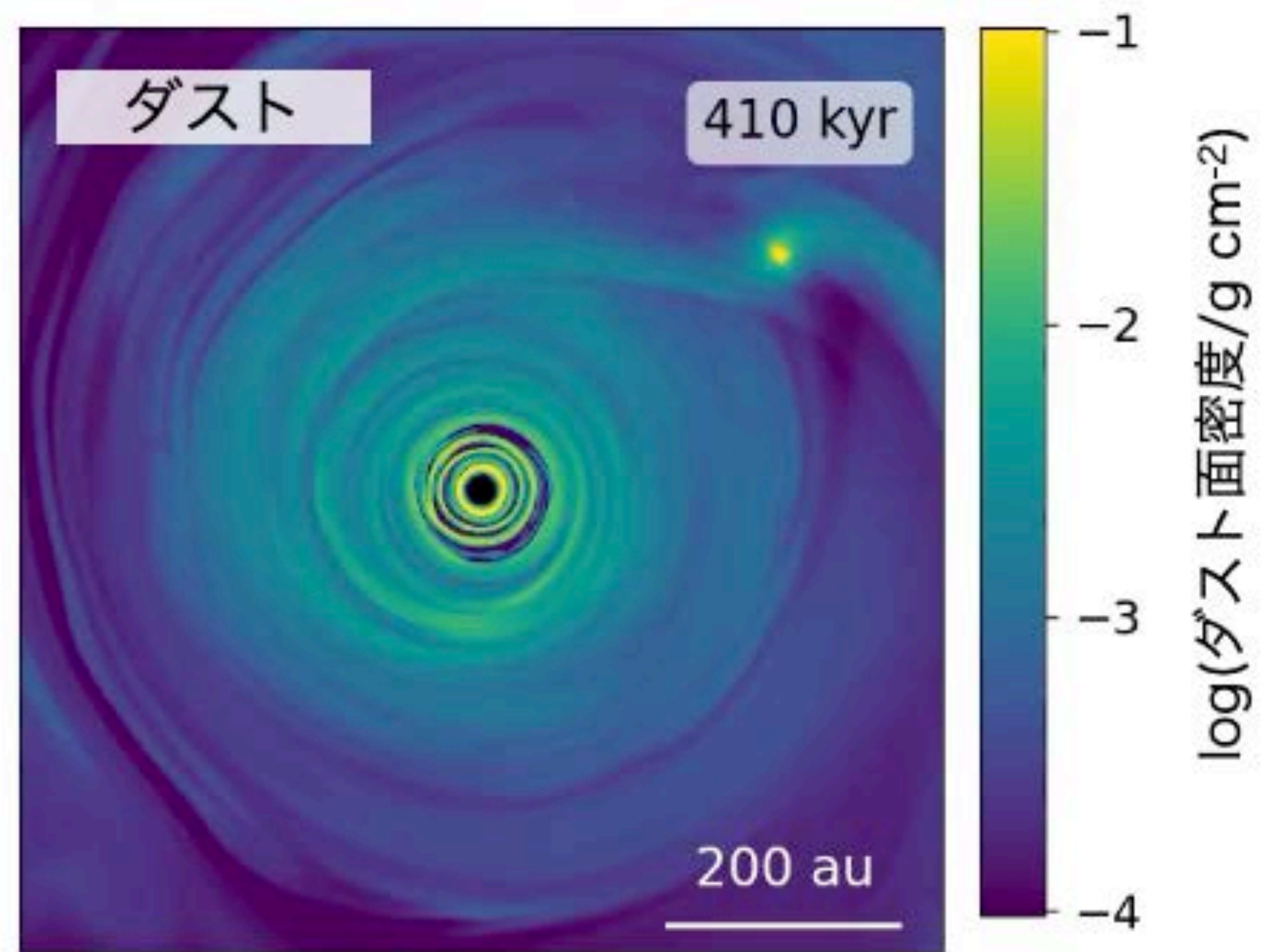
