

惑星形成

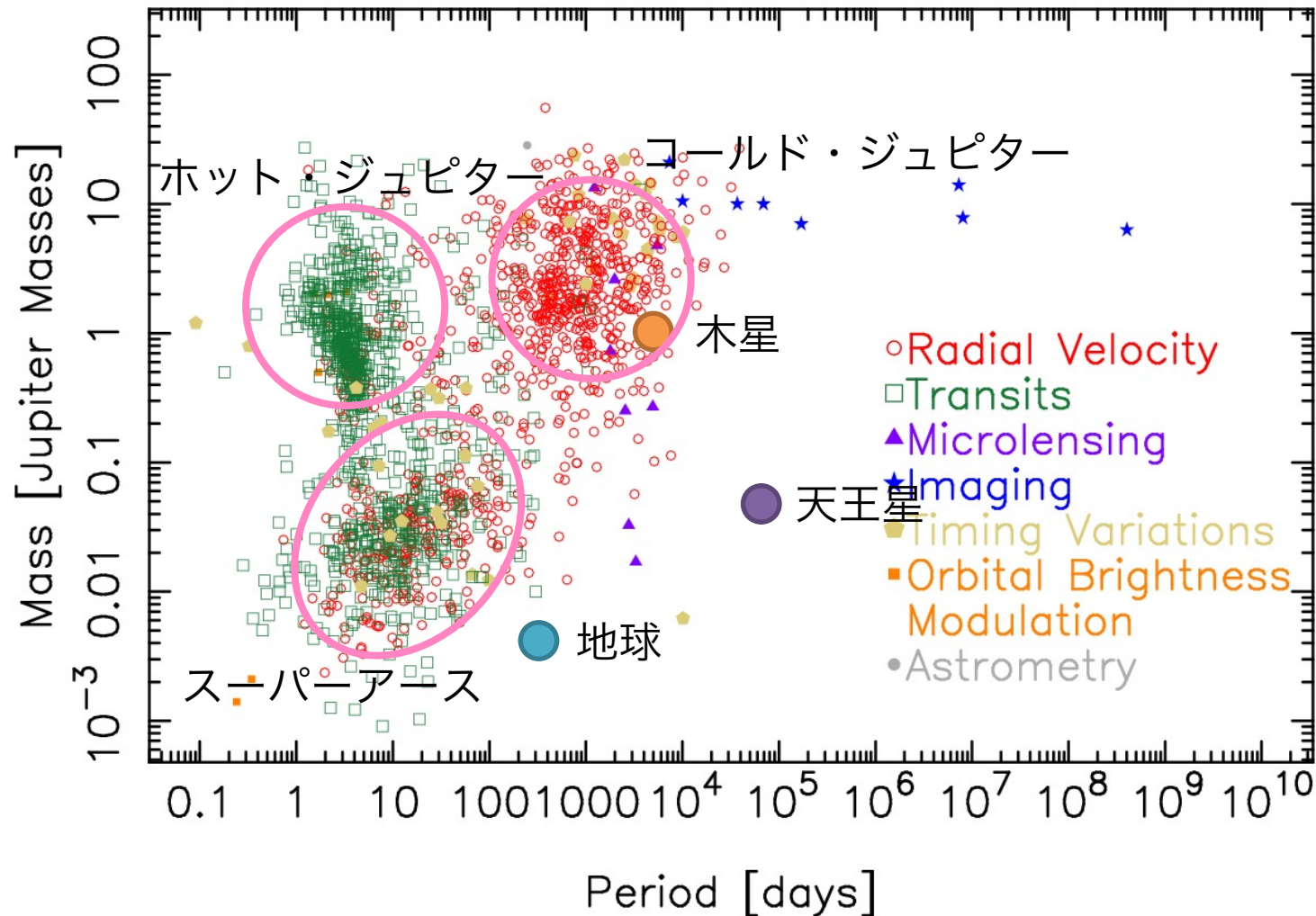
松本倫明（法政大学人間環境学部）

系外惑星の質量-公転周期の分布

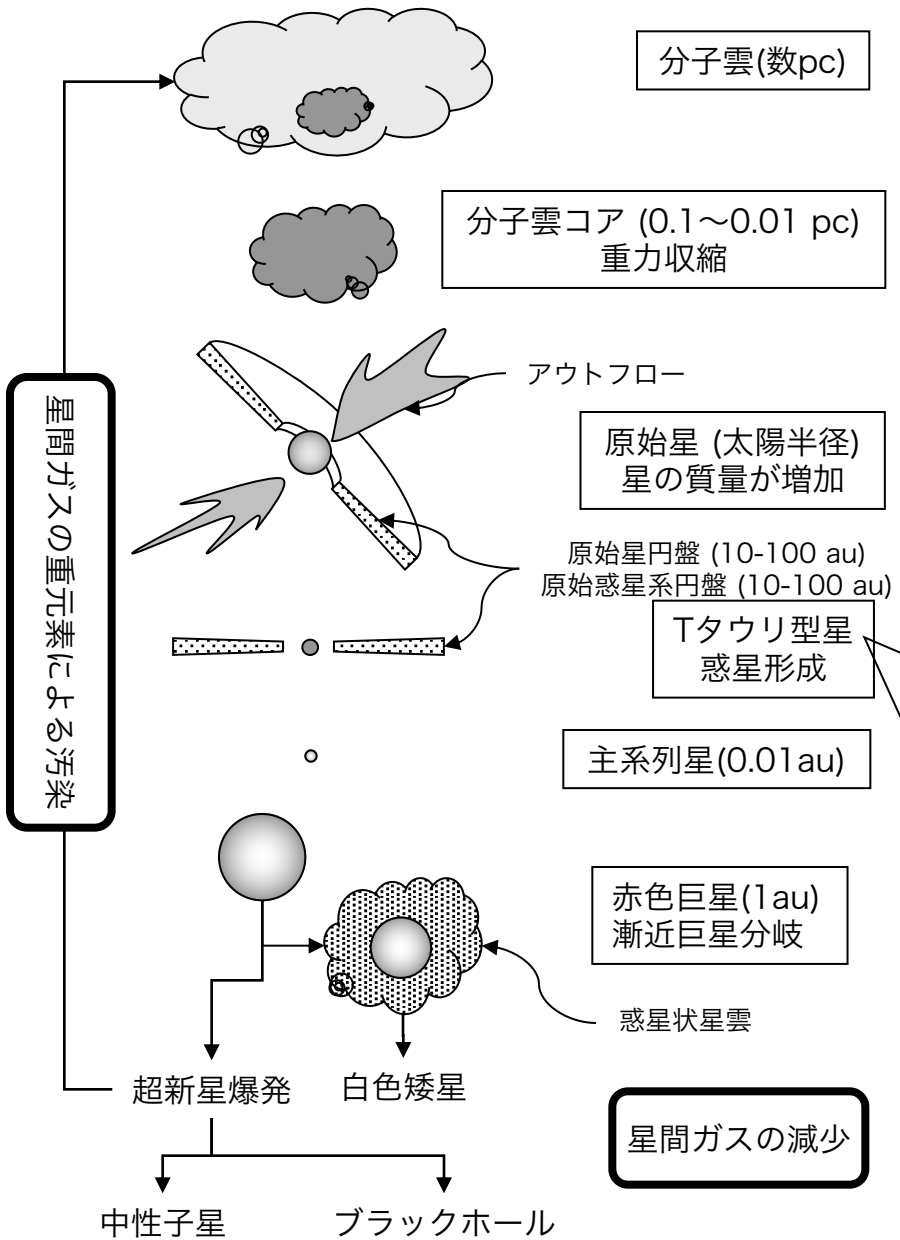
Mass – Period Distribution

28 Oct 2021

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

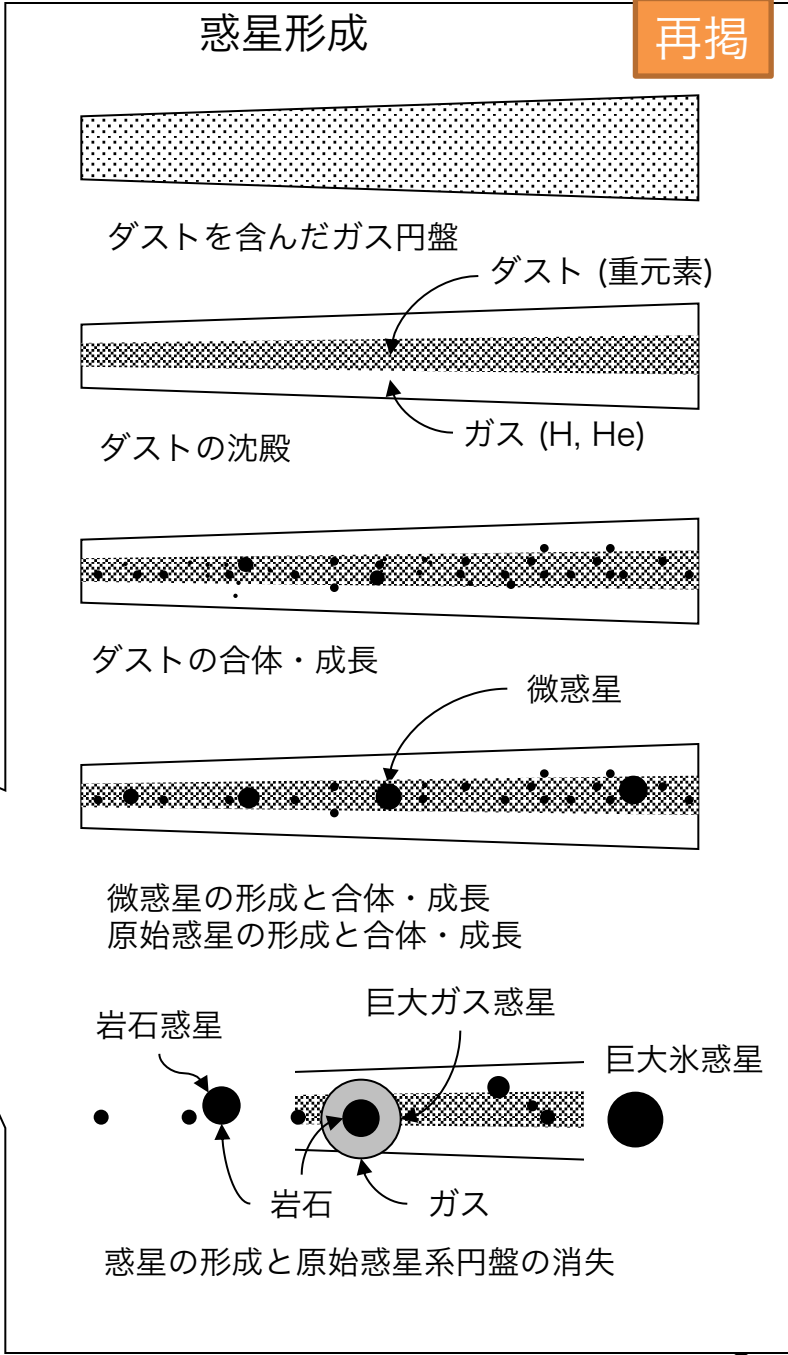


恒星の形成と進化



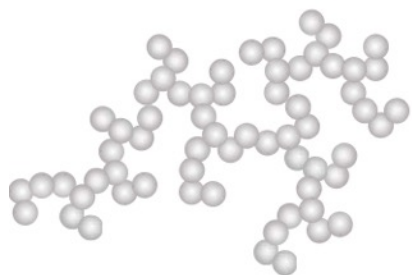
惑星形成

再掲



ダストの濃集と合体成長

原始惑星系円盤でダストを集めて（濃集）くっつける（合体成長）→微惑星→惑星



0.1 μm

100 μm

1 cm

1 km

1000 km

星間ガス

→原始惑星系円盤

ペブル

微惑星

惑星

円盤

