

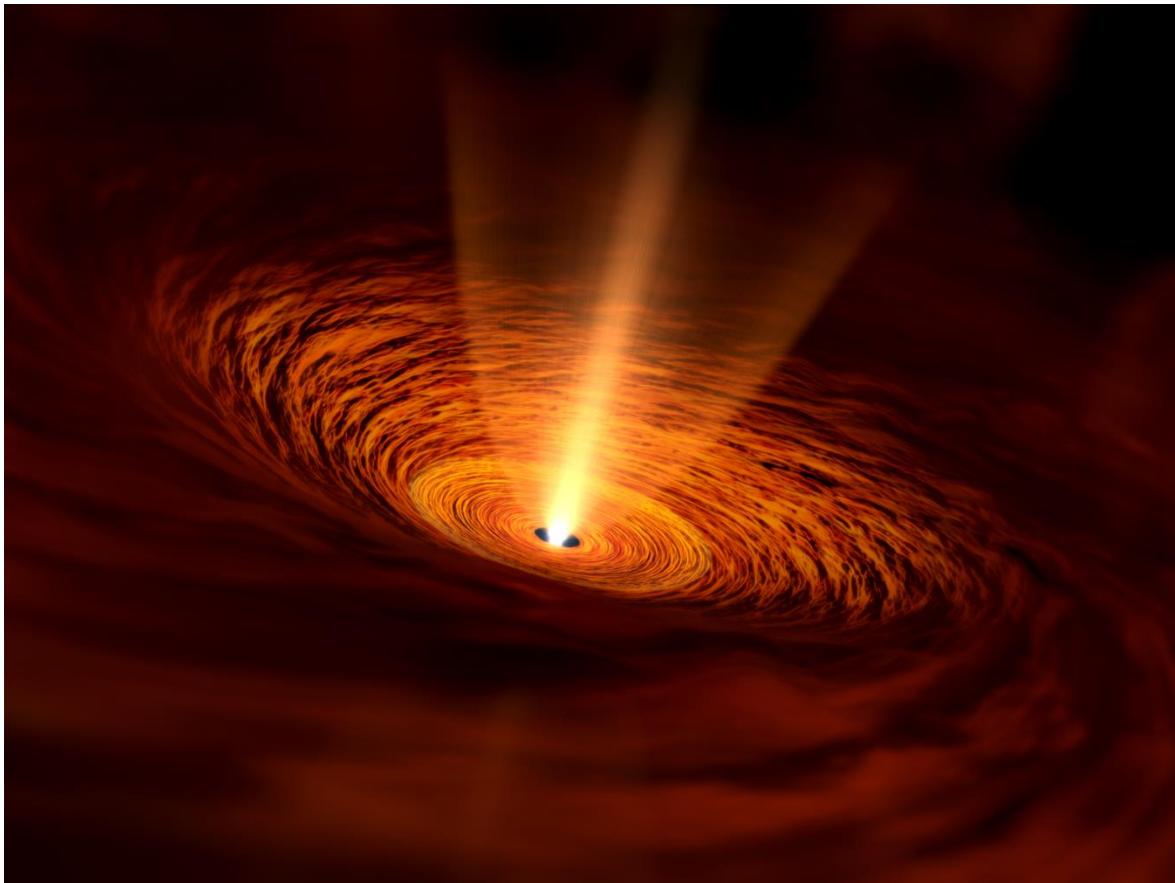
原始惑星系円盤の形成と 惑星形成における磁場の役割



大橋聰史
(東京大学)

星・惑星形成における円盤の役割

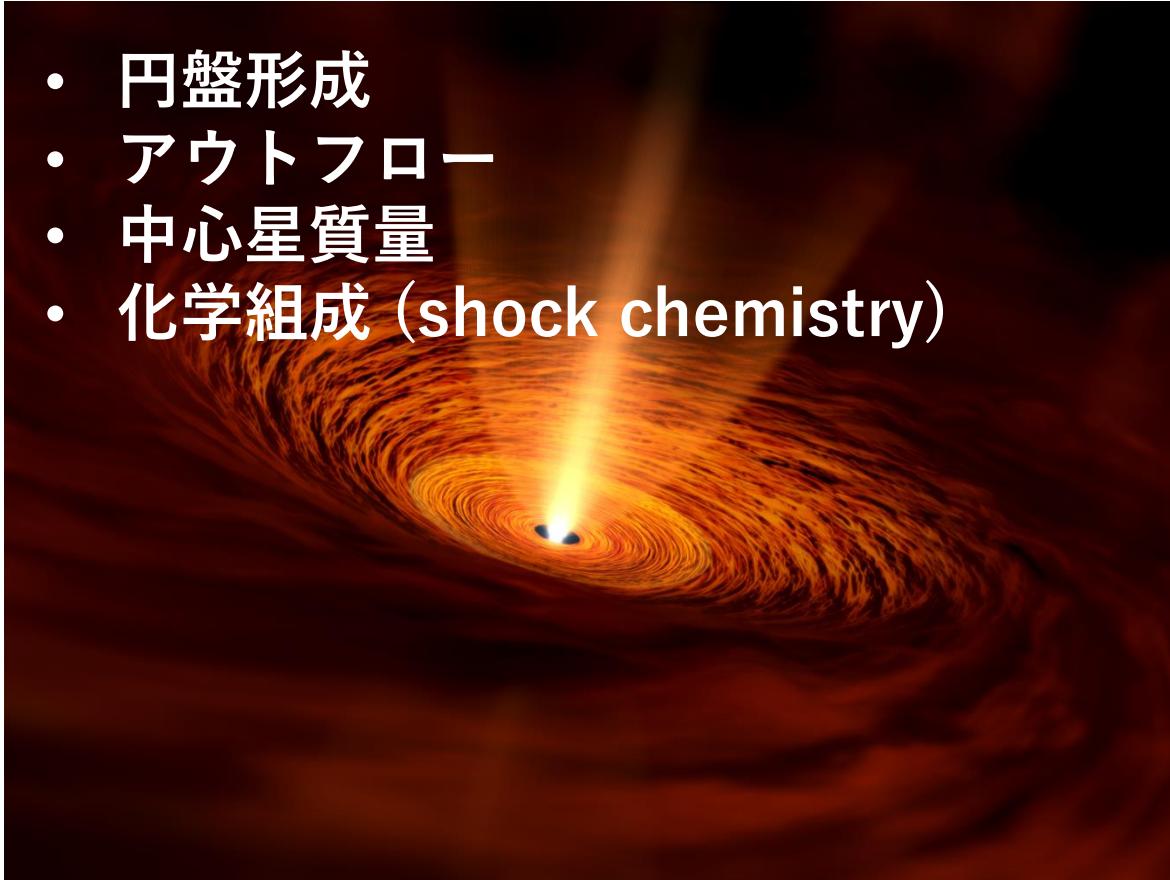
- 原始星への質量降着過程(Class 0/I)
- 惑星形成の誕生現場 (Class IIだと考えられていた)



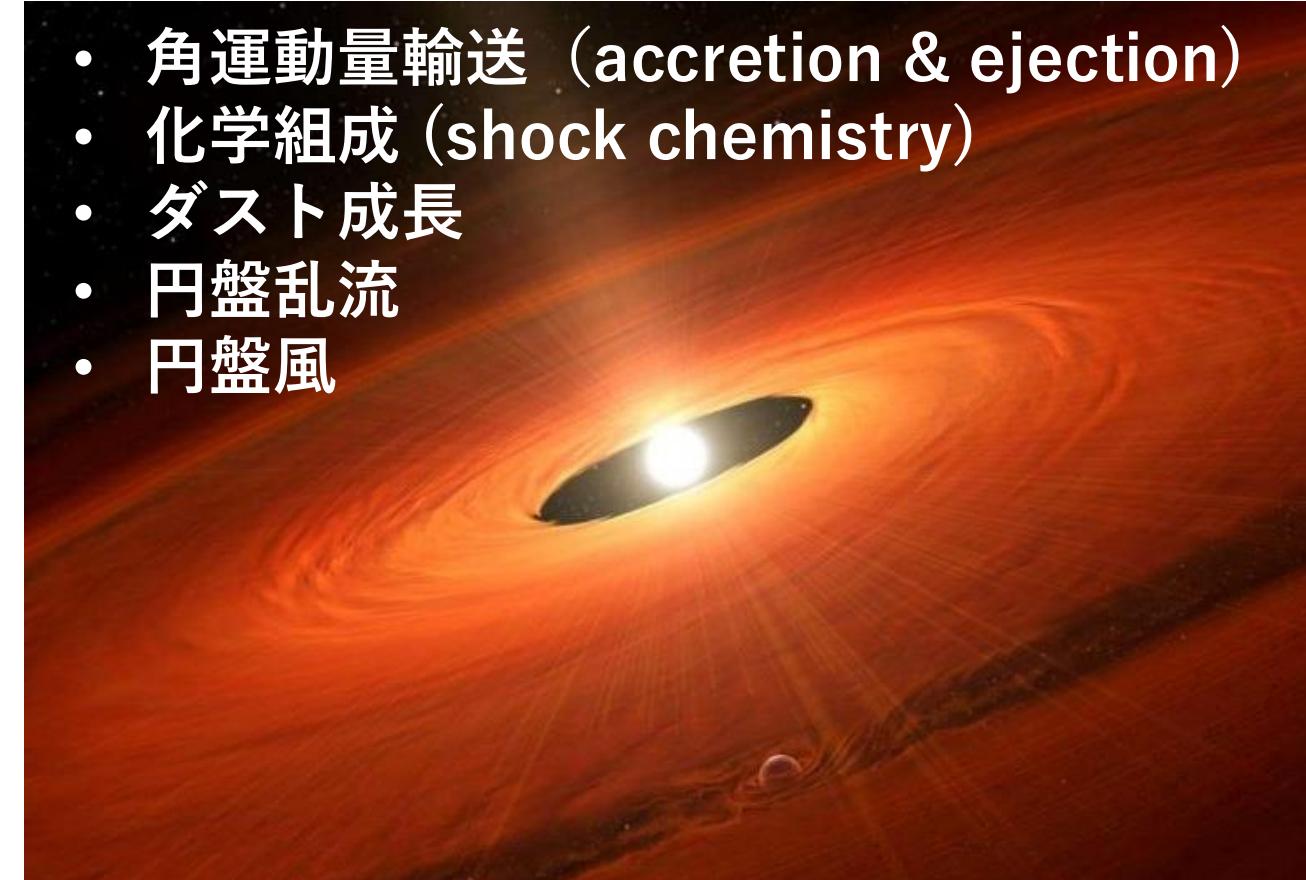
星・惑星形成における円盤の役割

- 原始星への質量降着過程(Class 0/I)
- 惑星形成の誕生現場 (Class IIだと考えられていた)