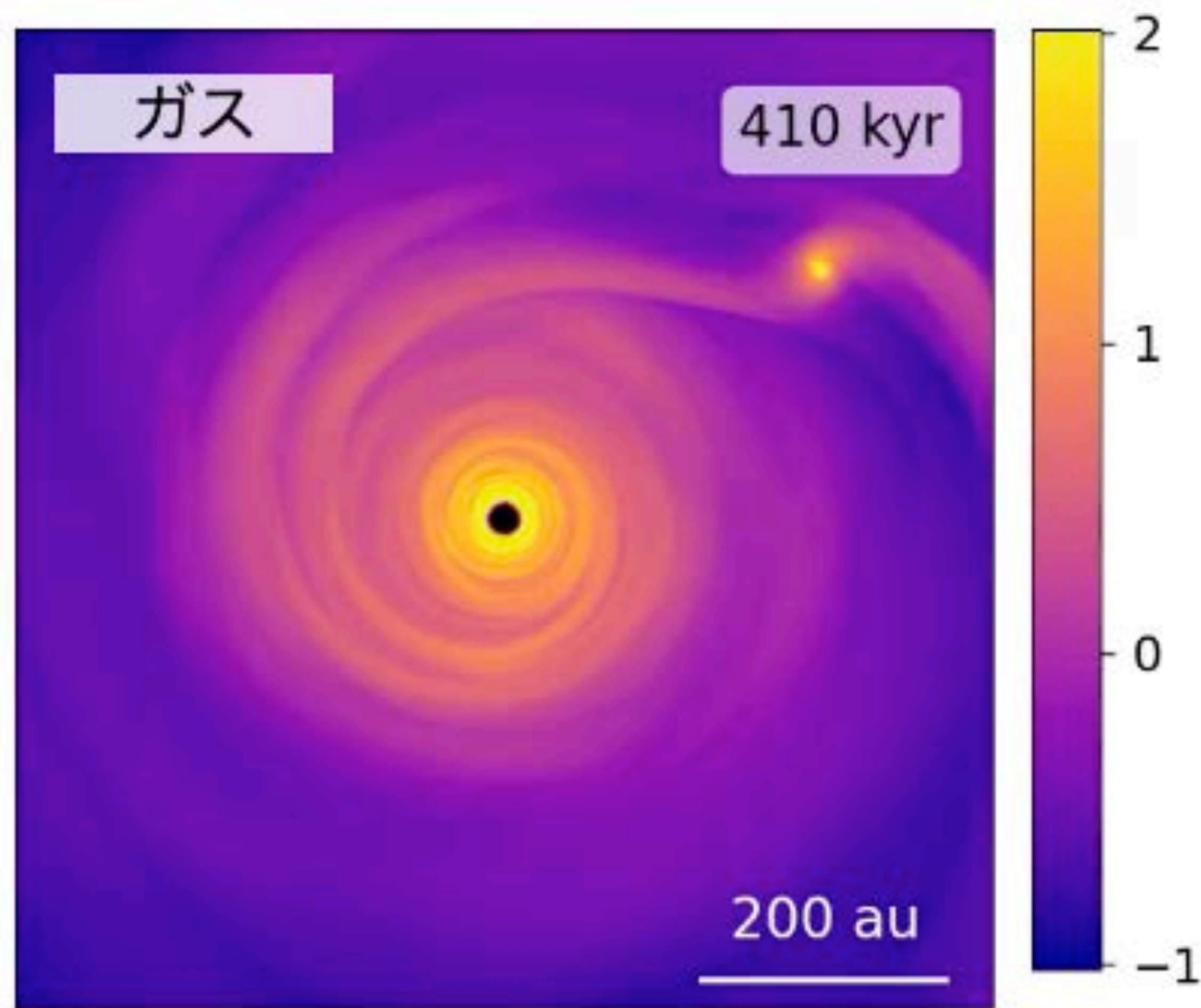
420 kyr