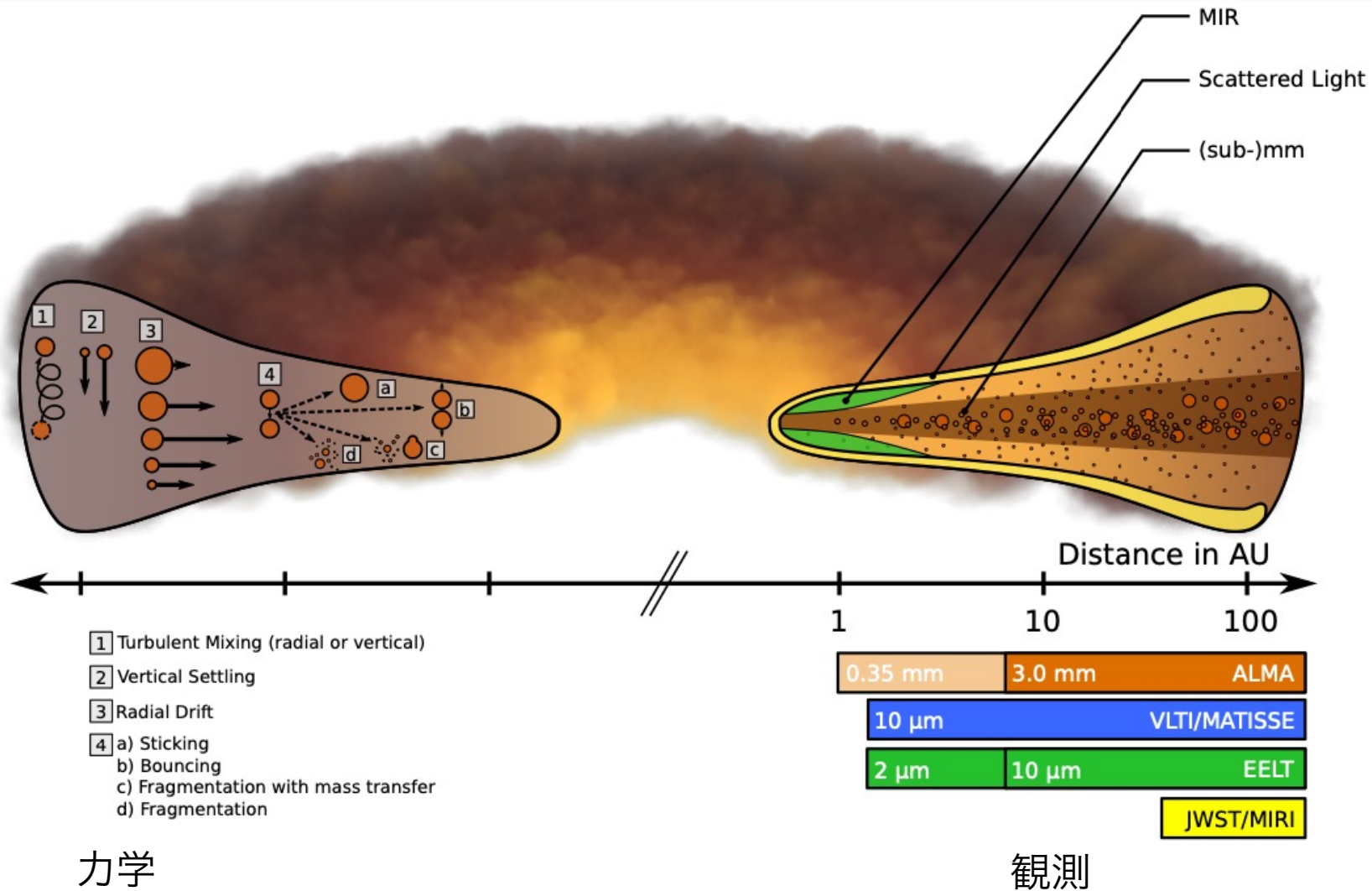
Circumstellar disk 星周円盤 (Class 0, I, ...)

Protostellar disk 原始星円盤 (Class 0, I)

Protoplanetary disk 原始惑星系円盤 (Class II以降)

あくまで目安です。ひとによる。

原始惑星系円盤の模式図

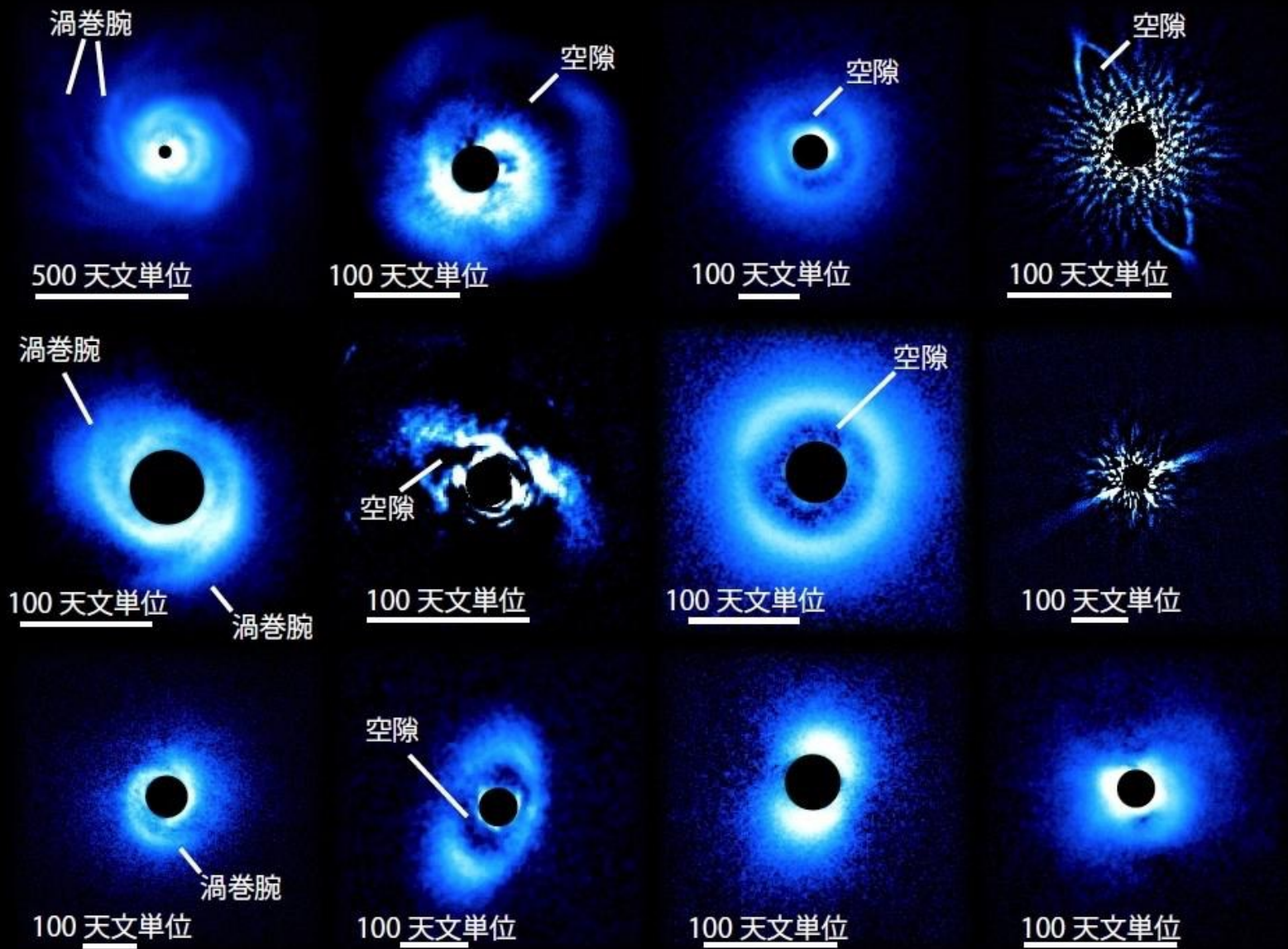


Testi+ 2014

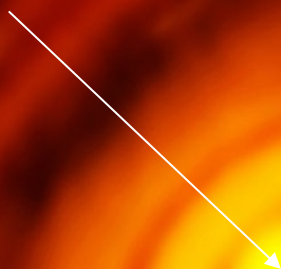
doi:10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch015

近赤外散乱光で見る原始惑星系円盤

出典：すばる SEEDS プロジェクト



T タウリ型星

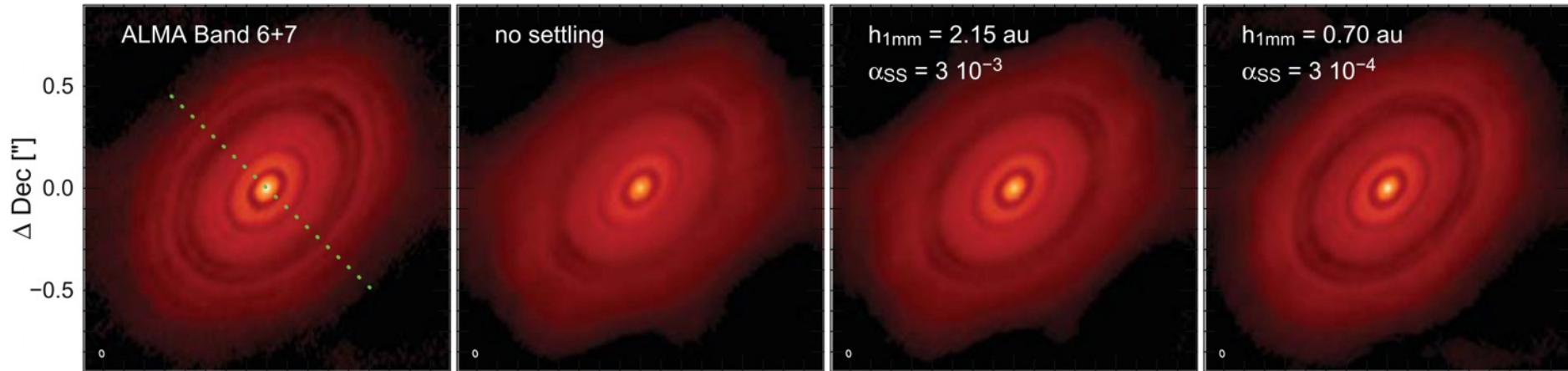


原始惑星系円盤
(惑星が形成されている)