- 円盤形成
- アウトフロー
- 中心星質量
- 化学組成 (shock chemistry)



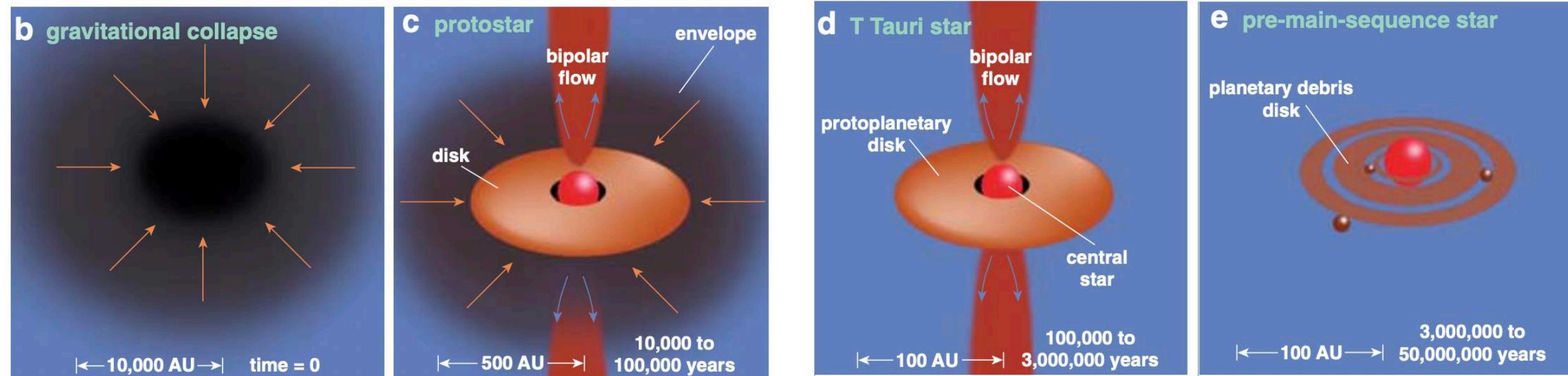
- 角運動量輸送 (accretion & ejection)
- 化学組成 (shock chemistry)
- ダスト成長
- 円盤乱流
- 円盤風



これら全てに磁場が関係する

星・惑星形成における円盤の役割

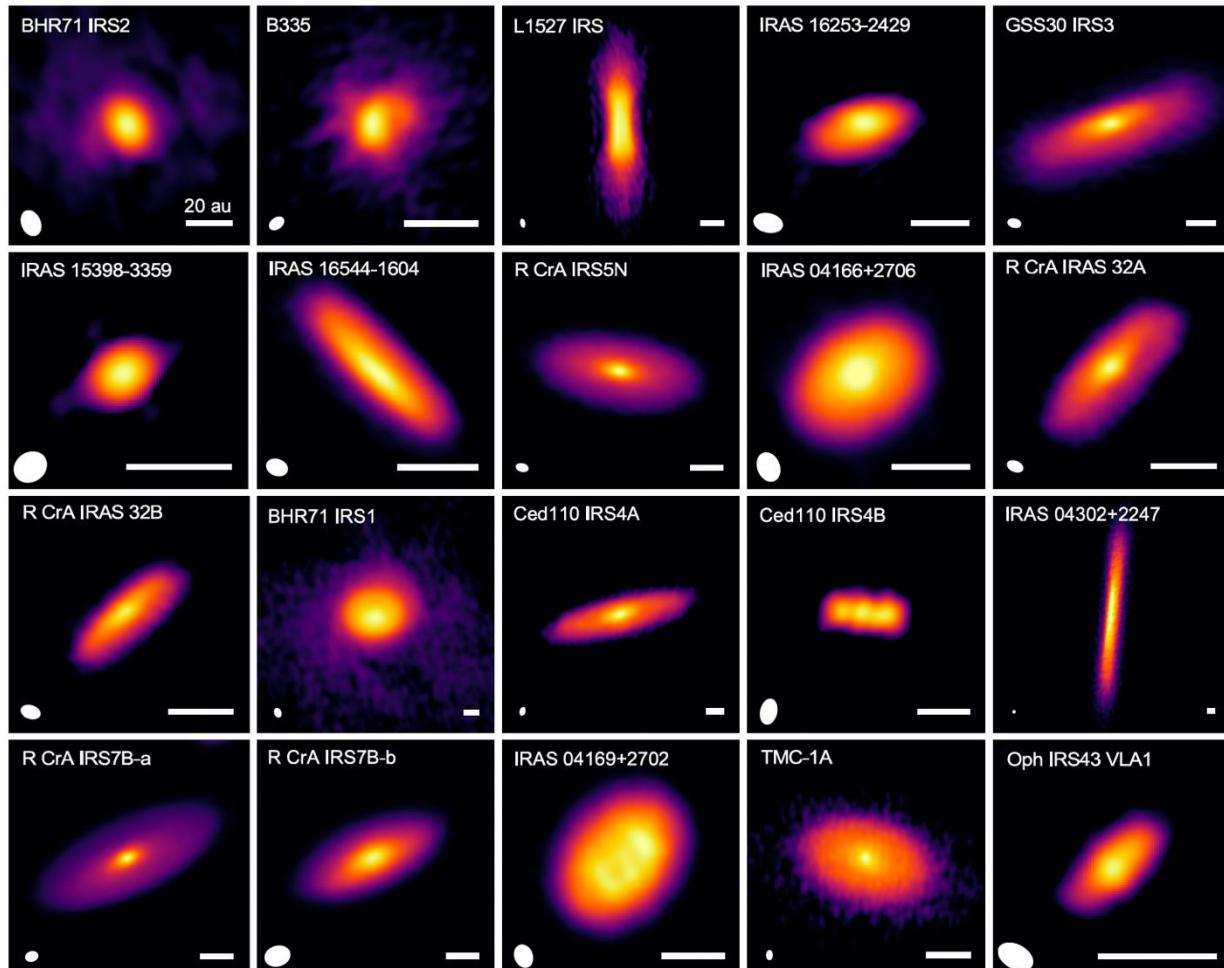
- 原始星への質量降着過程(Class 0/I)
10-100万年のClass 0/I 円盤
- 惑星形成の誕生現場 (Class IIだと考えられていた)
100-1000万年のClass II 円盤



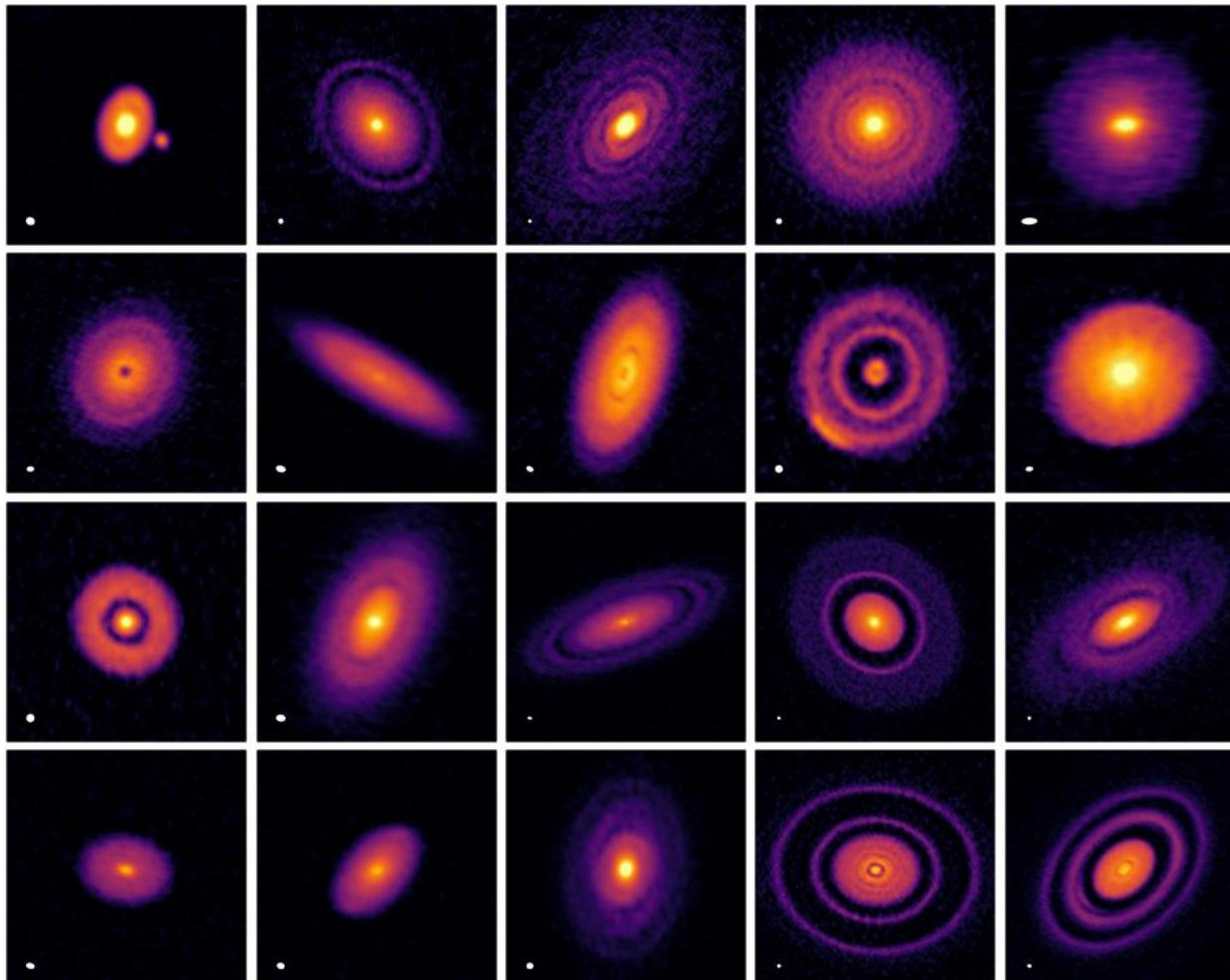
星・惑星形成における円盤の役割

- 原始星への質量降着過程(Class 0/I)
- 惑星形成の誕生現場 (Class IIだと考えられていた)