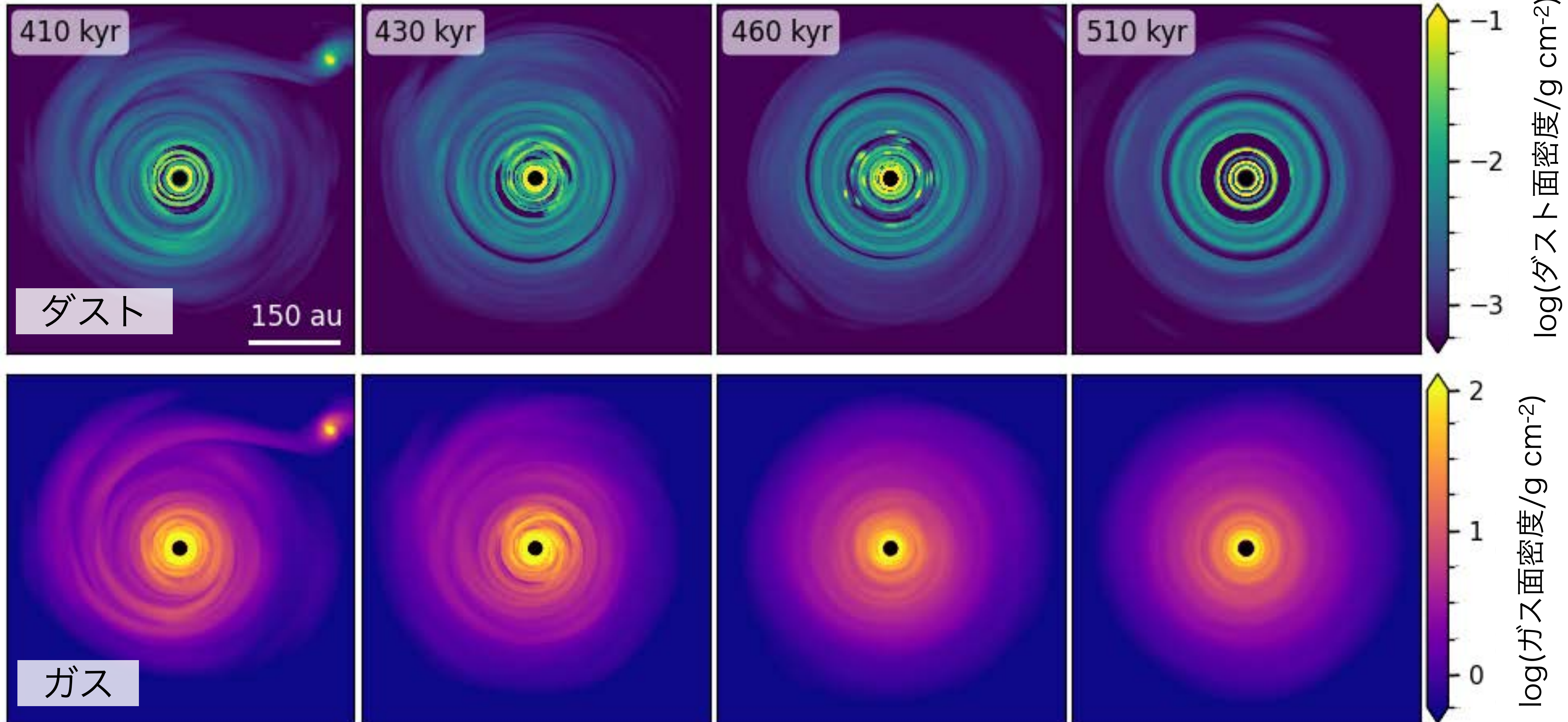
ガス



ダストリング形成



ダストリング形成



ダストの集積

- 複数のダストリングが形成

- ガスの圧力勾配

@ 50 au

圧力勾配の向きが負から正へ逆転

→ ドリフトの向きも逆転

圧力バンプにダストが集積