ALMA合同観測所 2014
視力2000相当
東京から大阪のゴルフボールが見える視力に相当

動画 <https://www.youtube.com/watch?v=IU1g3HpWcEs>

ダストは沈殿している。



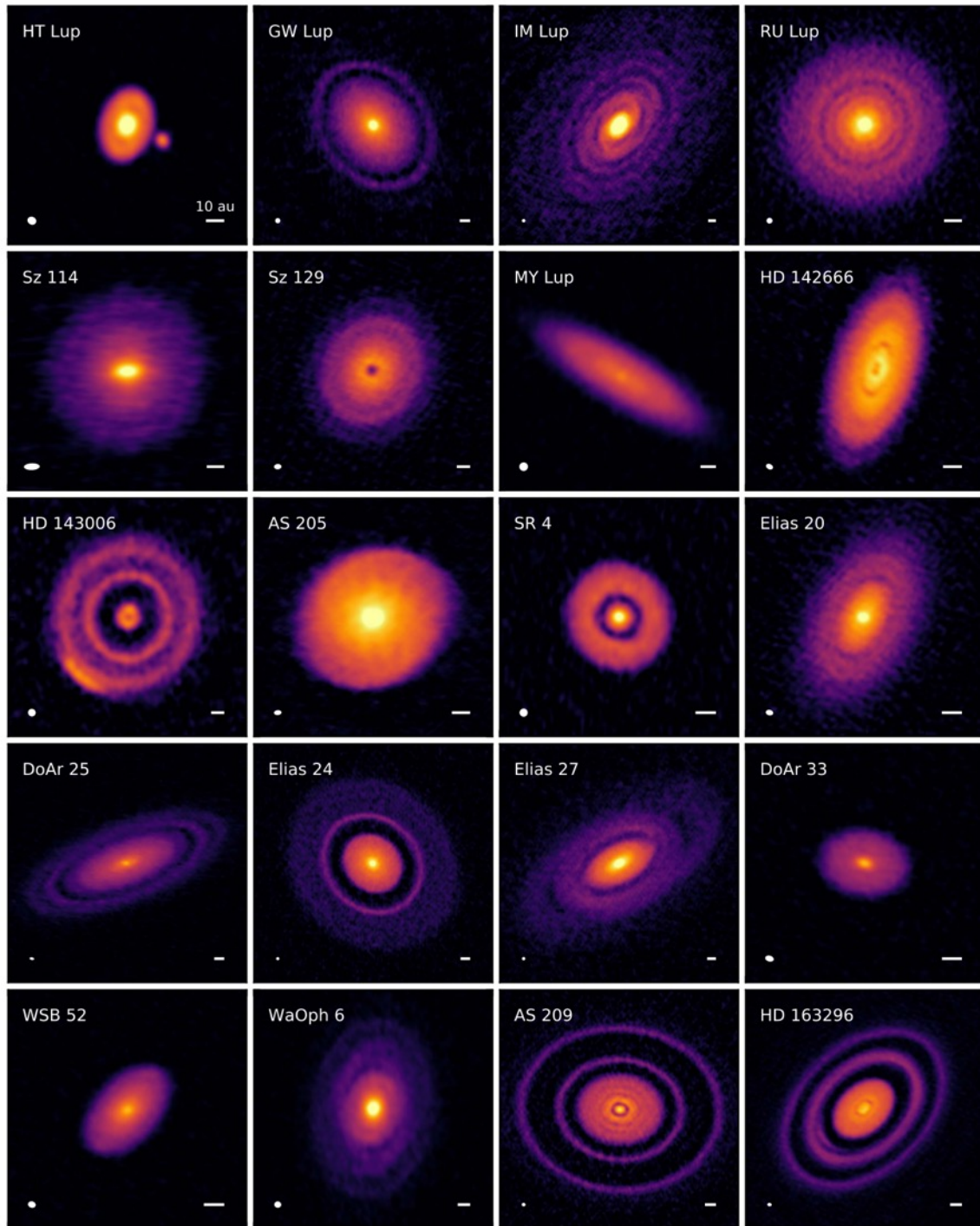
ALMA観測
ダスト熱輻射

モデル計算
沈殿なし

沈殿あり

Pinte+ 2016

<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/816/1/25>



親の顔より見た Andrew et al

DSHARP

Andrew+ 2018

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf741>

ALMA large program

サンプルは比較的大きな円盤を持つ天体

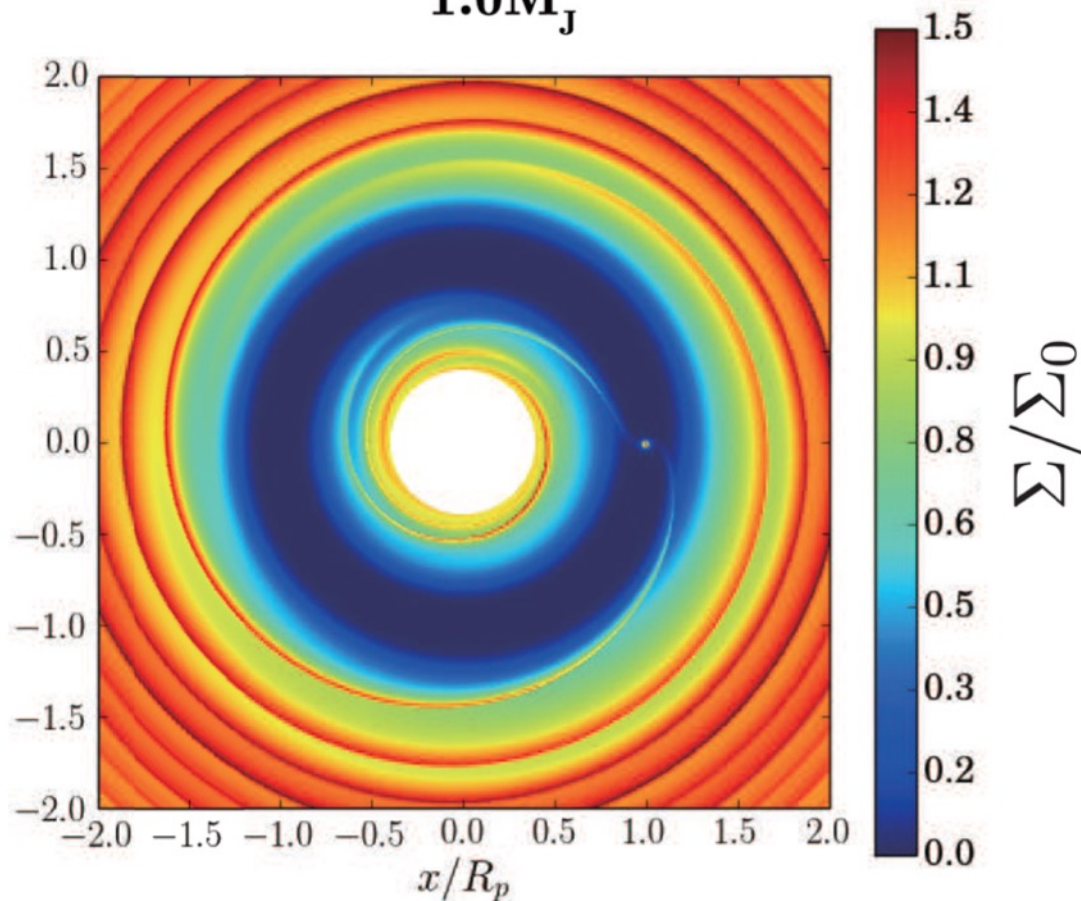
リングとギャップ構造
渦状腕

リング・ギャップの成因

- ・惑星形成
- ・「何か」の不安定性

巨大惑星によるギャップ形成