10-100万年のClass 0/I 円盤



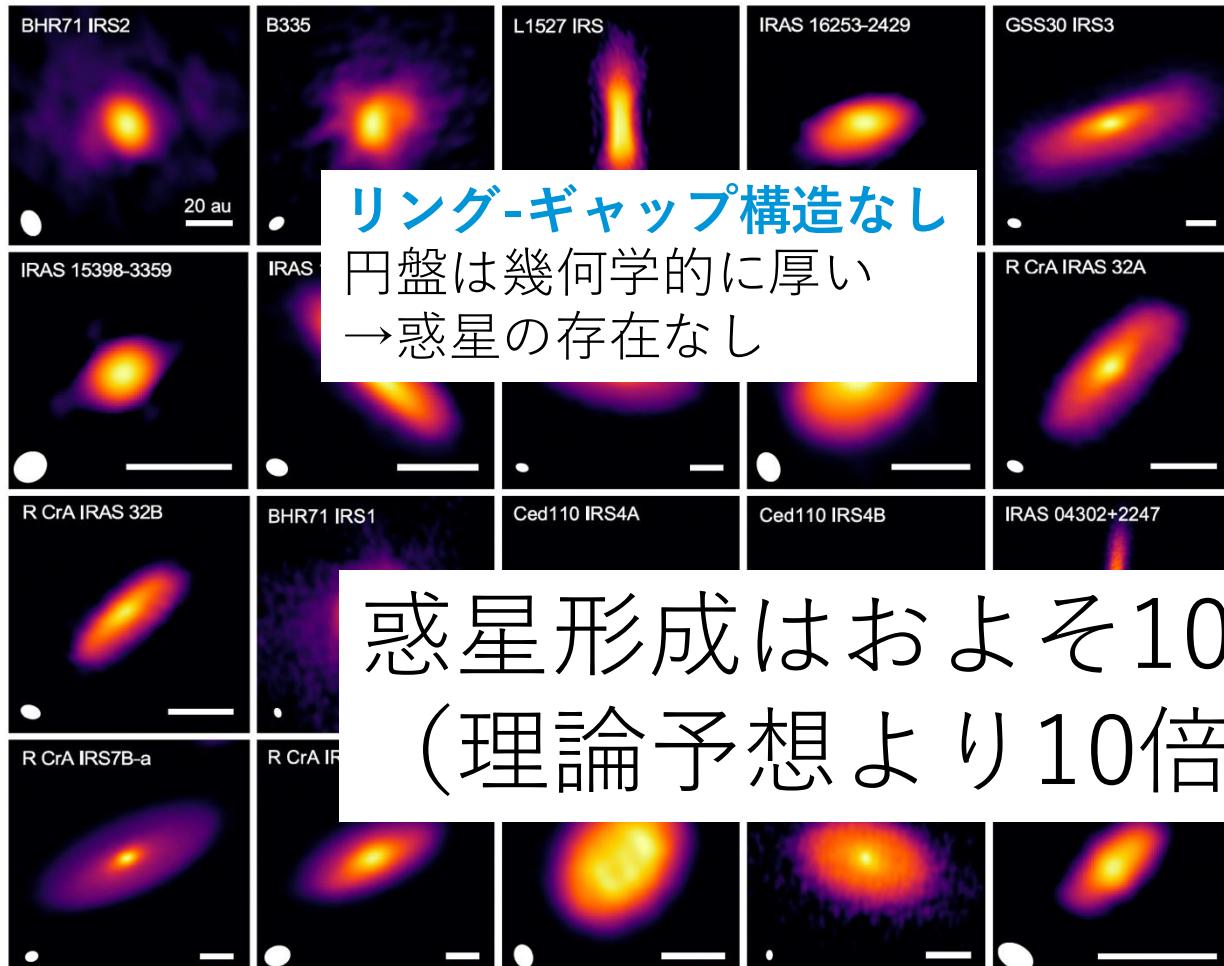
100-1000万年のClass II 円盤



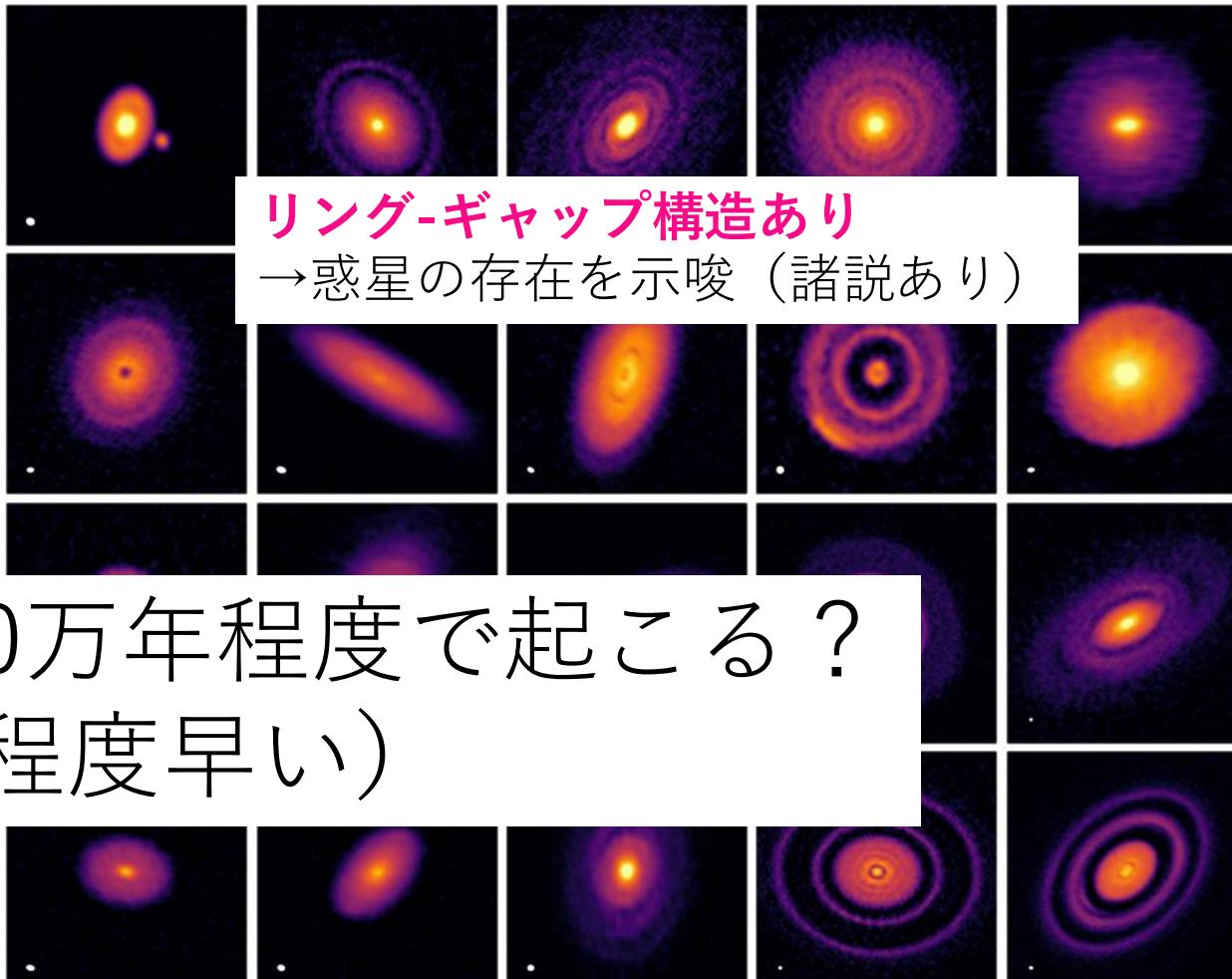
星・惑星形成における円盤の役割

- 原始星への質量降着過程(Class 0/I)
- 惑星形成の誕生現場 (Class IIだと考えられていた)