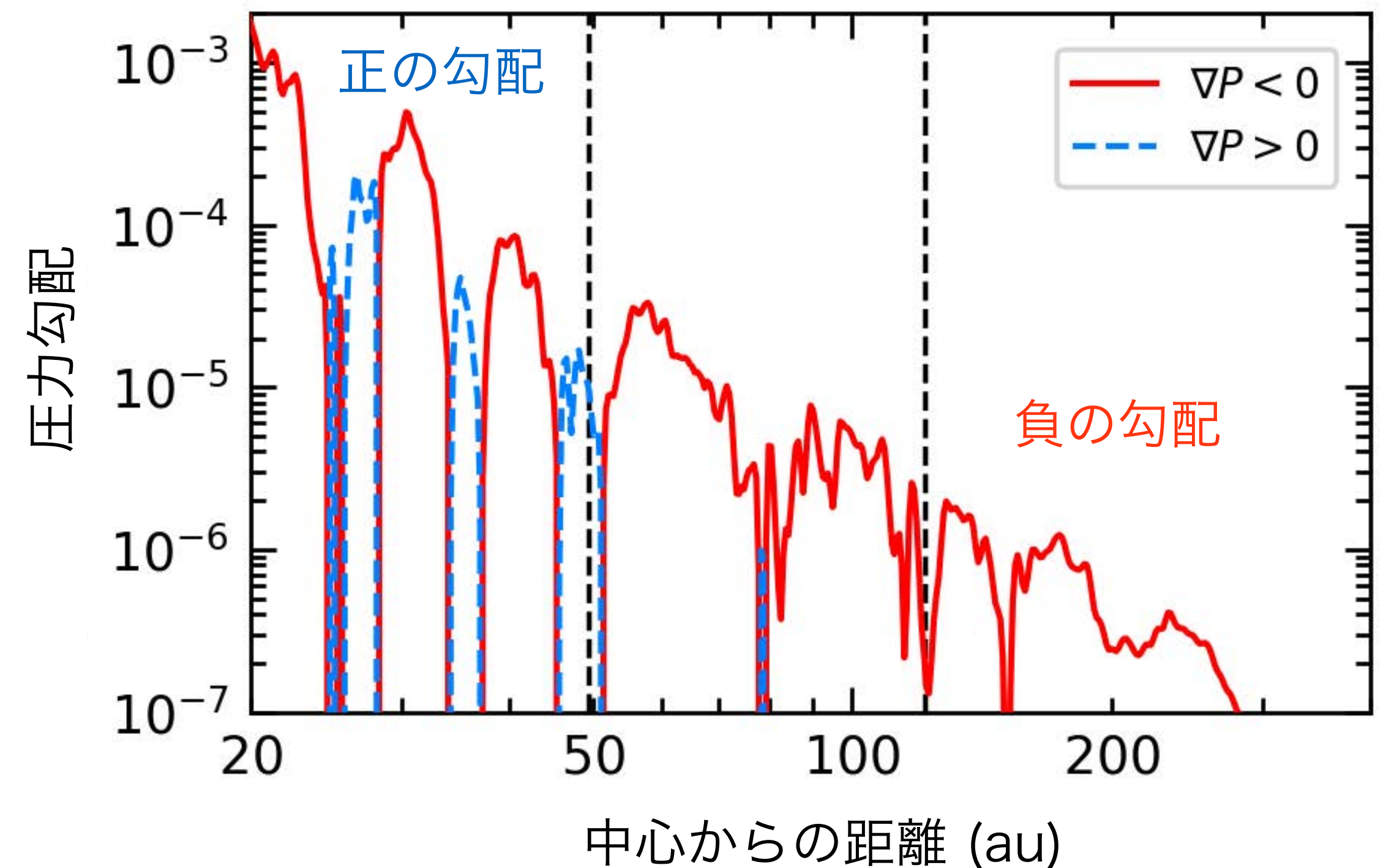
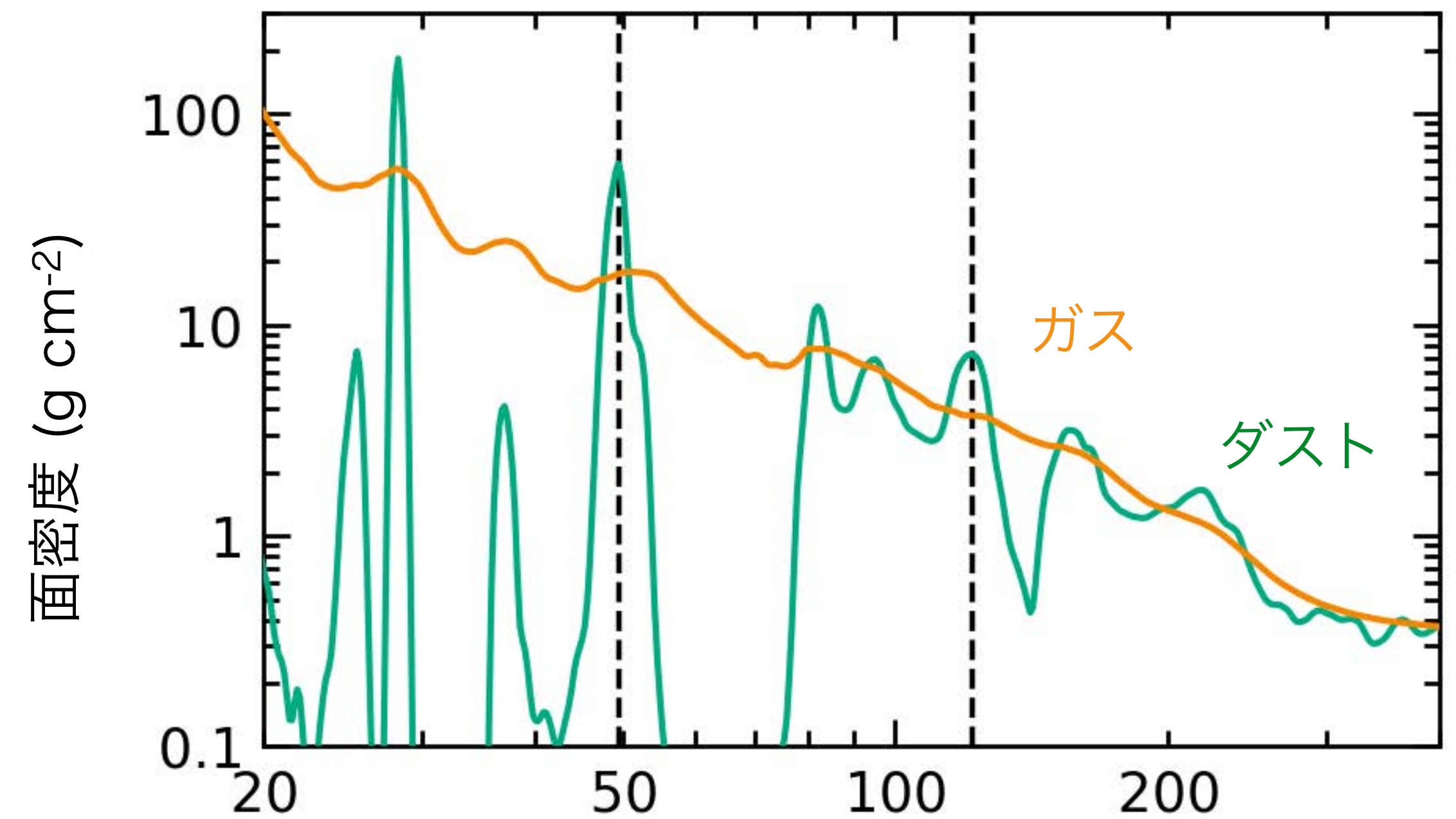
@ 120 au

圧力勾配の向きは負のまま

勾配の大きさが小さくなっている

→ ドリフトするダスト粒子が渋滞

(ドリフトの速度は勾配の大きさに比例)



まとめ

原始惑星系円盤のダストリング

- ✓ 原始惑星系円盤の観測でダストリングが観測されている
- ✓ ダストリングは惑星形成の舞台として有望 どうやって形成？

ダストリング形成を数値計算で追跡

- ✓ 分裂片が立てた密度波で圧力バンプが形成
- ✓ 圧力勾配の正負の切り替わり or 勾配の大きさの変化でダストが集積
→ ダストリングが形成