$1.0M_J$



惑星重力：ギャップを開ける

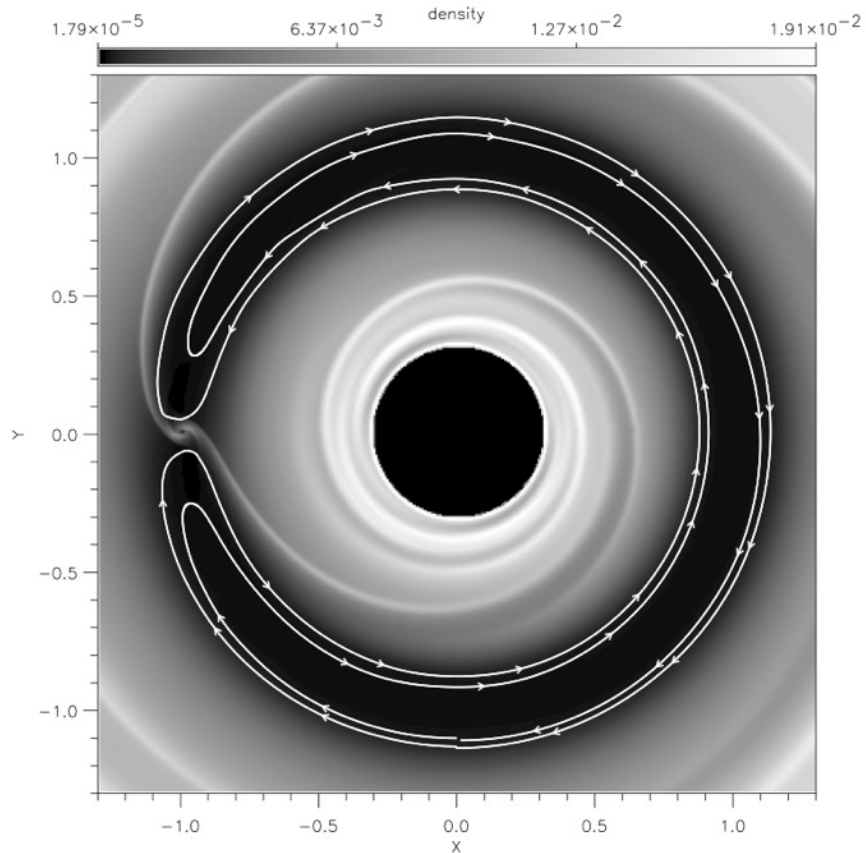
円盤粘性：ギャップを埋める

ギャップ幅：両者の競合で決まる

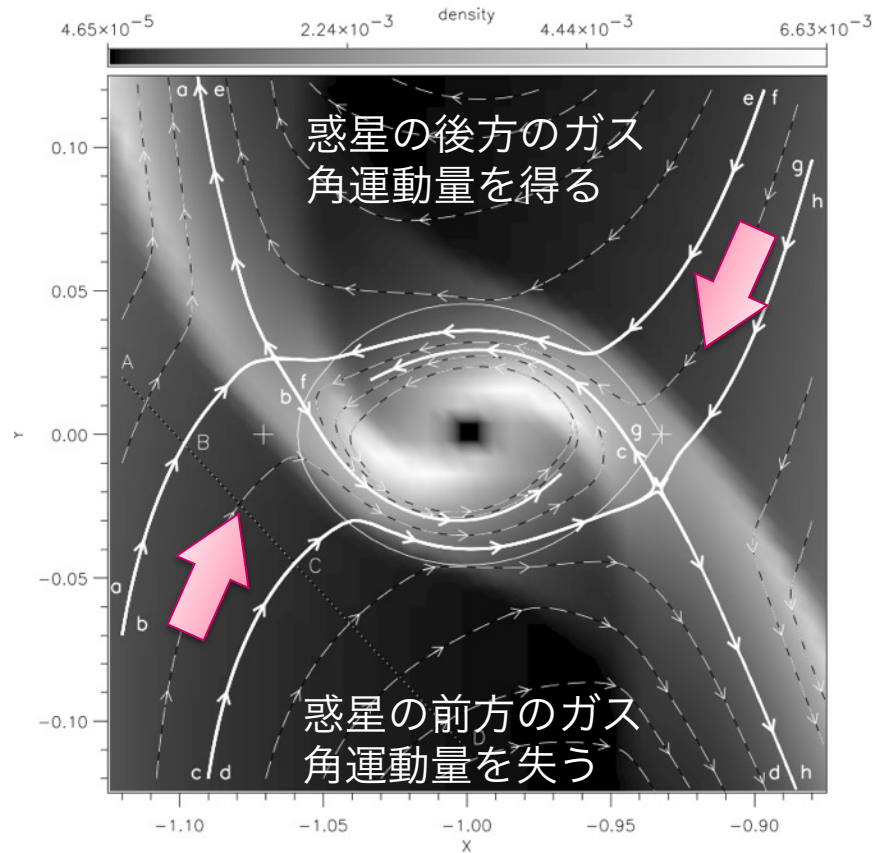
ギャップ形成の反作用で
惑星が落下する
→タイプII移動

Kanagawa+ 2016
doi: 10.1093/pasj/psw037

巨大惑星のギャップを介した質量降着

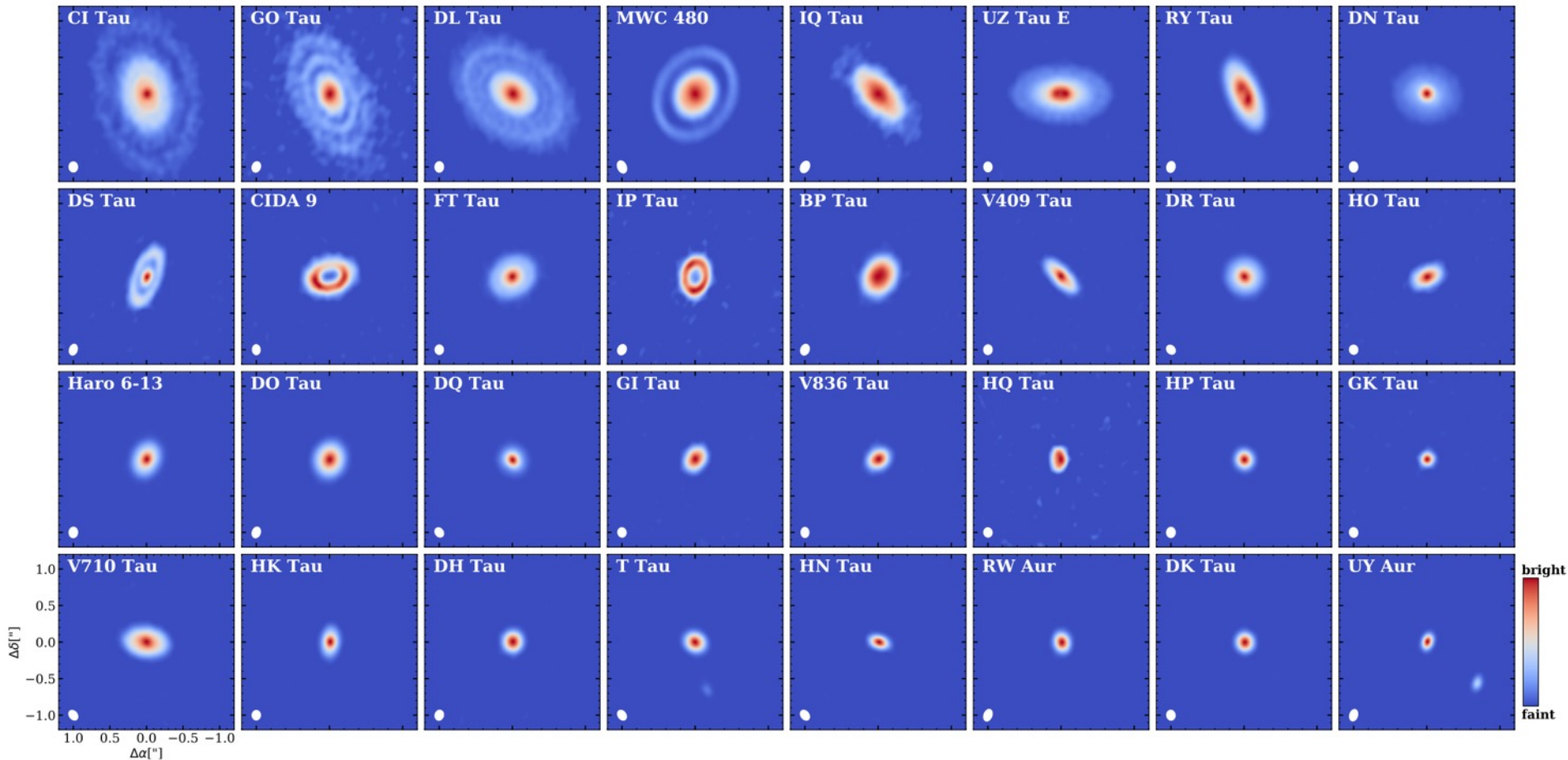


馬蹄軌道 horseshoe orbit



惑星への質量降着

Taurus の T-Tauri型星の円盤サーベイ



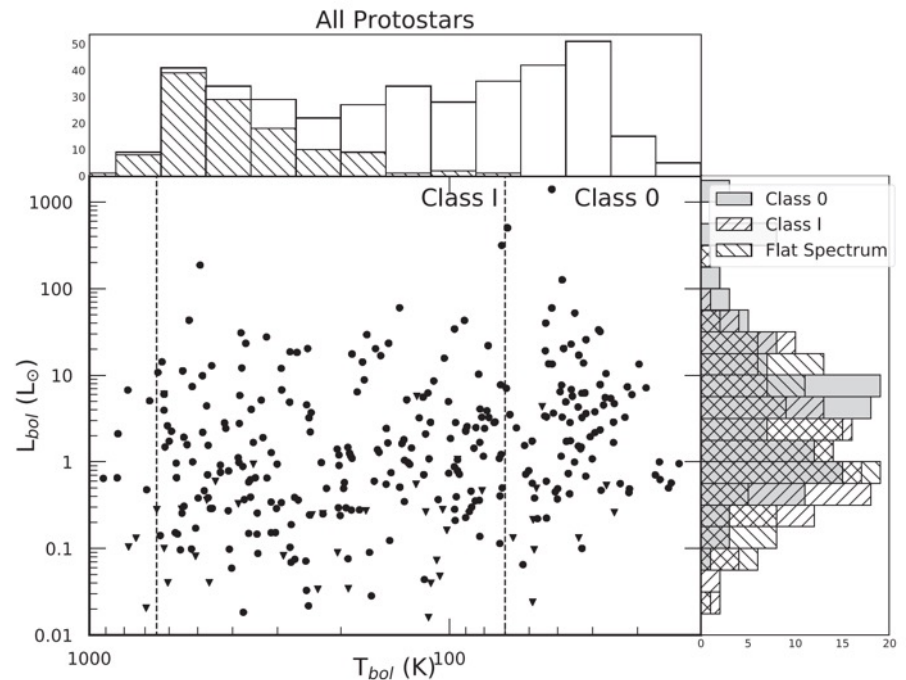
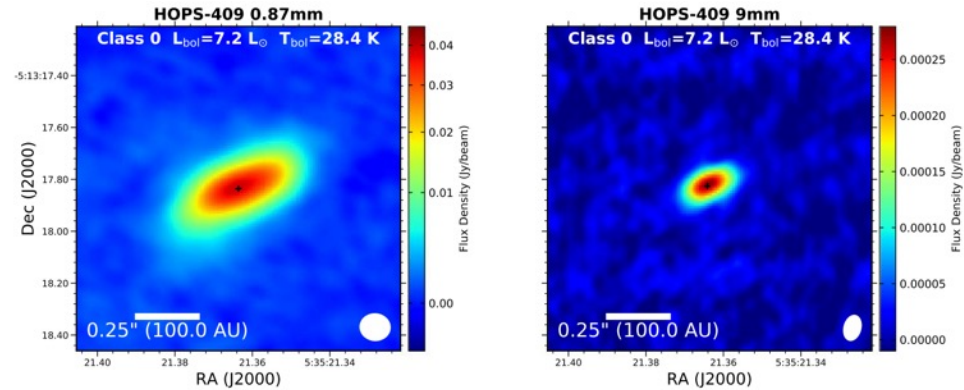
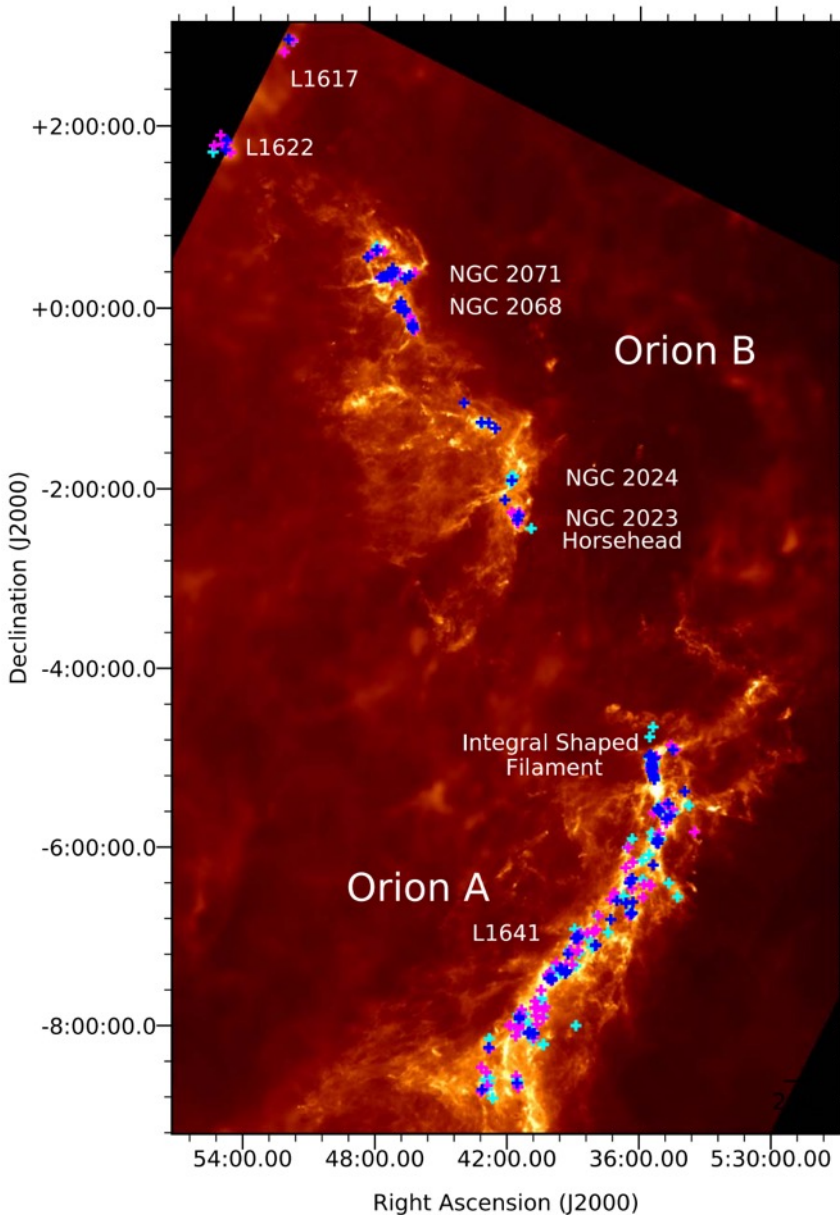
小さい円盤が多いが、50 au 以上の円盤には構造 (substructure) がある。