10-100万年のClass 0/I 円盤



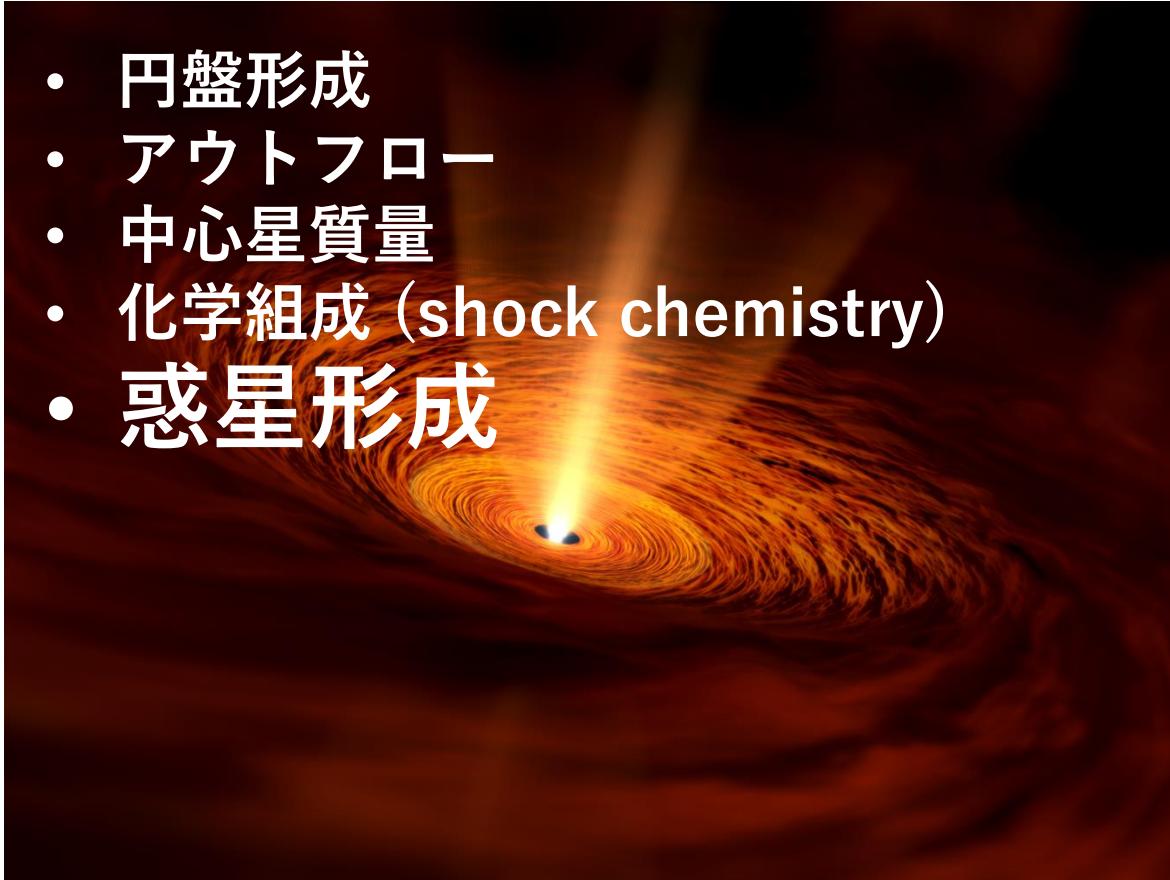
100-1000万年のClass II 円盤



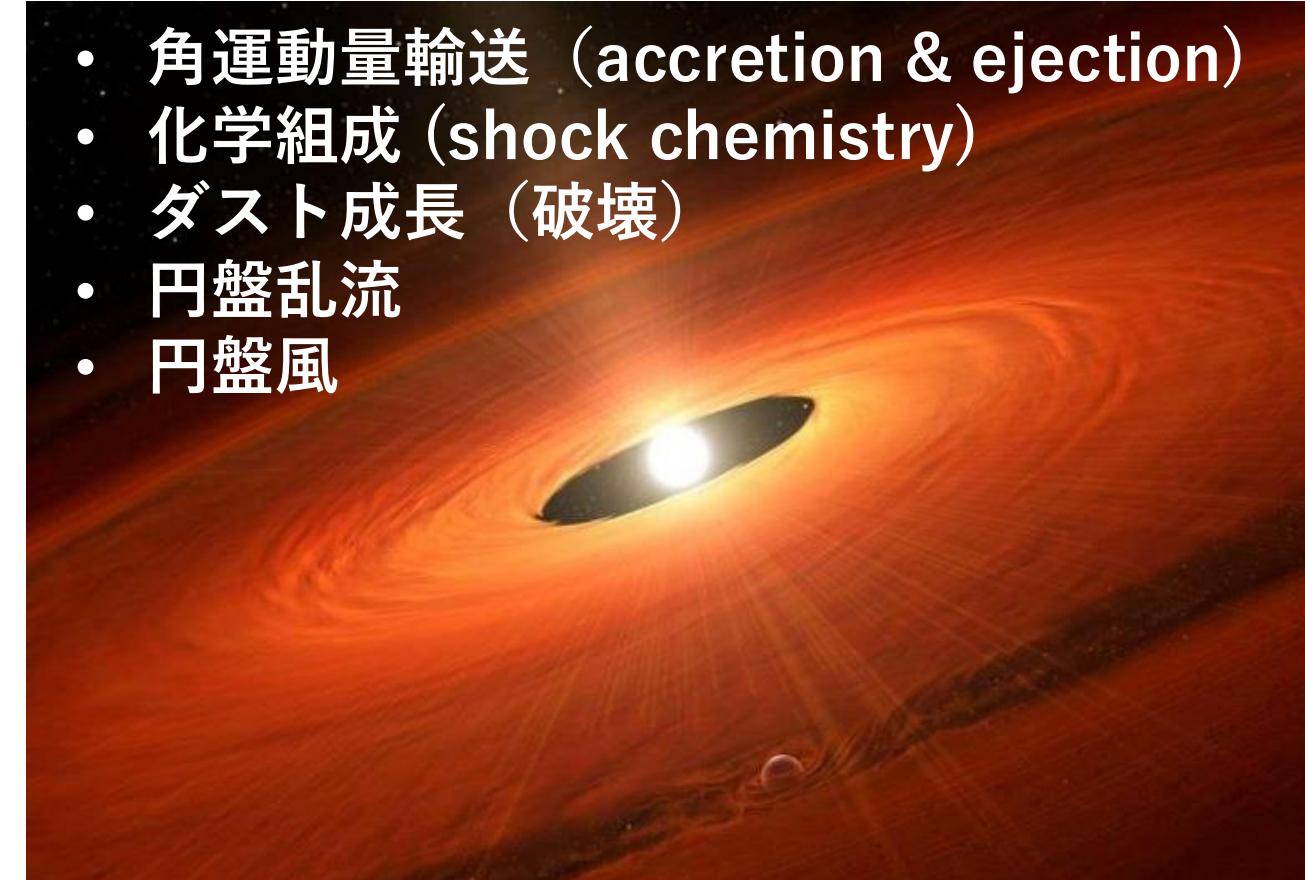
星・惑星形成における円盤の役割

- 原始星への質量降着過程(Class 0/I)
- 惑星と円盤の進化/散逸過程

- 円盤形成
- アウトフロー
- 中心星質量
- 化学組成 (shock chemistry)
- 惑星形成



- 角運動量輸送 (accretion & ejection)
- 化学組成 (shock chemistry)
- ダスト成長 (破壊)
- 円盤乱流
- 円盤風