Long+ 2019

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2d2d>

さらに若い円盤
Class 0, I

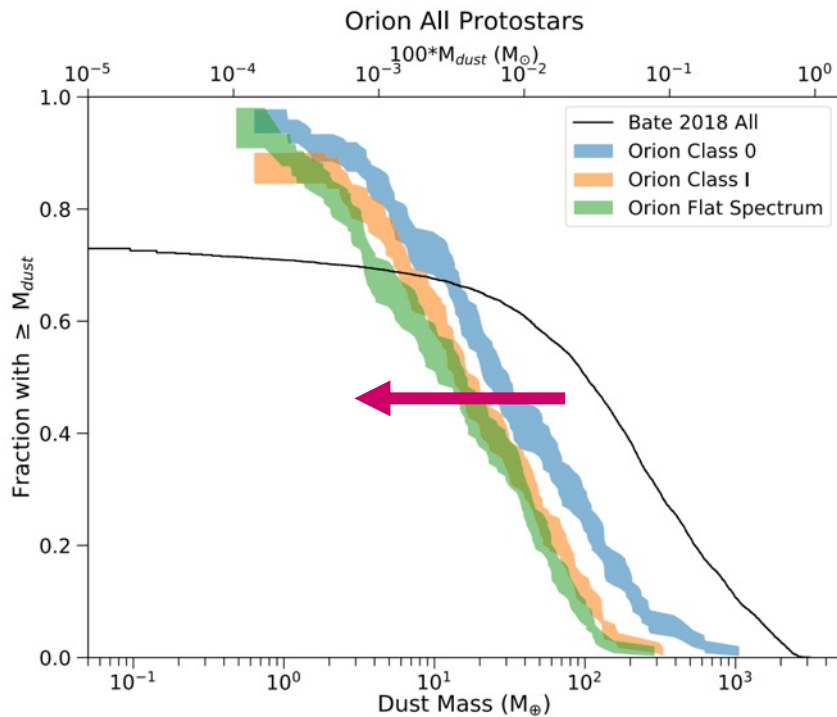
VANDAM survey of Orion protostars



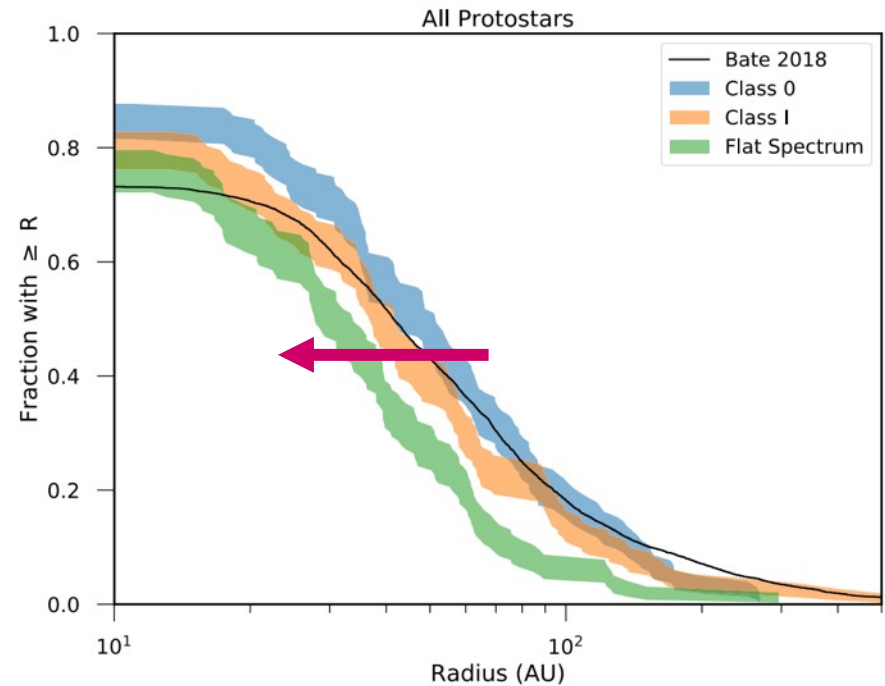
Tobin+ 2020

doi:10.3847/1538-4357/ab6f64

円盤質量と円盤半径は減少



円盤質量



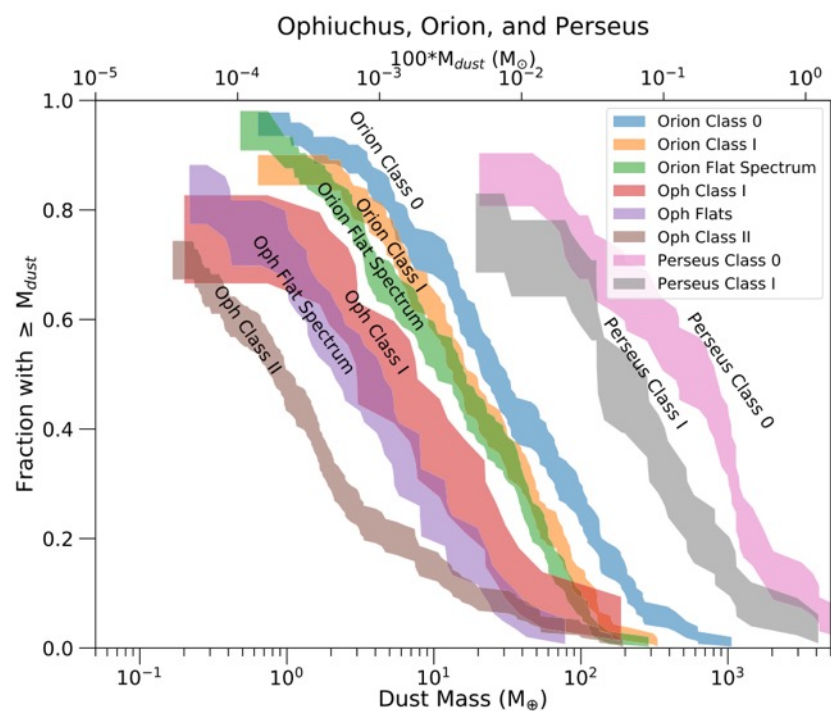
円盤半径

早い進化段階で巨大惑星の岩石コアが形成する必要がある

Tobin+ 2020

doi:10.3847/1538-4357/ab6f64

領域ごとの違い

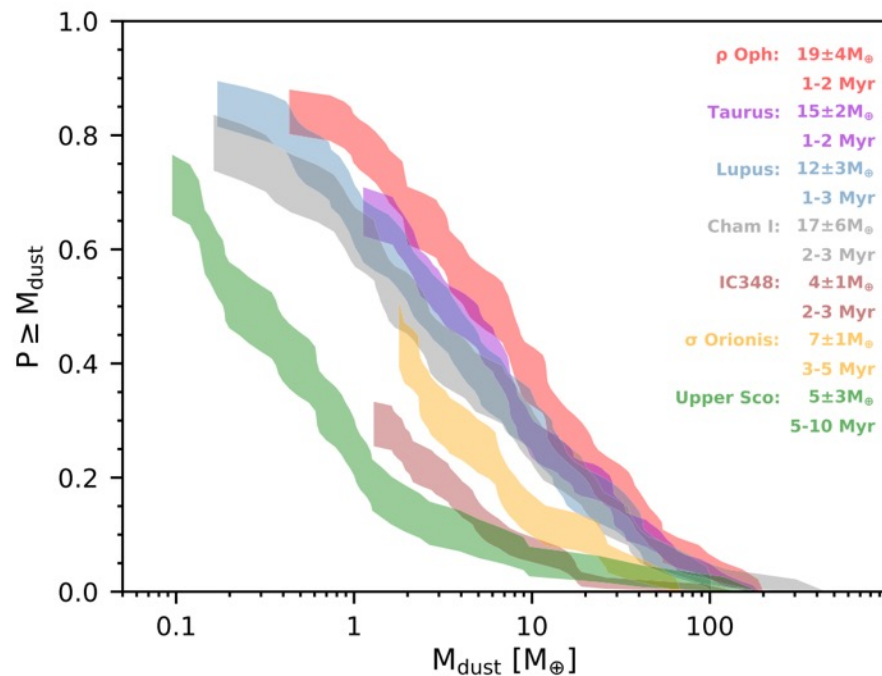


円盤質量

Tobin+ 2020

doi:10.3847/1538-4357/ab6f64

Class I, flat spectrum, Class II



円盤質量

c.f., Cieza+ 2019, ODIDEA Survey

doi:10.1093/mnras/sty2653

IRS 63, Class I 天体でもリング・ギャップ形成

Segura-cox
2020

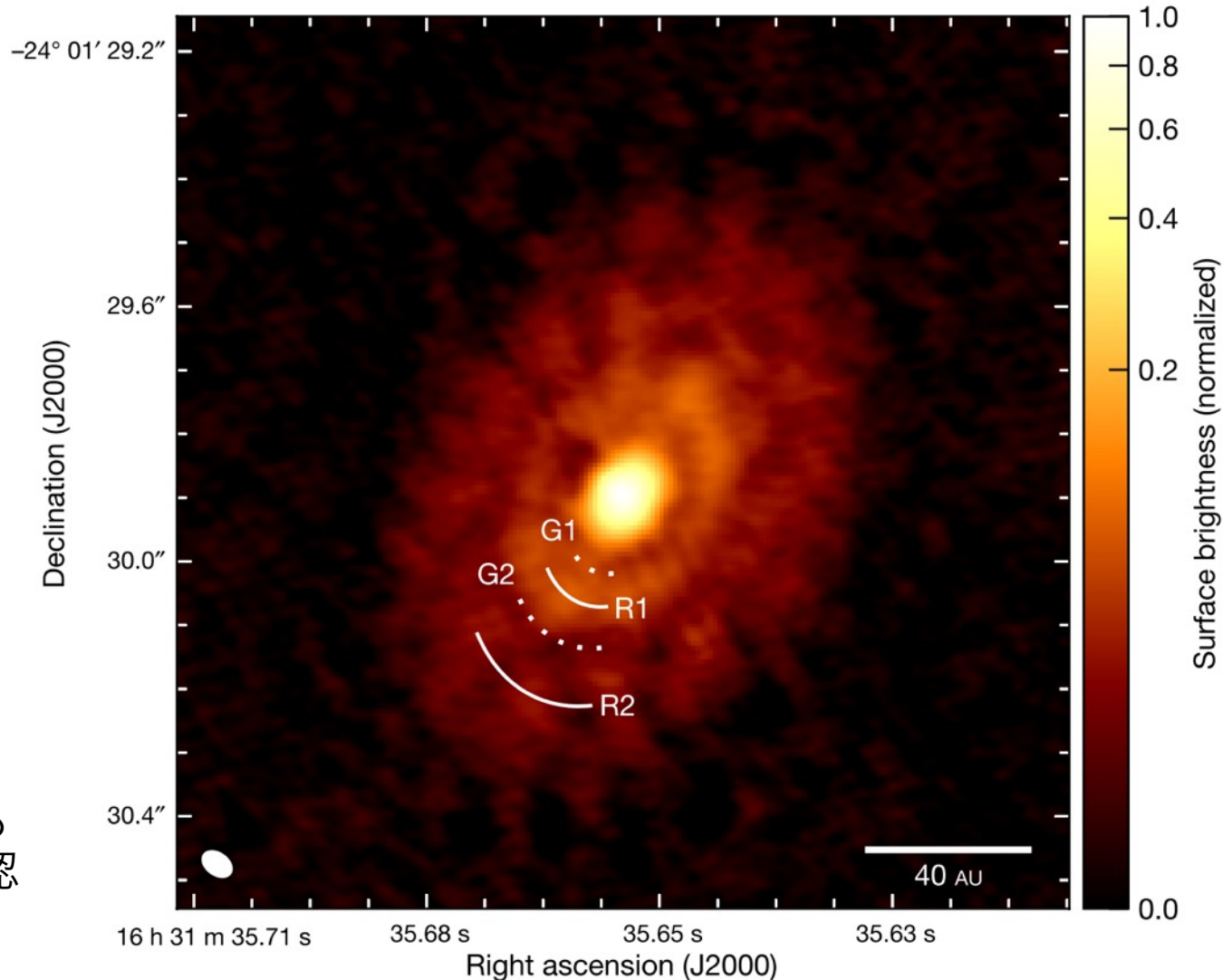
<http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2779-6>

従来のシナリオ：
Class II 以降で
惑星形成



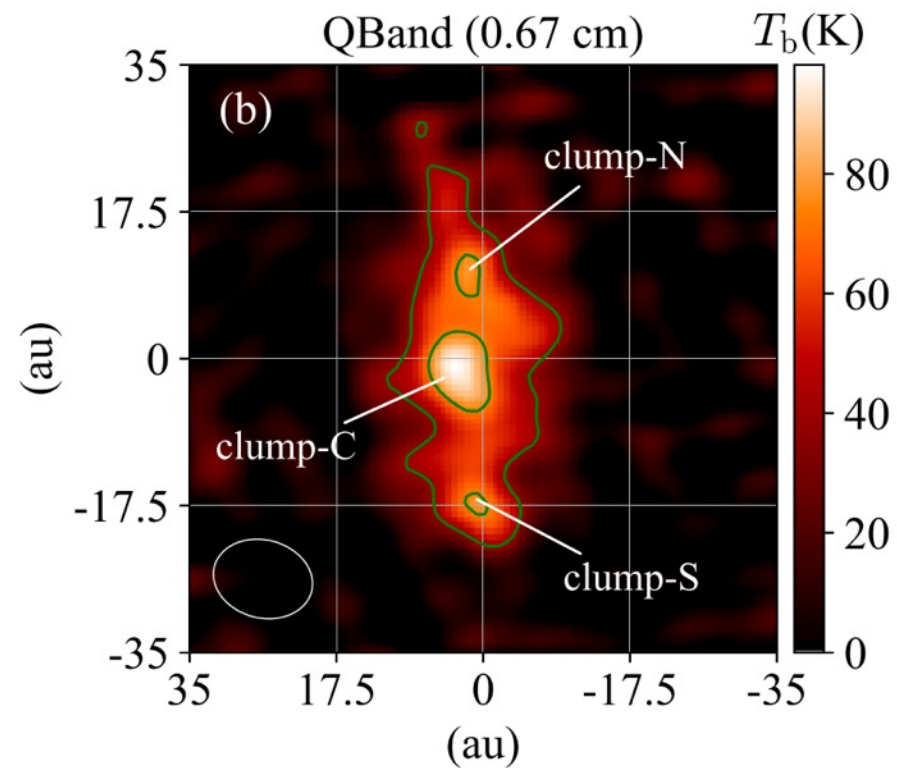
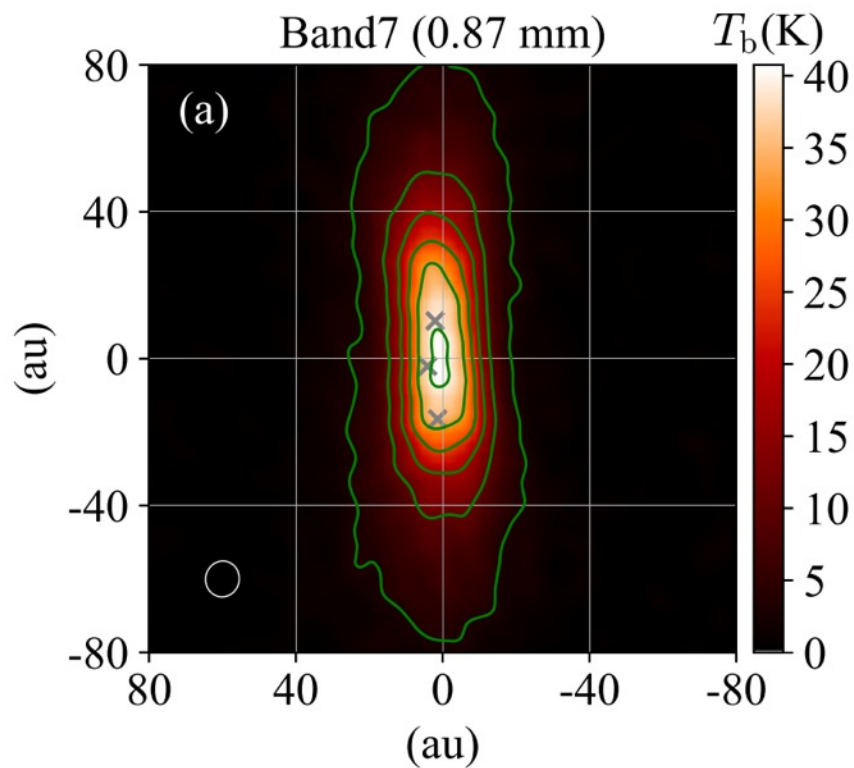
最近観測の示唆：
Class I でも
惑星形成の兆候

C.f., Class 0-I でも
ダストの成長を確認
Li et al. 2017,
Galamez+ 2019



Class 0/I にリング？渦状腕？

L1527 IRS, edge-on disk

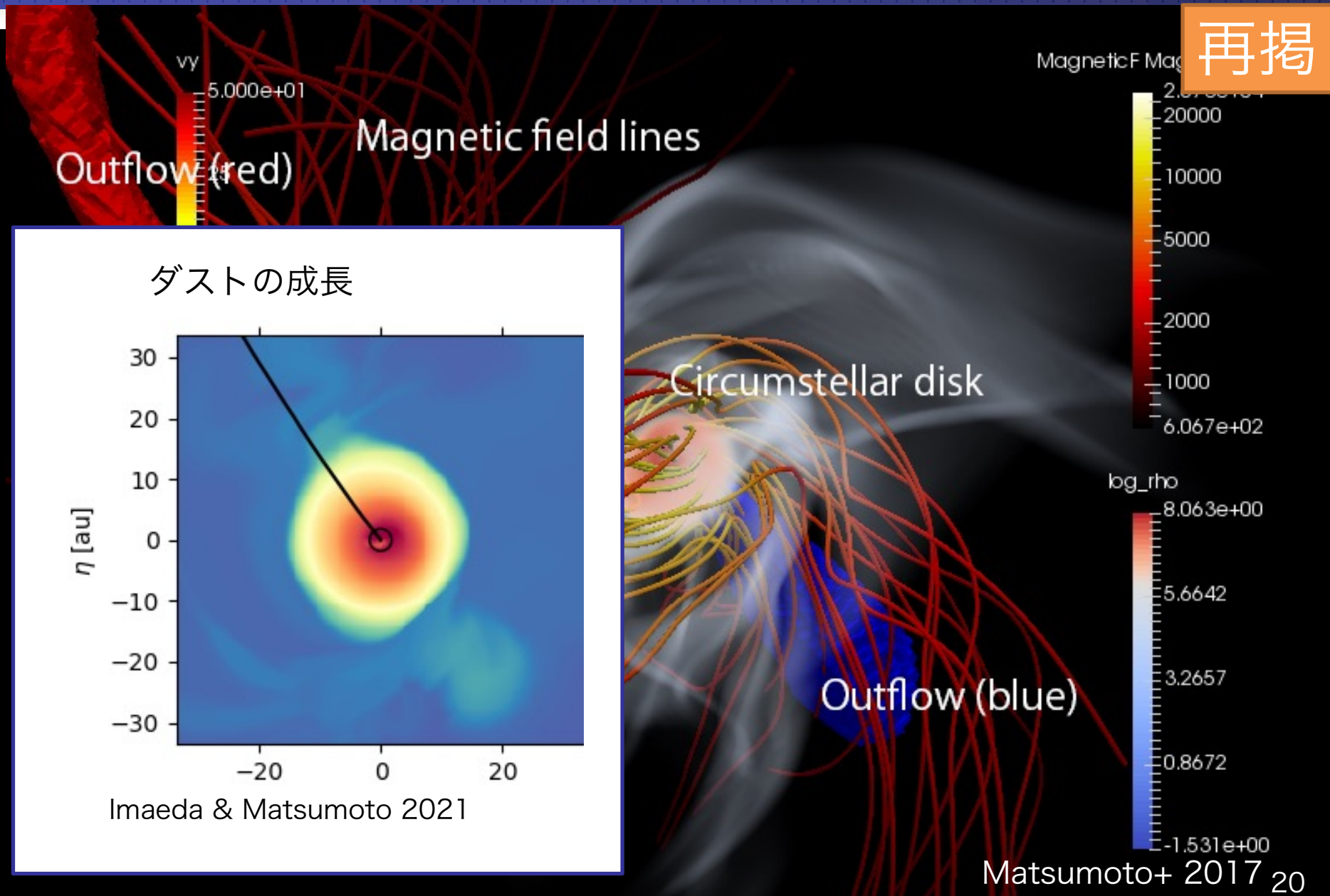


Nakatani+ 2020

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8eaa>

Class 0 天体におけるダスト成長 (理論)

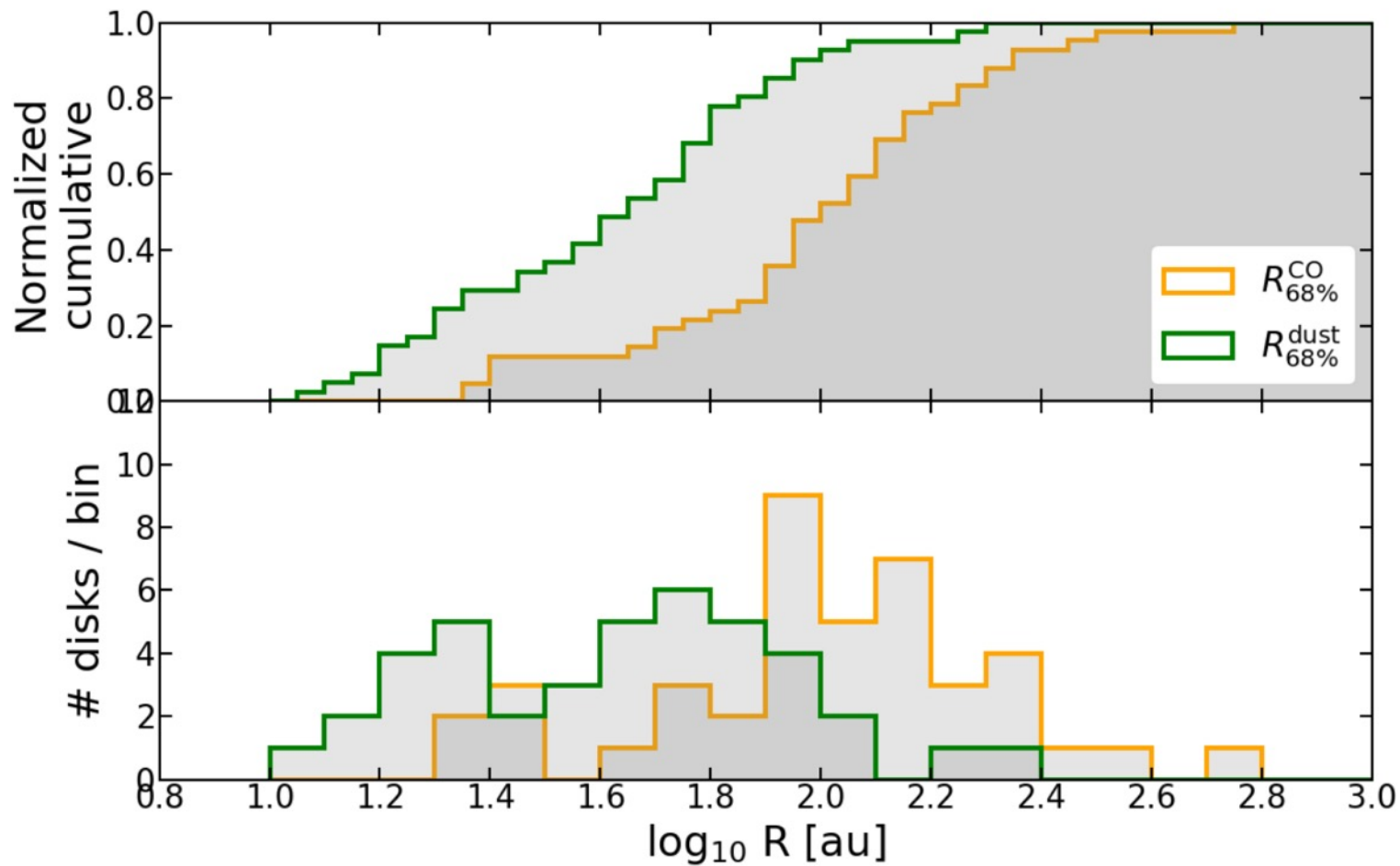
再掲



ダスト円盤
ガス円盤

ガス円盤とダスト円盤の大きさ

$R_{\text{CO}}/R_{\text{dust}} = 2.5$ Lupus clouds



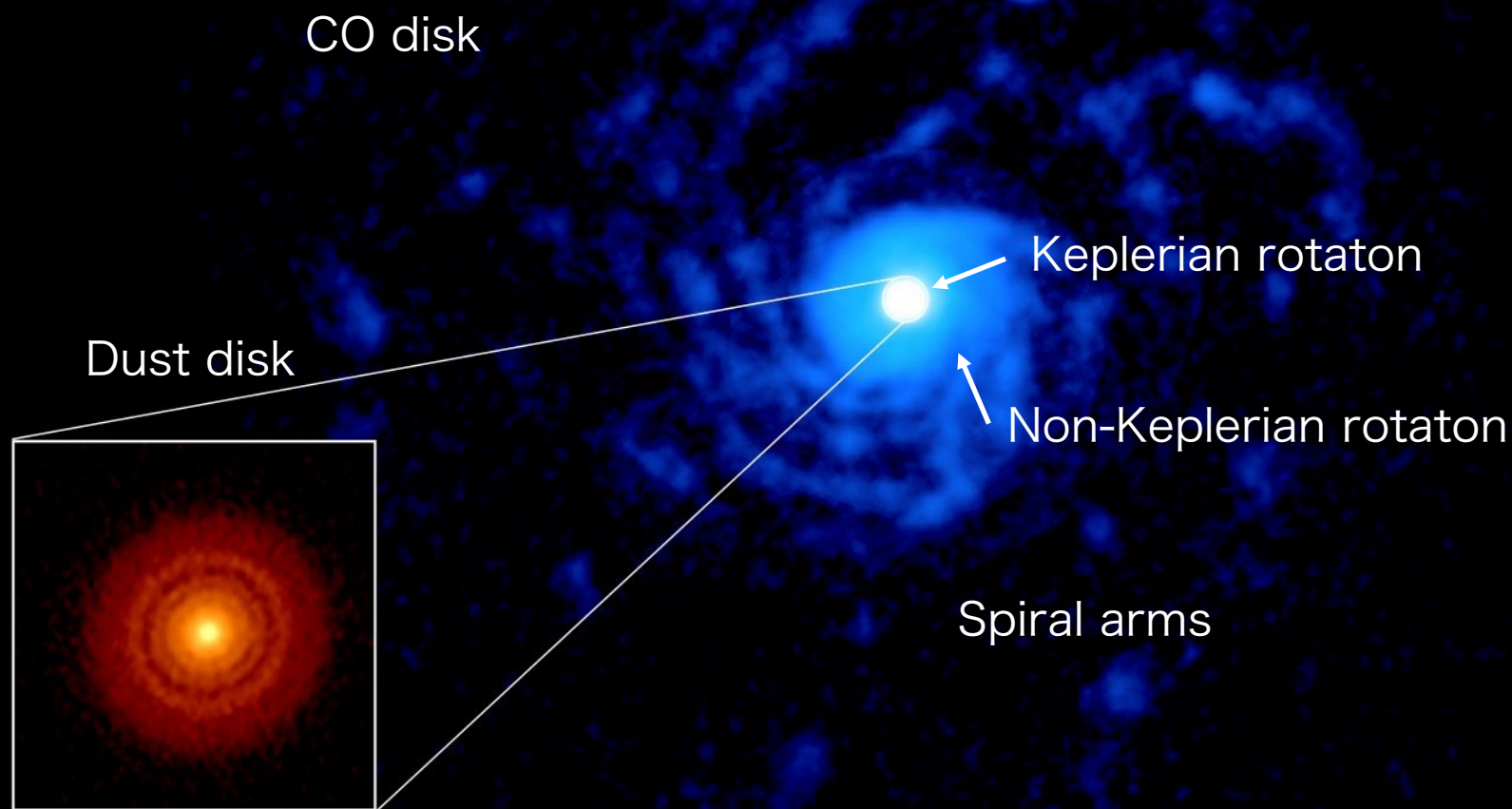
Sanchis+ 2021

doi:10.1051/0004-6361/202039733

RU Lup 広がったガス円盤

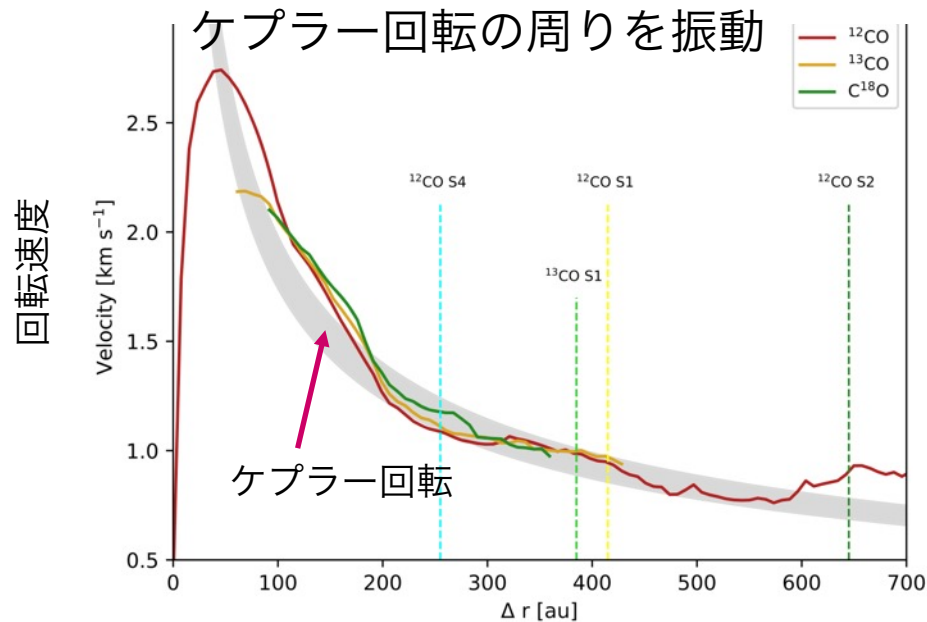
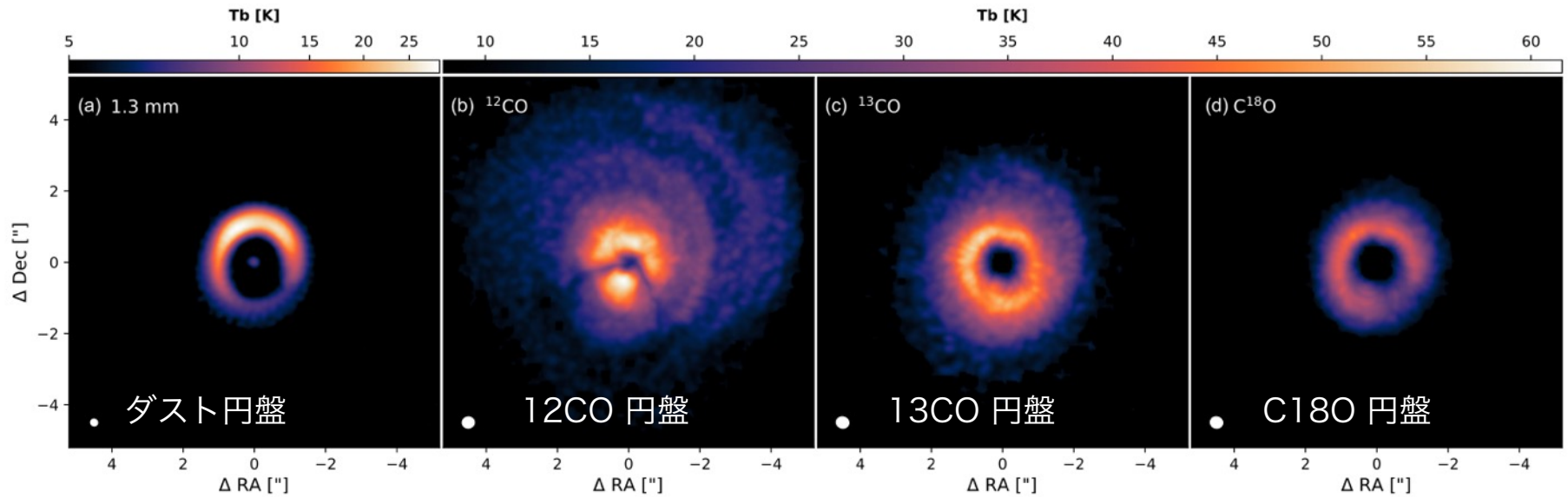
Huang+ 2020

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba1e1>



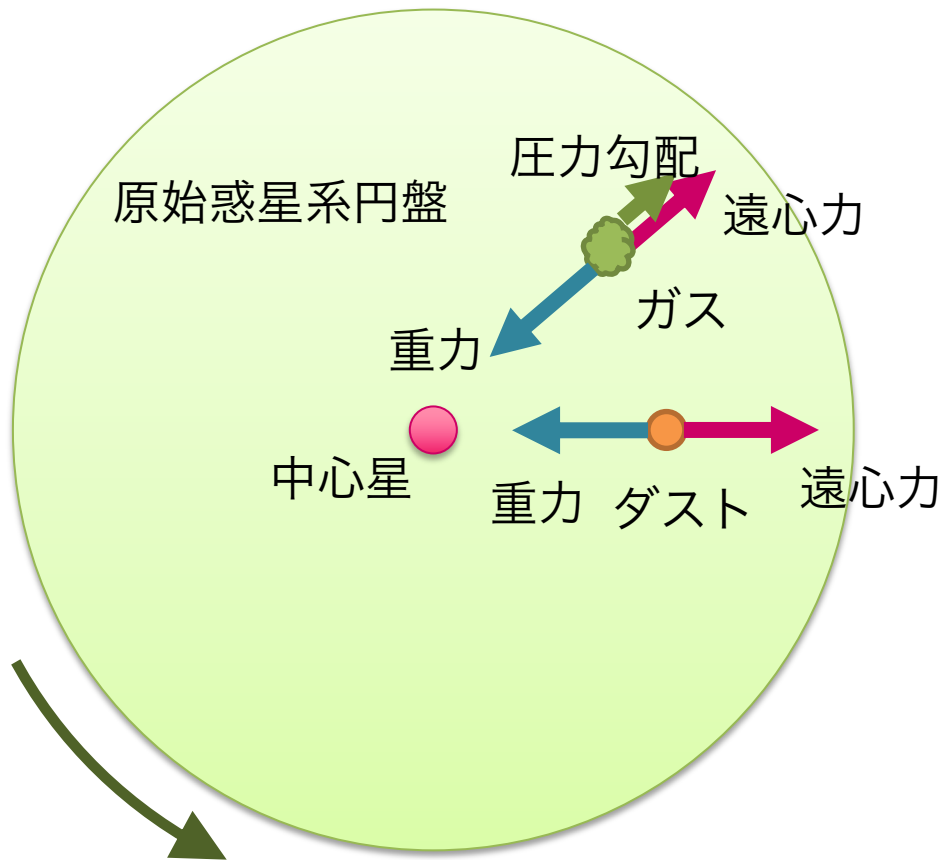
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), J. Huang and S. Andrews; NRAO/AUI/NSF, S. Dagnello