これら全てに磁場が関係する

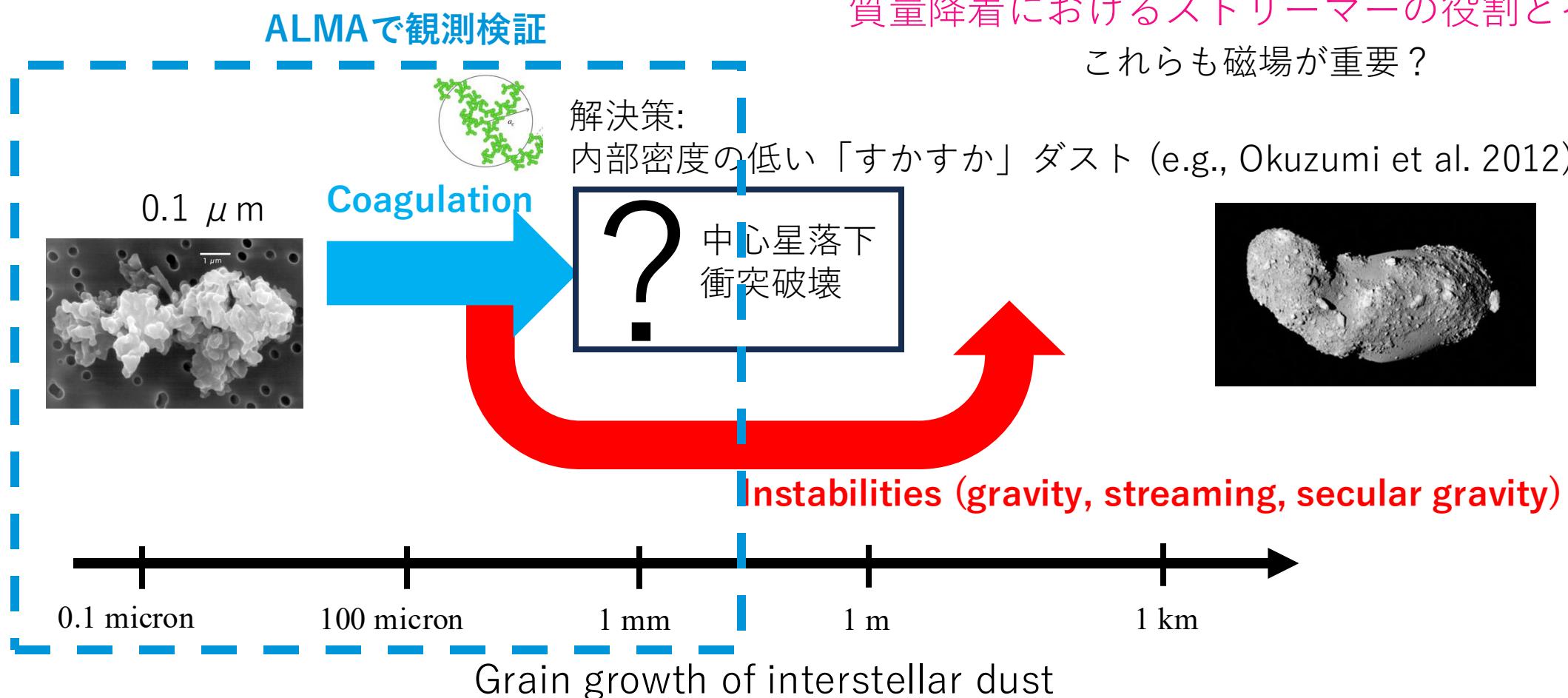
星・惑星形成における課題

惑星が作れない問題

中心星落下問題
衝突破壊問題など

星形成の課題

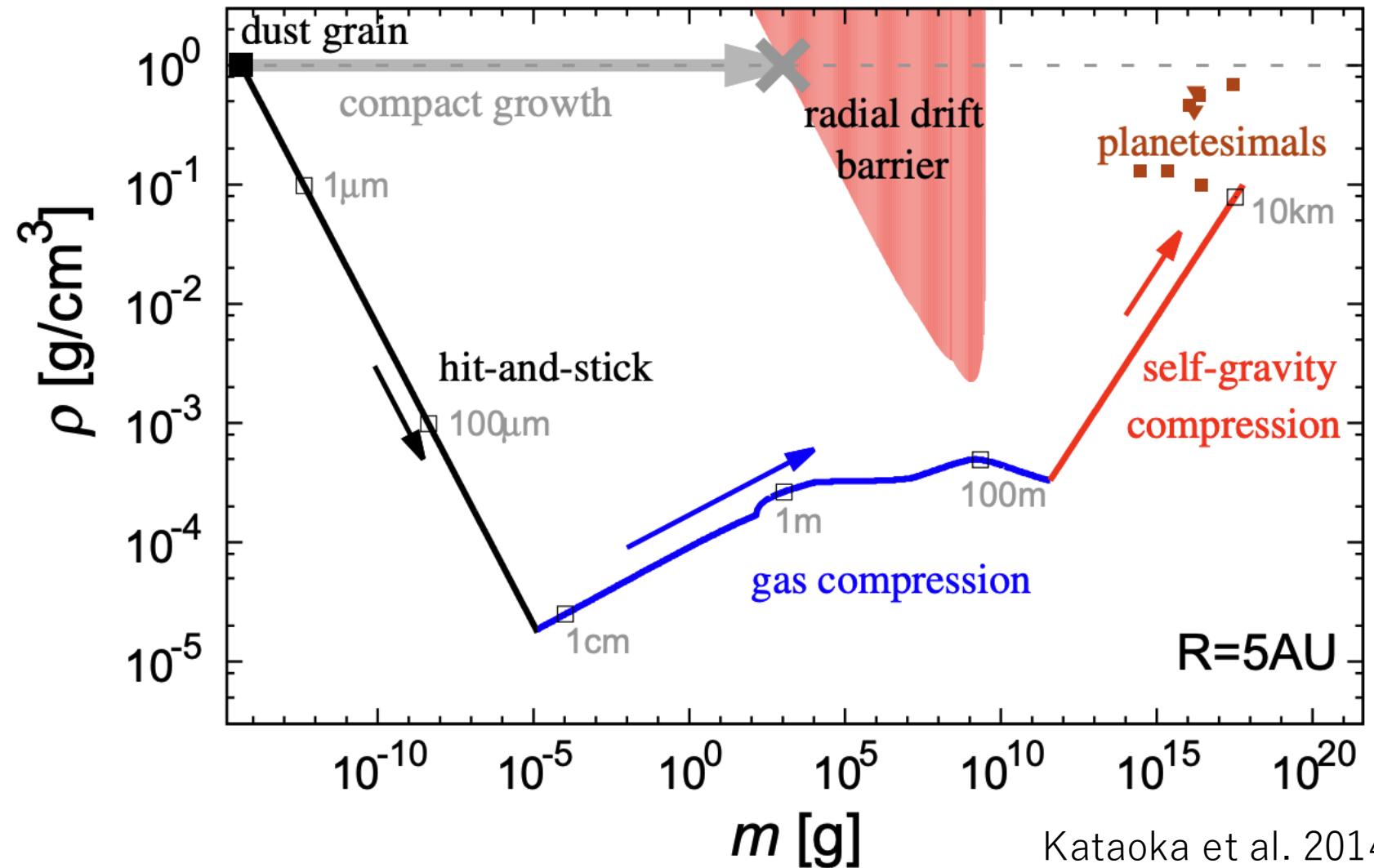
星質量は何で決まる？(IMFの起源)
分子雲コアは閉じた系なのか？
質量降着におけるストリーマーの役割とその起源
これらも磁場が重要？



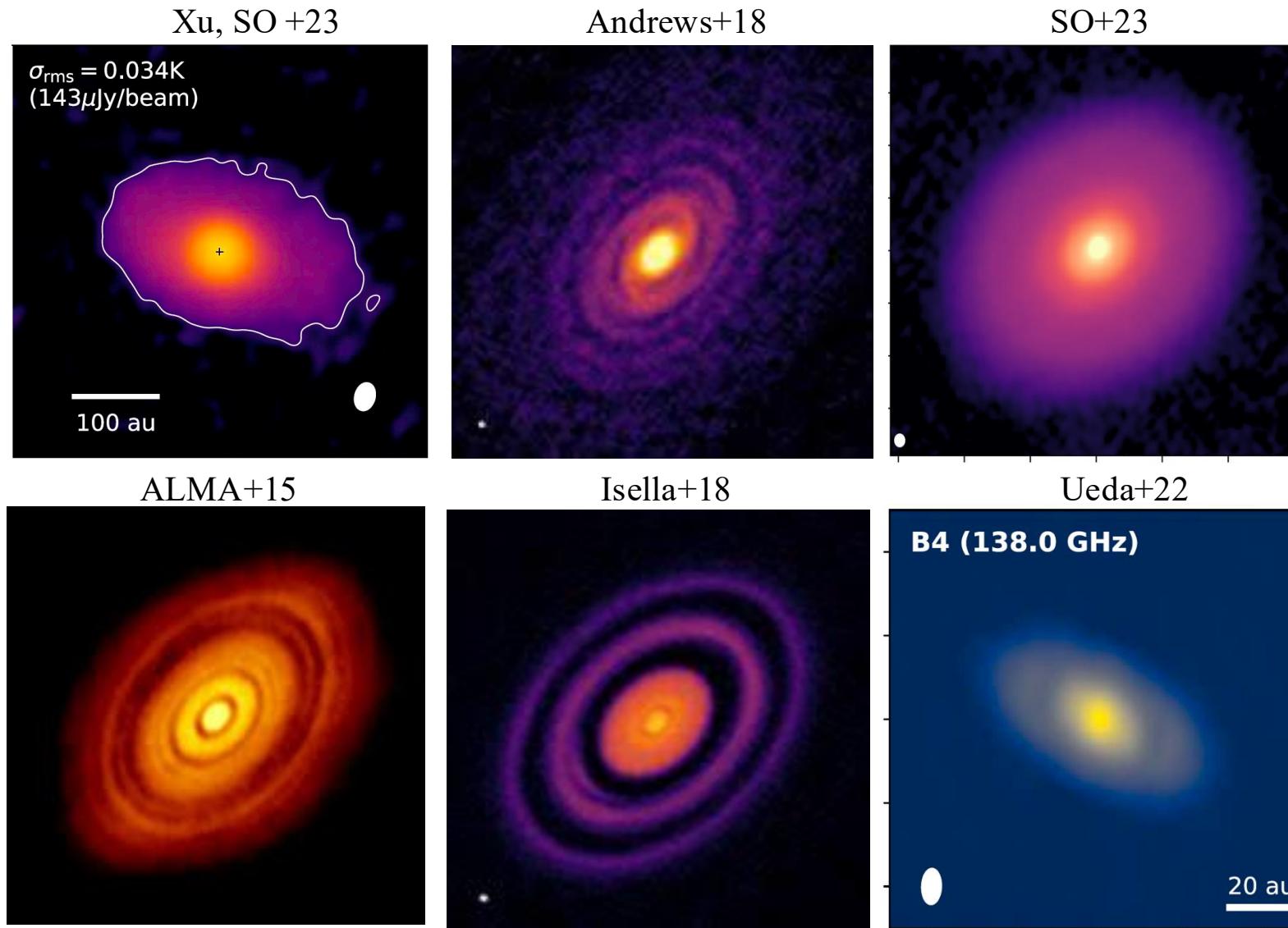
星・惑星形成における課題

内部密度を下げることで中心星落下問題を解決しながらダスト成長が可能 (Okuzumi+12, Kataoka+14, Kobayashi+21)

(衝突破壊しないくらい頑丈なダストを想定)



ALMAによる円盤観測



ALMAのダスト観測結果の結論

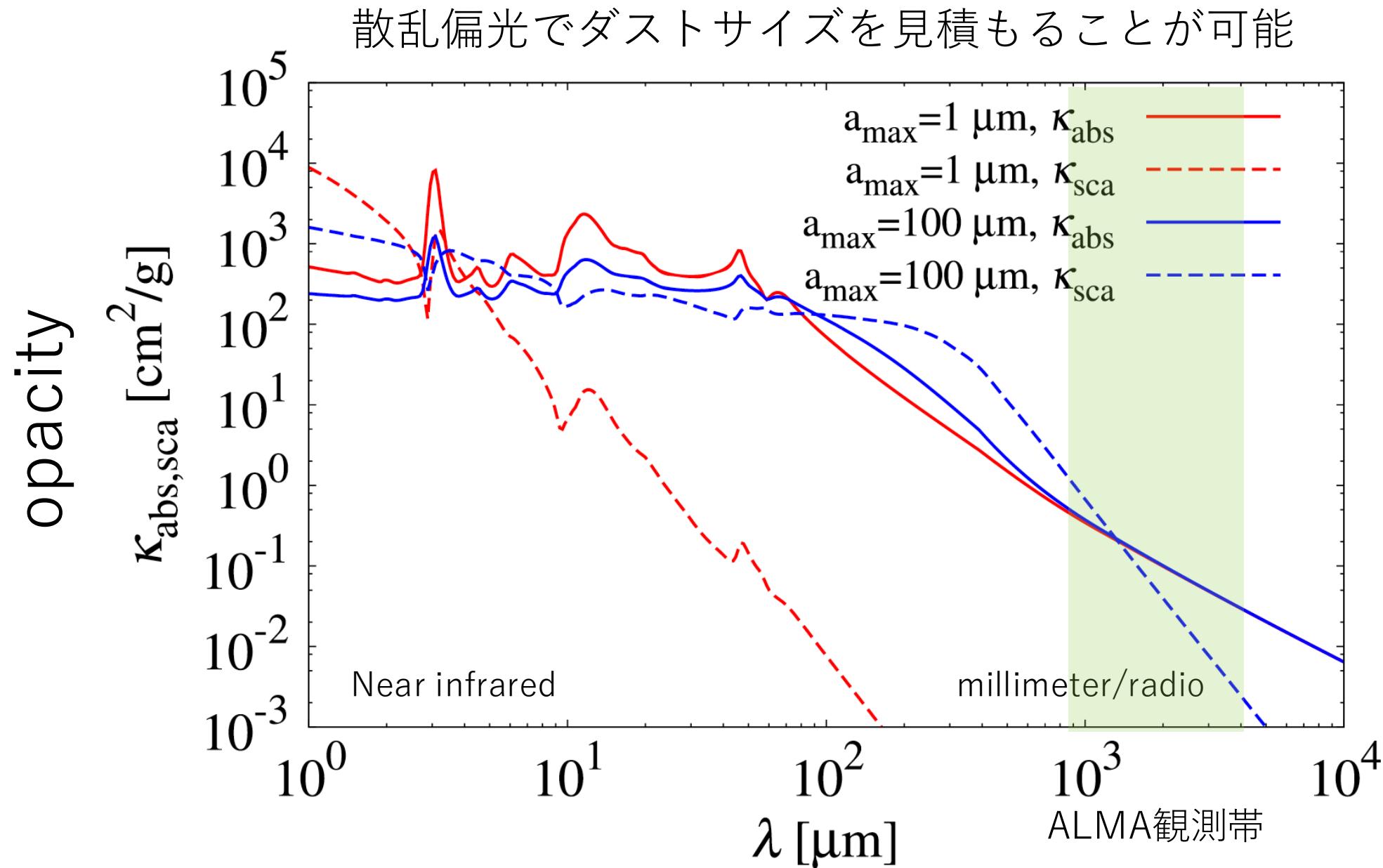
年齢100万年以上の（明るい）円盤
だとリングは一般的
リング形成メカニズムは諸説あり