HD 142527 広がったガス円盤



Garg+ 2021
doi:10.1093/mnras/stab800

ダストの落下



ガスの回転速度はケプラー回転より遅い
ダストは向かい風を受けて減速
ダストの落下

ダストが小さくガスとよく混ざる
 $St \ll 1$
→ 落下しない

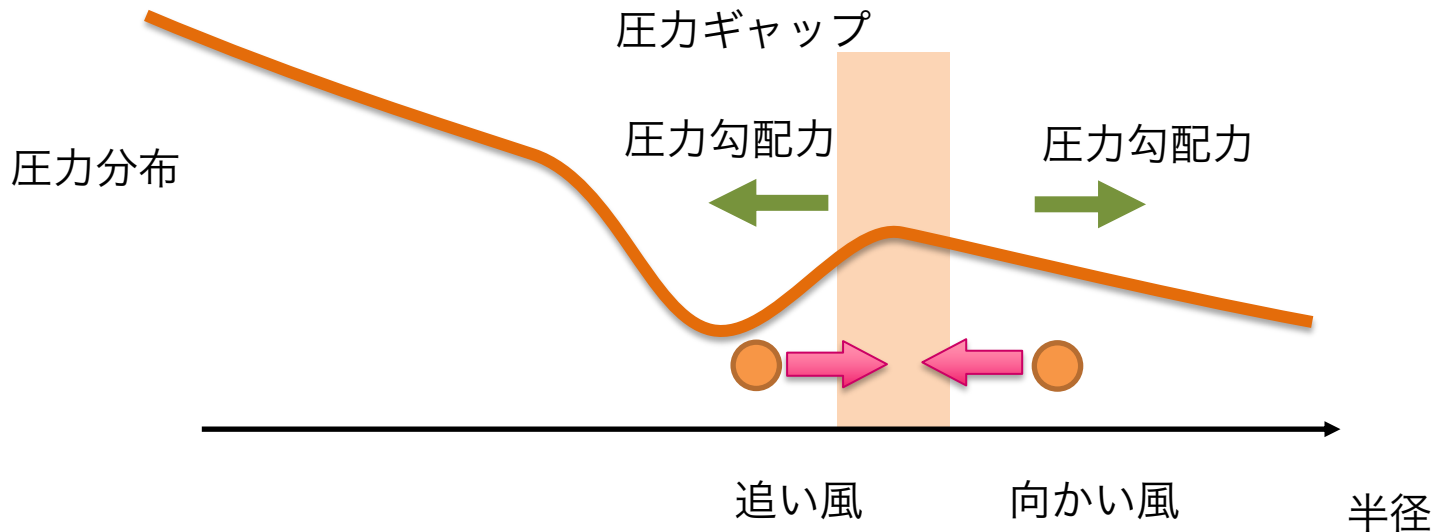
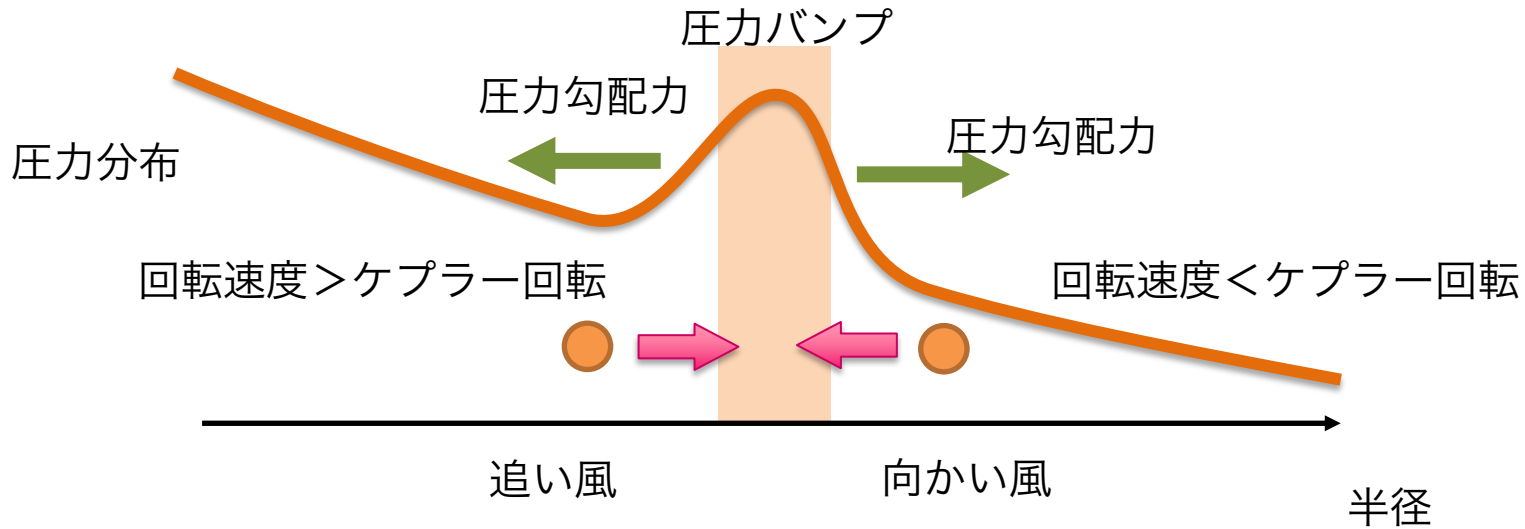
中間
 $St \sim 1$
→ 落下する

ダストが大きくガスとデカップル
 $St \gg 1$
→ 落下しない

St: ストークス数 $St = \Omega_K t_{\text{stop}}$

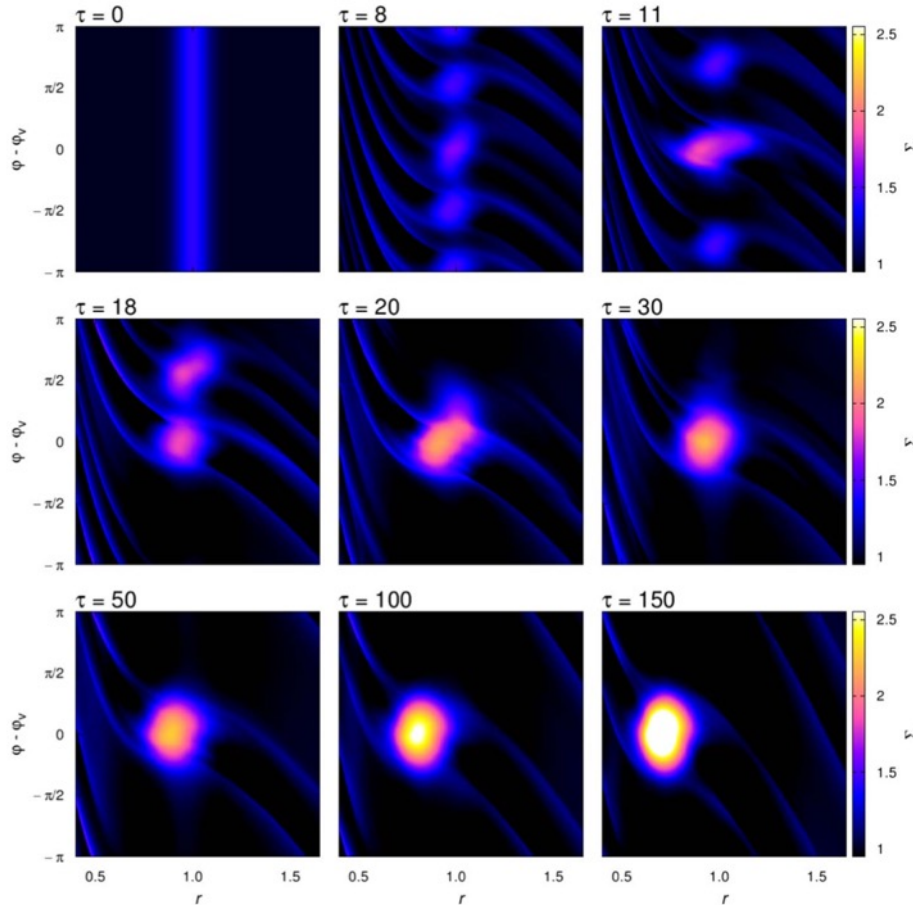
ダストは成長の過程 (St 増加) で必ず落下してしまう

圧力バンプやギャップでダストが集積



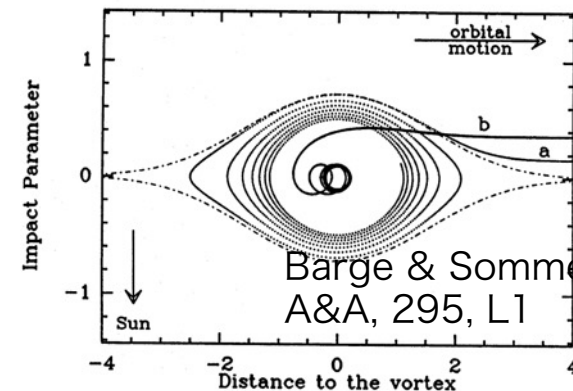
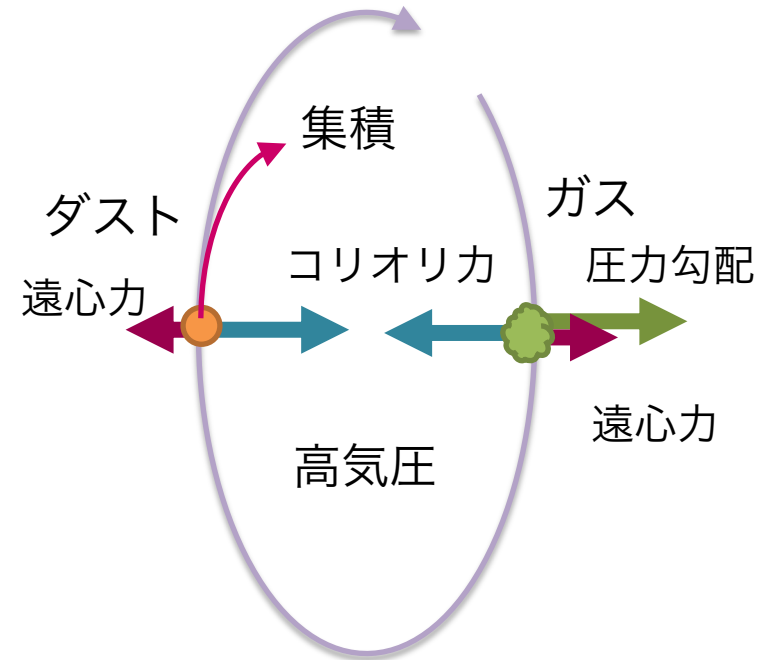
渦でダストを集積

ロスビー不安定 (渦の形成)
渦は高気圧



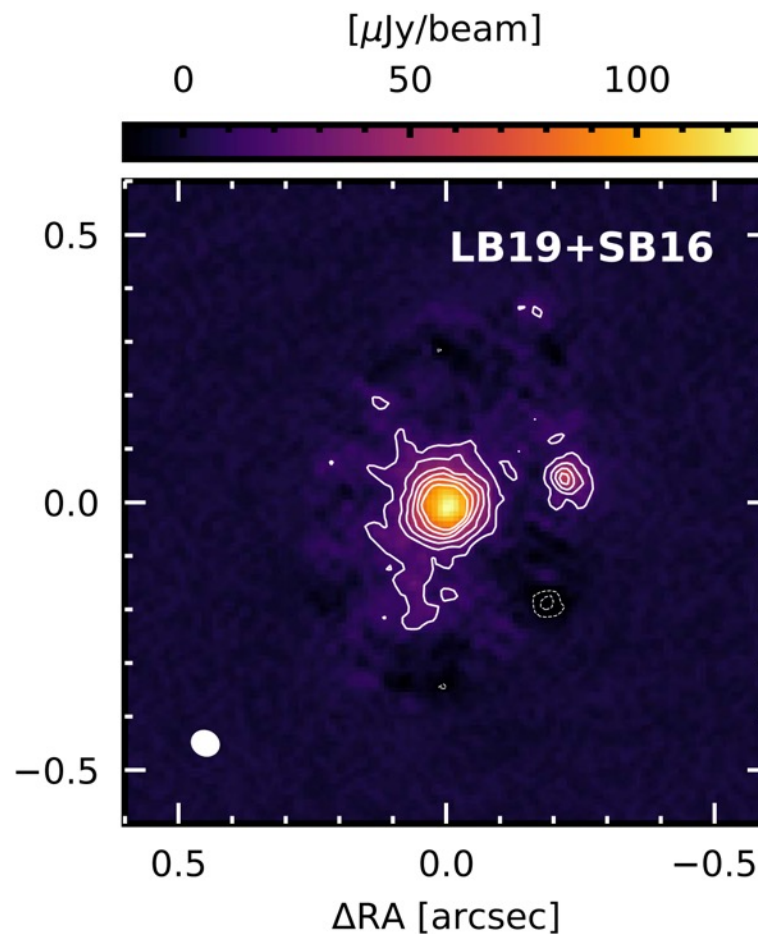
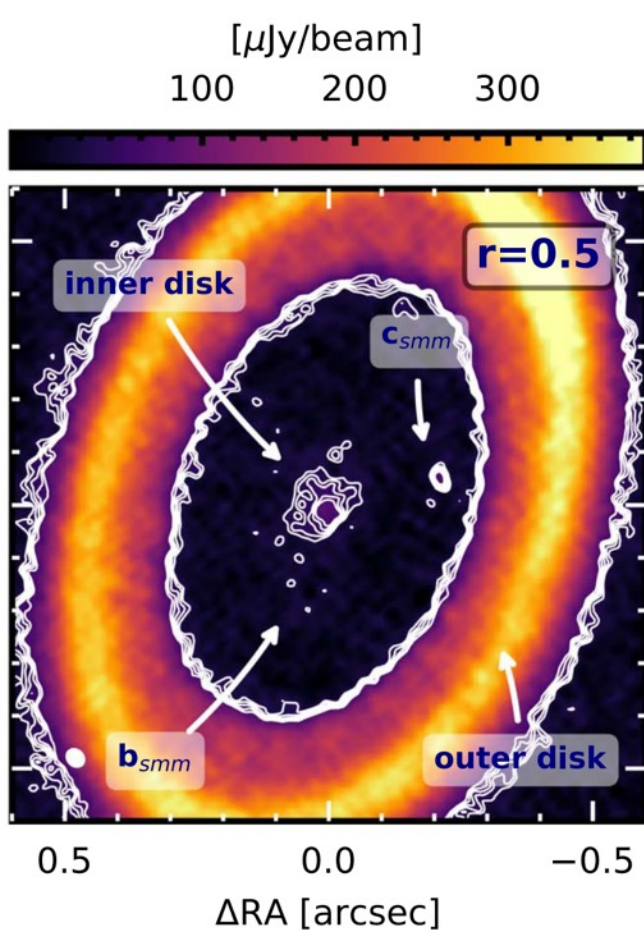
Ono+ 2018
doi:10.3847/1538-4357/aad54d