- 惑星
- スノーライン
- 永年重力不安定性
- 成長前線

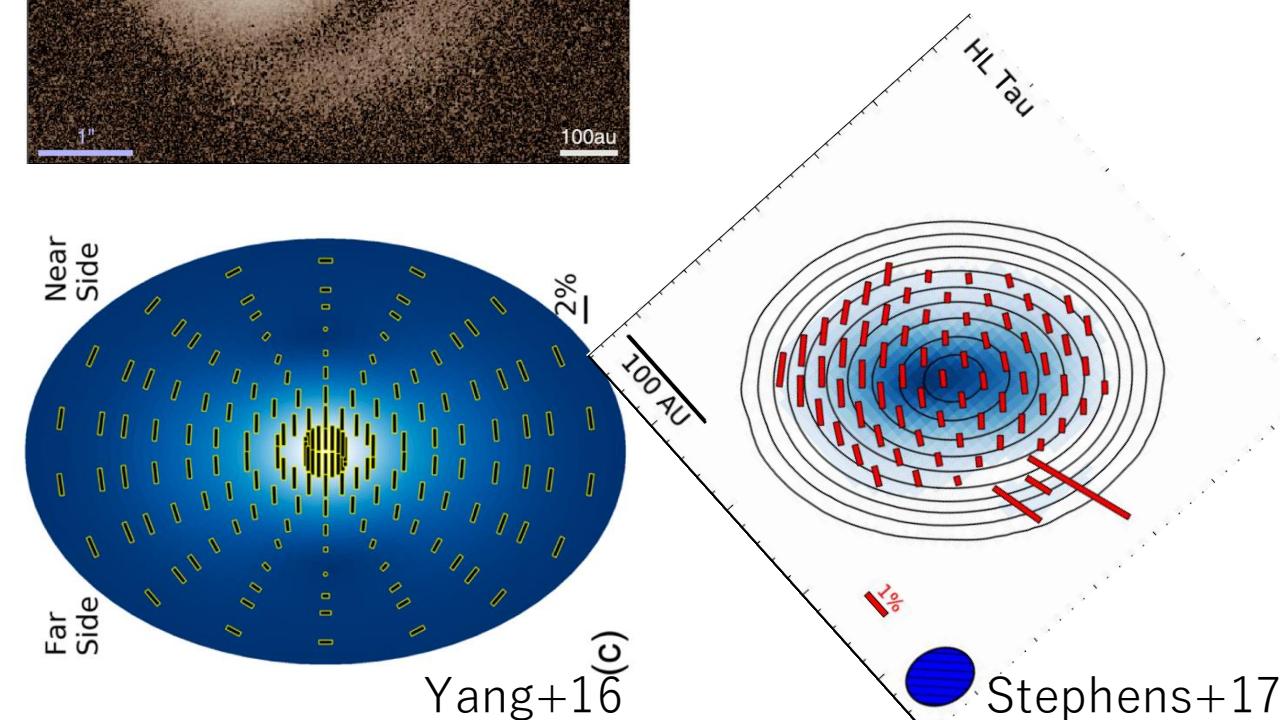
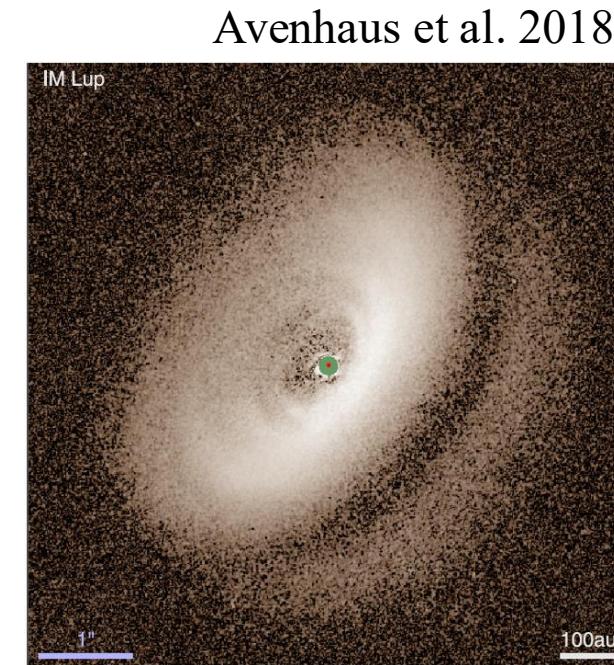
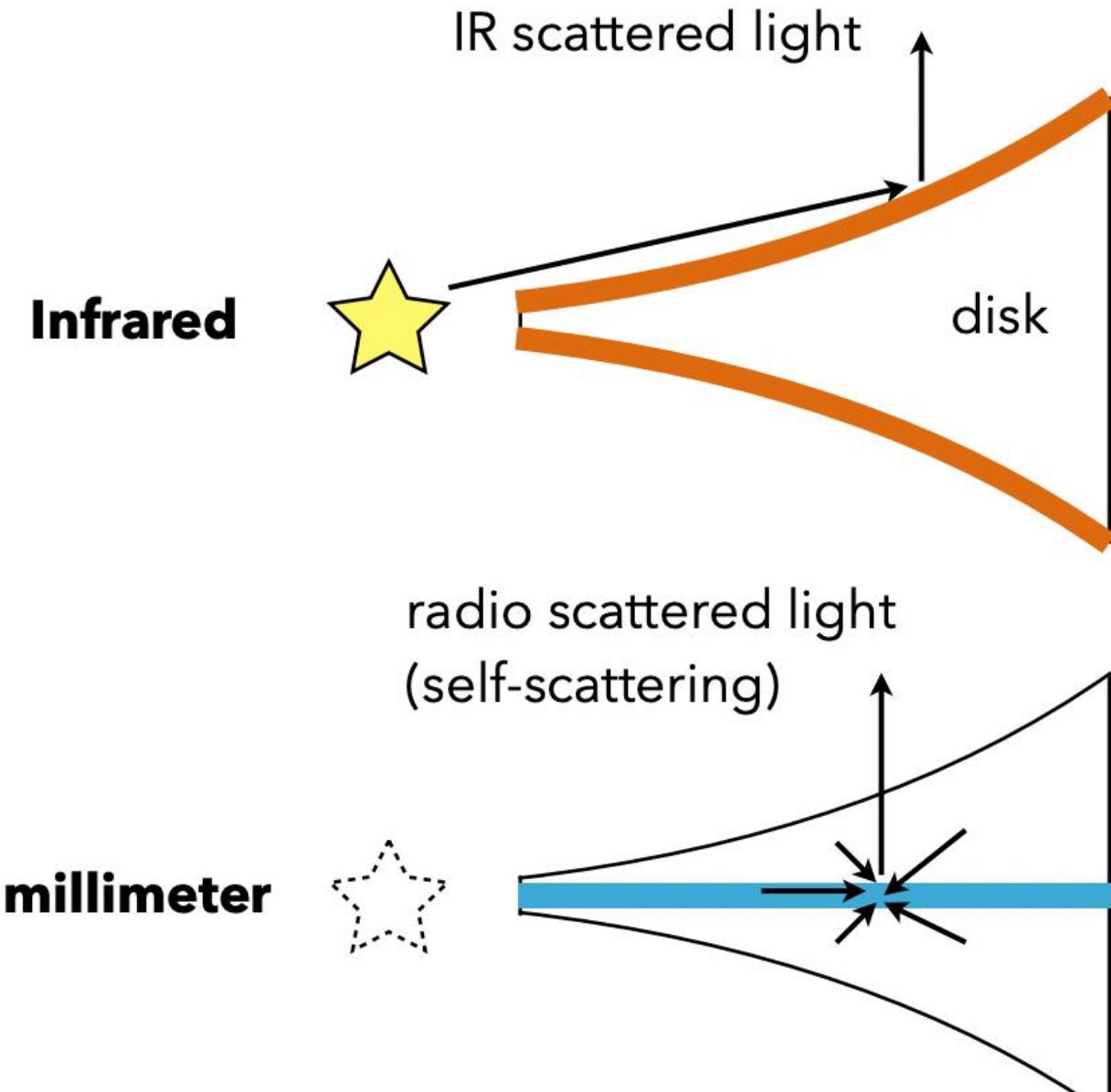
年齢10-100万年ではリングはない
スパイラル構造も見られず

ダスト成長の年齢くらいで
リングを作る(SO+21)