渦でダストを集める



周惑星円盤を分解

ALMA observation toward PDS 70



Benisty 2021

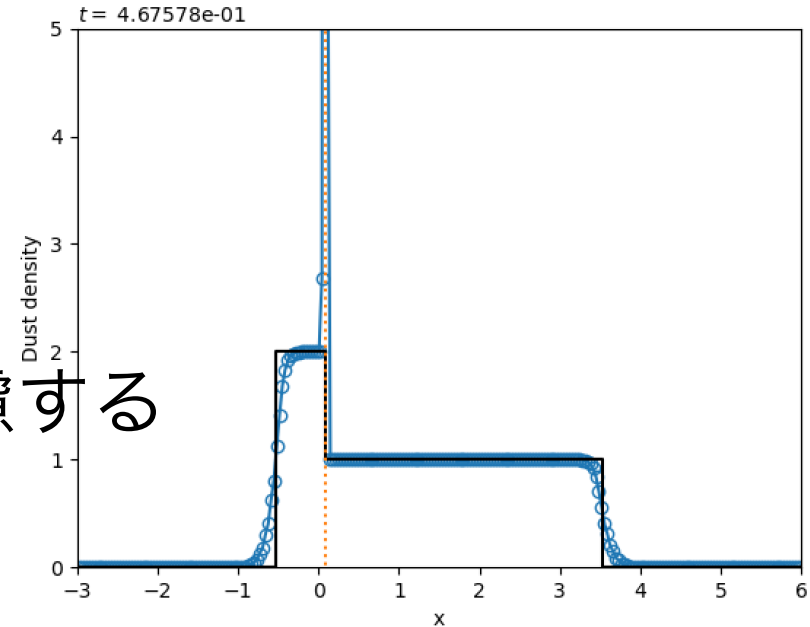
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac0f83>

ダストの力学

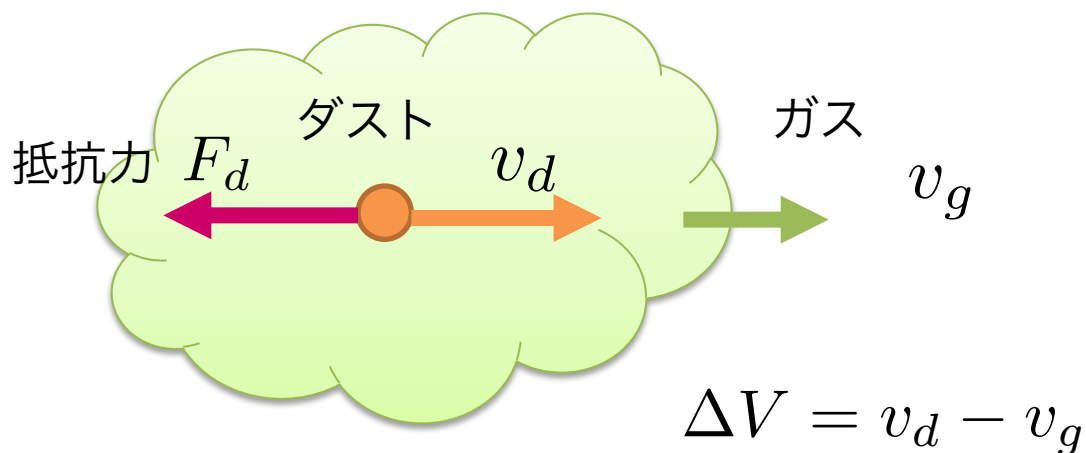
ダスト+ガスのシミュレーション

ダストの衝撃波管問題

- ダストの運動を解く
 - ガス+ダスト二流体
 - ダストのリーマン解
 - ガスからの抵抗力を考慮する
- ダストの合体成長
 - 乱流のサブグリッドモデルを作る
 - ガス同士の相対速度を求める
 - ダストの合体成長を解く



ダストがガスから受ける抵抗力



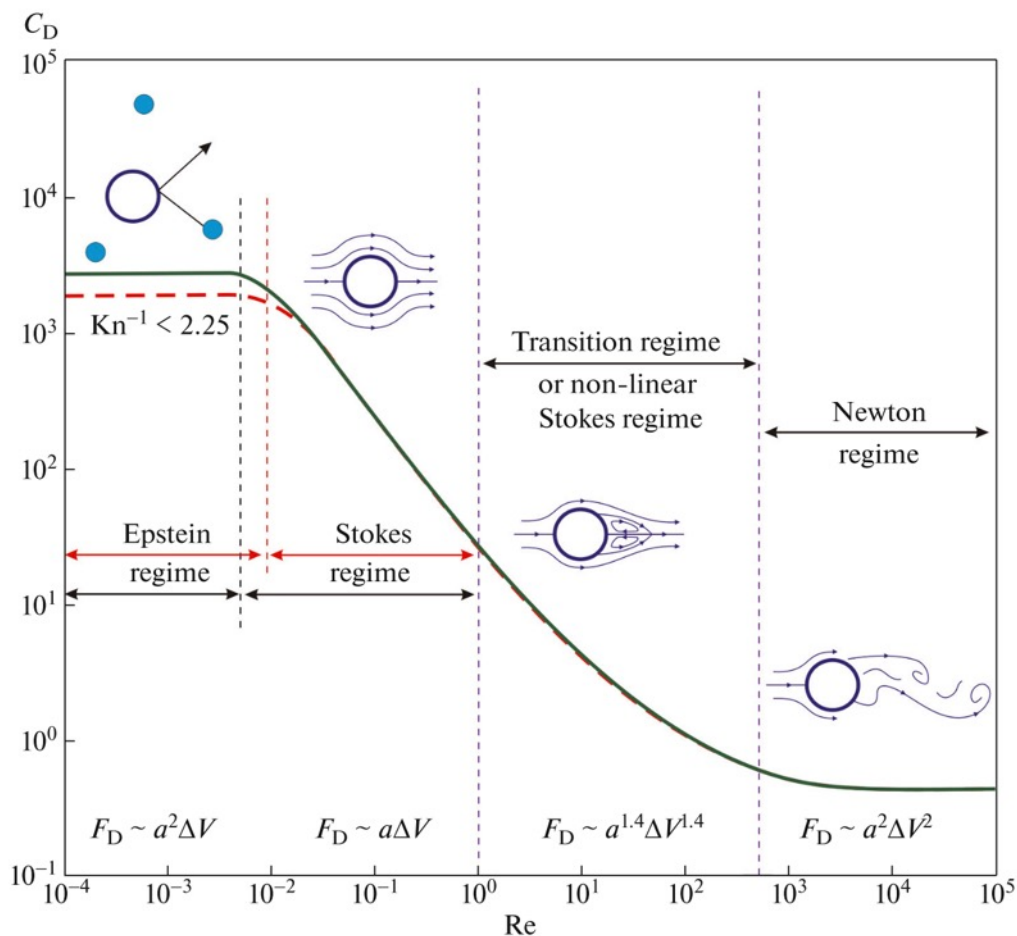
抵抗力 $F_D = -\frac{m_d \Delta V}{t_{\text{stop}}} = -\frac{1}{2} C_D \sigma_d \rho_g \Delta V^2$

制動時間

Cd 値がわかると t_{stop} がわかる \rightarrow ストークス数 St がわかる

$St = \Omega_K t_{\text{stop}}$ 制動時間と力学時間の比

ダストの制動時間



$$\text{Kn} = \frac{l_g}{a_d} \quad \text{クヌッセン数}$$

Epstein 領域 分子レベル

$$t_{\text{stop}} \propto \frac{\rho_d a_d}{\rho_g c_s}$$

Stokes 領域 分子どろどろ

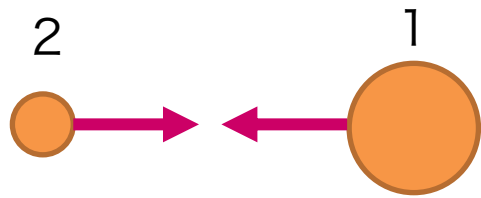
$$t_{\text{stop}} \propto \frac{\rho_d a_d^2}{\rho_g l_g c_s}$$

l_g 分子の平均自由行程

Newton 領域 日常レベル

$$t_{\text{stop}} \propto \frac{\rho_d a_d}{\rho_g \Delta V}$$

乱流中のダストの合体成長

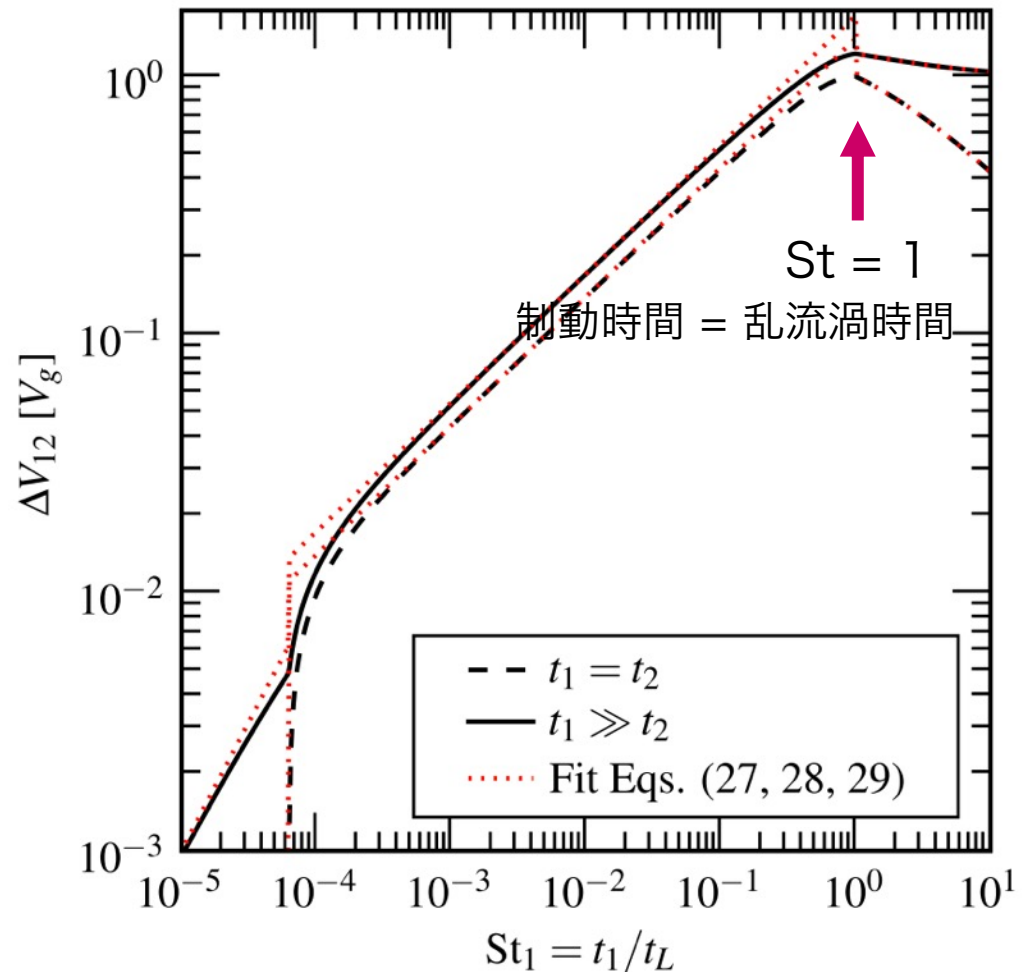


$$\frac{dm_d}{dt} = \sigma_d \rho_d \Delta V_{12}$$

ダストが濃いほど
相対速度が大きいほど
合体成長する。

速すぎると破壊される。

乱流中のダスト間の相対速度



Ormel & Cuzzi 2007

doi:10.1051/0004-6361:20066899

この分野で残された話題

- 原始惑星系円盤のギャップの起源
 - 惑星？○○不安定？
- ダストの落下、惑星の落下問題
 - こんなんで惑星を作れるの？
- 惑星形成はいつはじまるか？
 - 若い天体(Class I)における惑星形成の兆候
- ガス円盤とダスト円盤の関係
- 衛星形成研究の黎明期