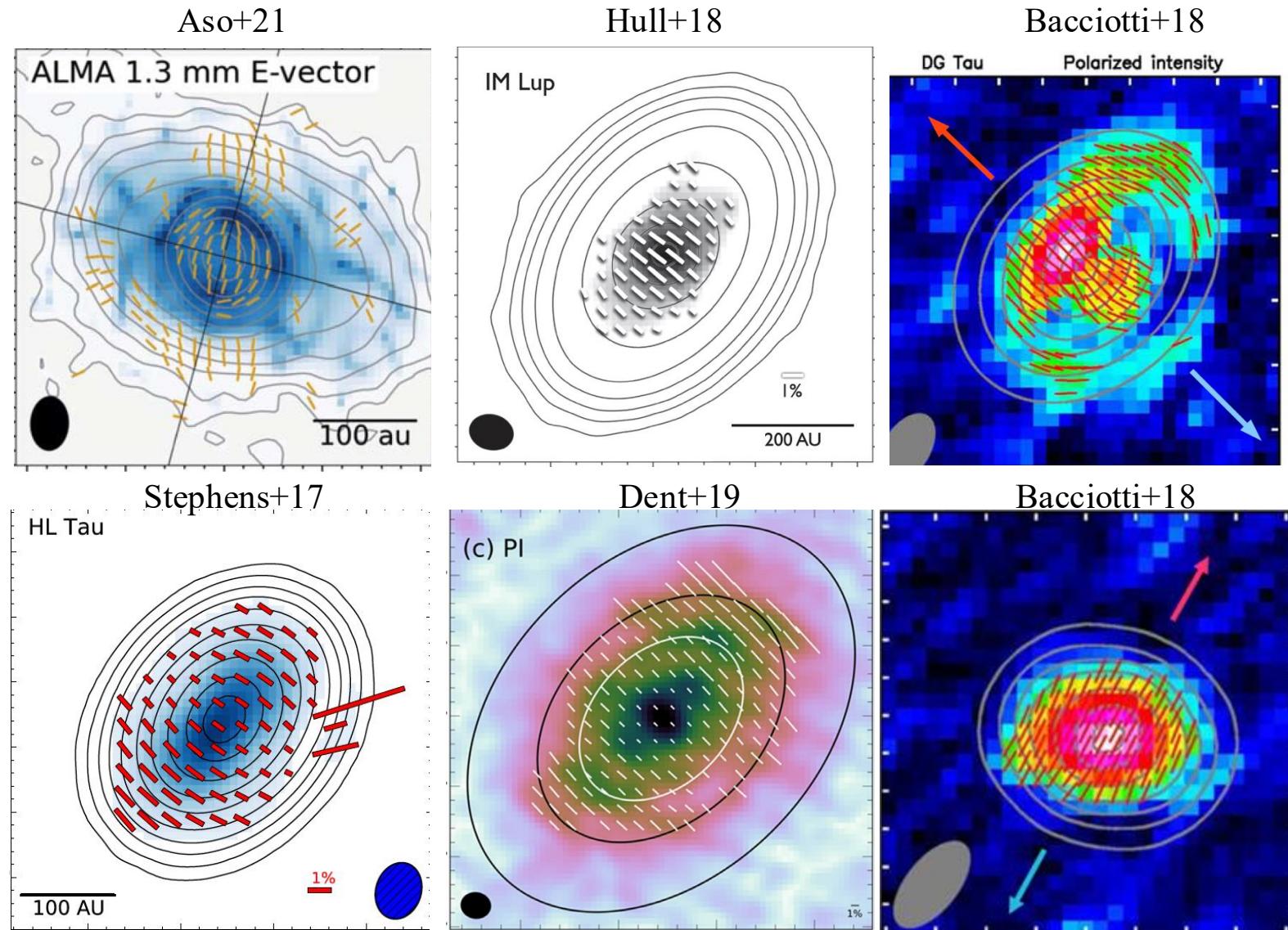
成長したダストで散乱を見る（サイズ測定）



ミリ波はダストの熱放射が散乱



偏光観測によるダストサイズ測定



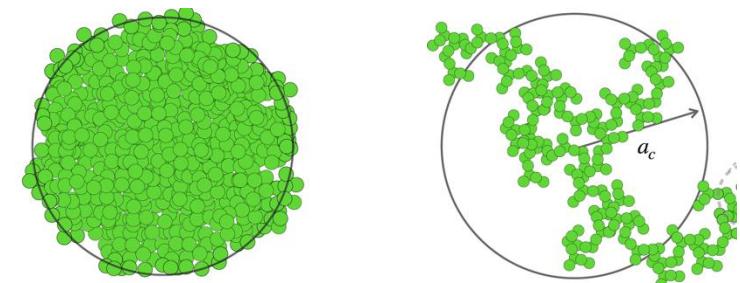
ALMAのダストミリ波偏光
観測結果の結論

円盤が光学的に厚い領域では
ミリ波自己散乱が多く見られる

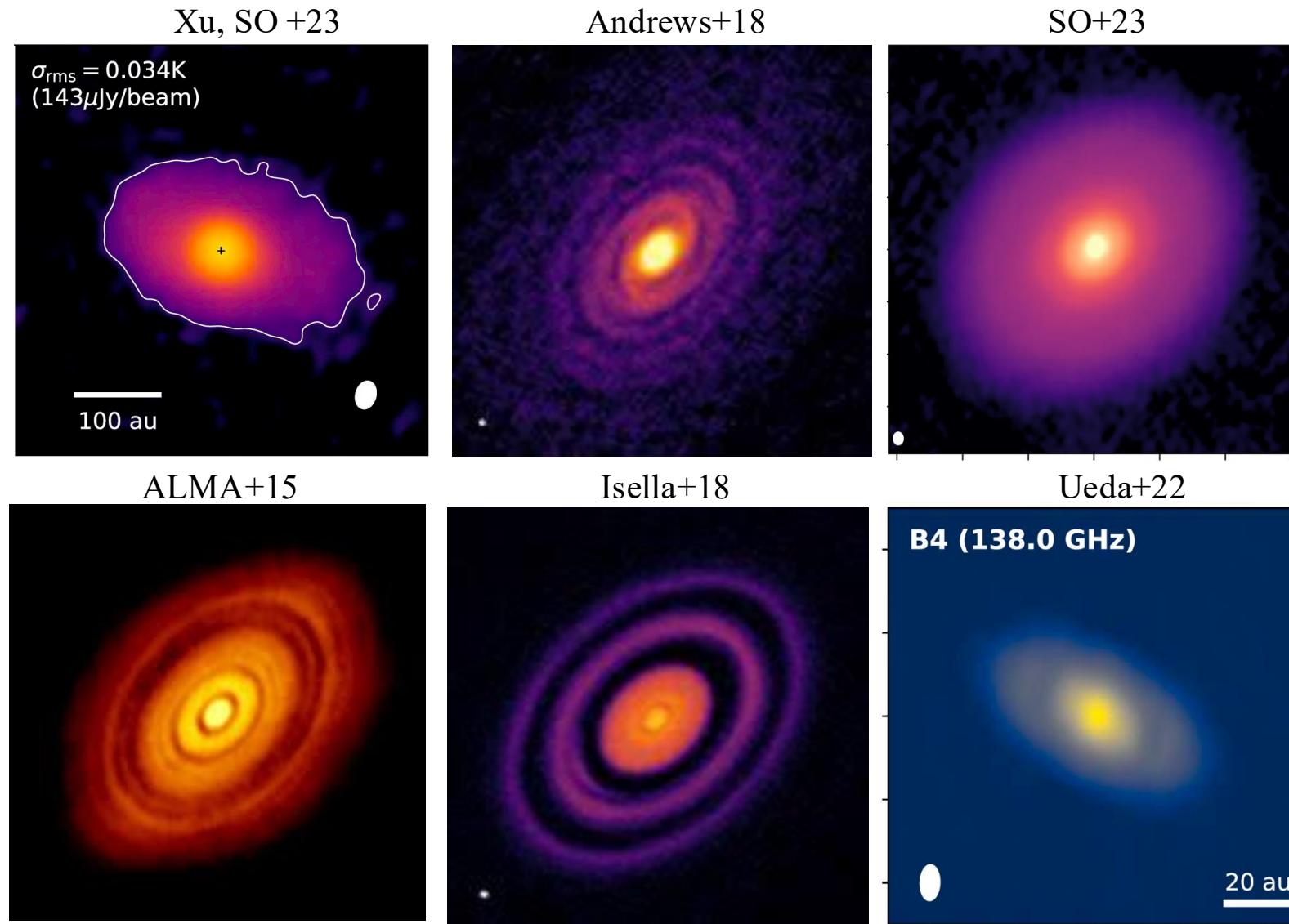
円盤が光学的に厚い領域では

- **0.1 – 1 mmサイズ**
- **空隙率 90%程度以上
(コンパクトダスト)**

「すかすか」ではない



偏光観測によるダストサイズ測定



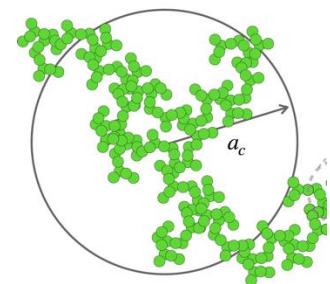
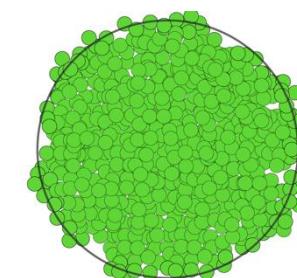
ALMAのダストミリ波偏光
観測結果の結論

円盤が光学的に厚い領域では
ミリ波自己散乱が多く見られる

円盤が光学的に厚い領域では

- **0.1 – 1 mmサイズ**
- **空隙率 90%程度以上
(コンパクトダスト)**

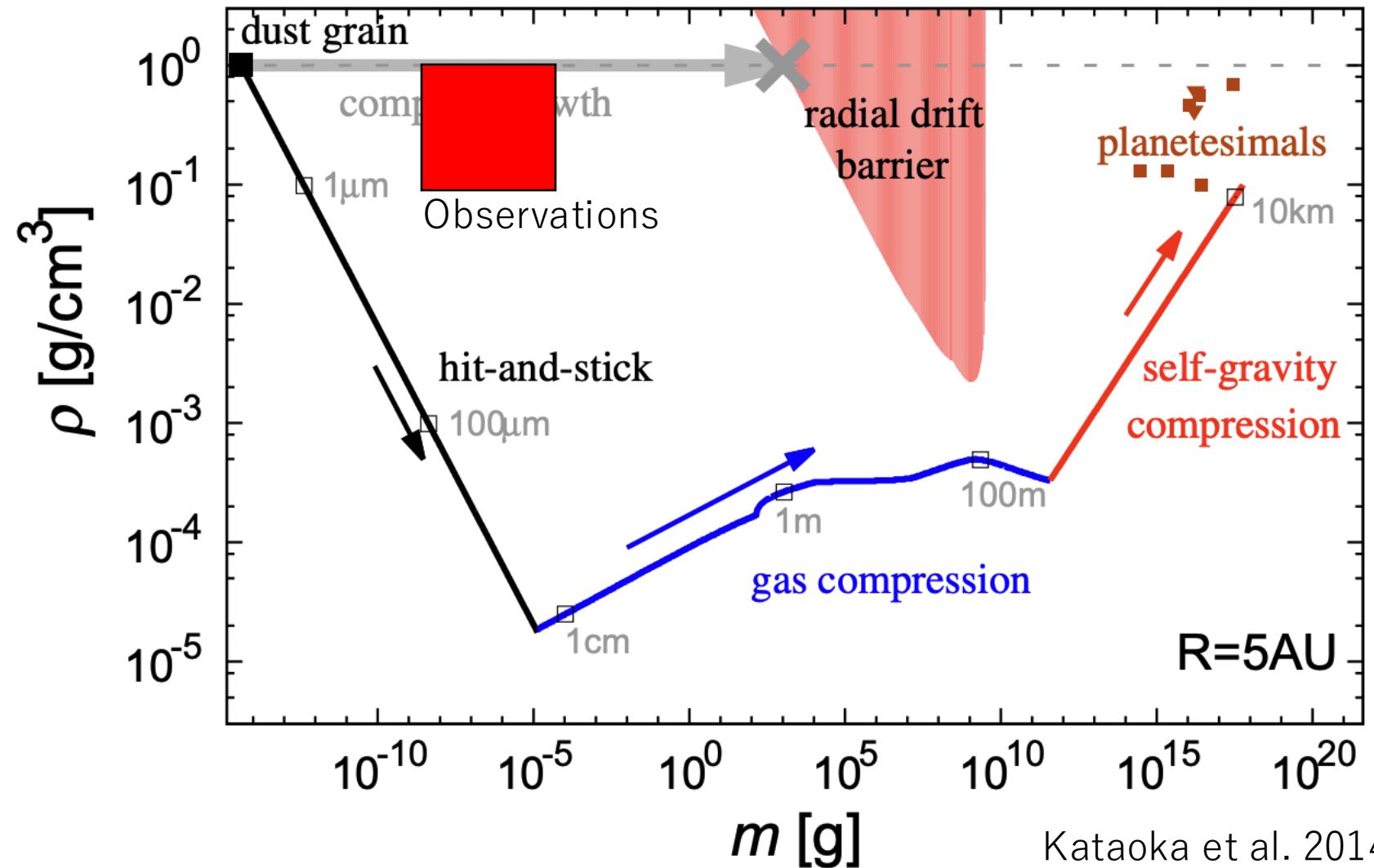
「すかすか」ではない



星・惑星形成における課題

内部密度を下げることで中心星落下問題を解決しながらダスト成長が可能 (Okuzumi+12, Kataoka+14, Kobayashi+21)

(衝突破壊しないくらい頑丈なダストを想定)

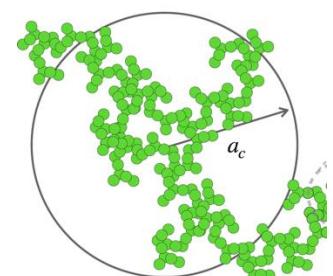
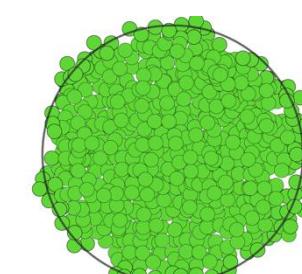


惑星形成は解決できない！

円盤が光学的に厚い領域では

- 0.1 – 1 mm サイズ
- 空隙率 90% 程度以上
(コンパクトダスト)

「すかすか」ではない



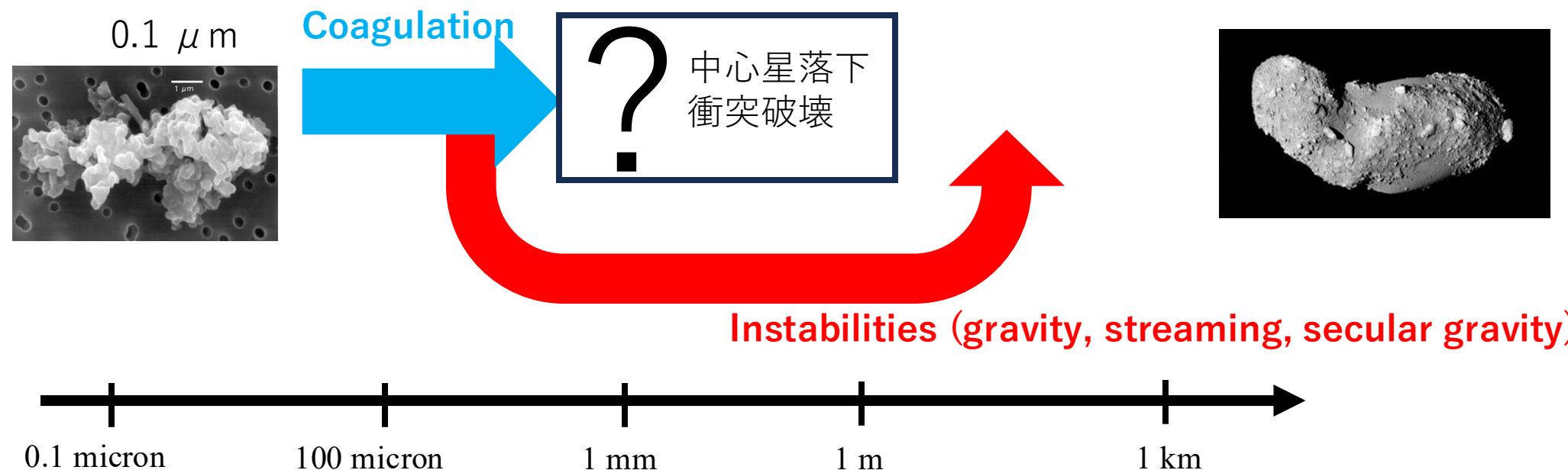
ALMAの結果から示唆する惑星形成

観測結果

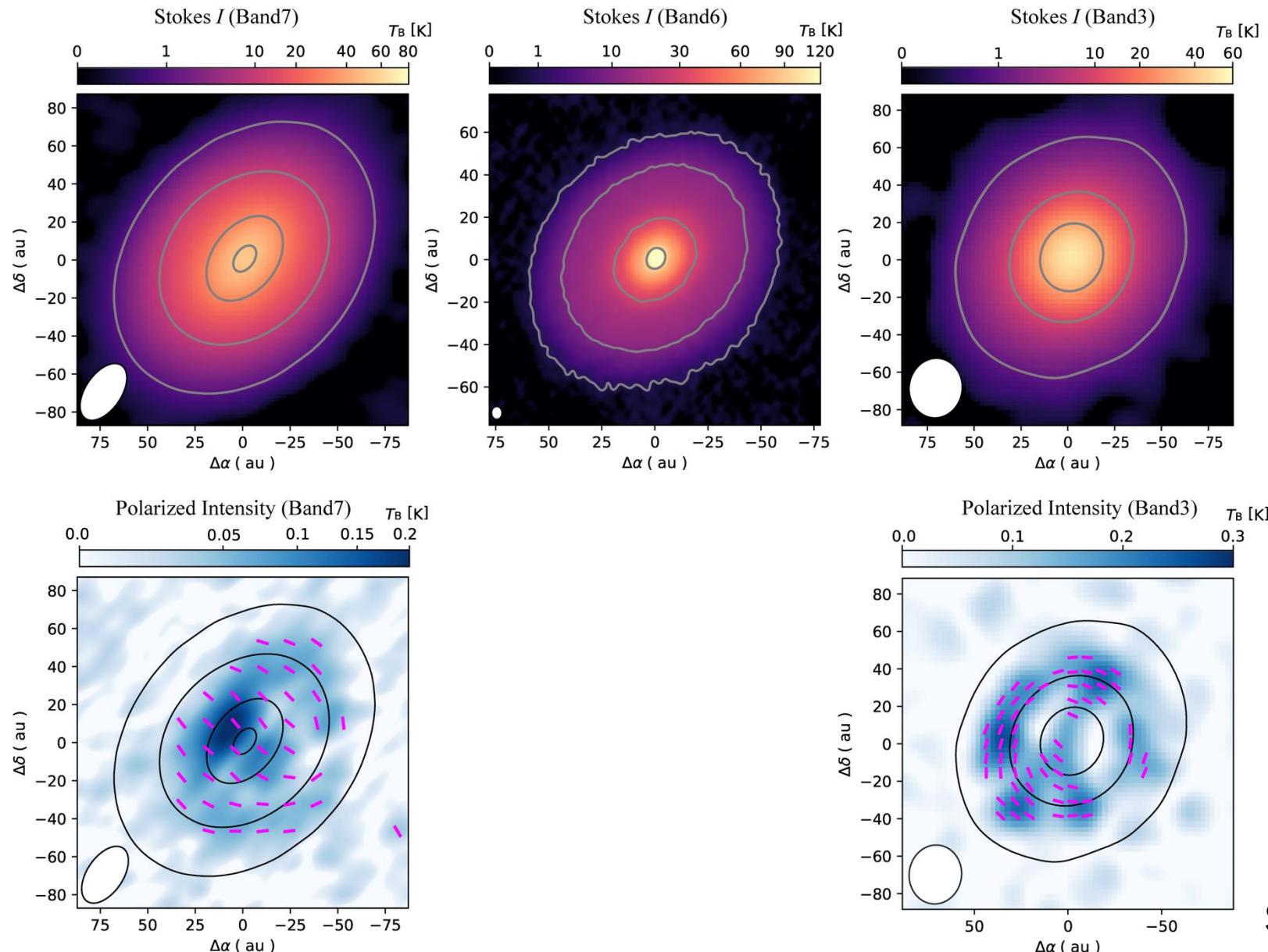
- 100万年程度で惑星形成する
- 光学的に厚い円盤では0.1 – 1mmサイズのコンパクトなダスト（ダストは壊れやすい??）
- 重力不安定を示すようなスパイラル構造が（ほぼ）見られない

ストリーミング不安定性による惑星形成が受け入れられつつある（白熱）

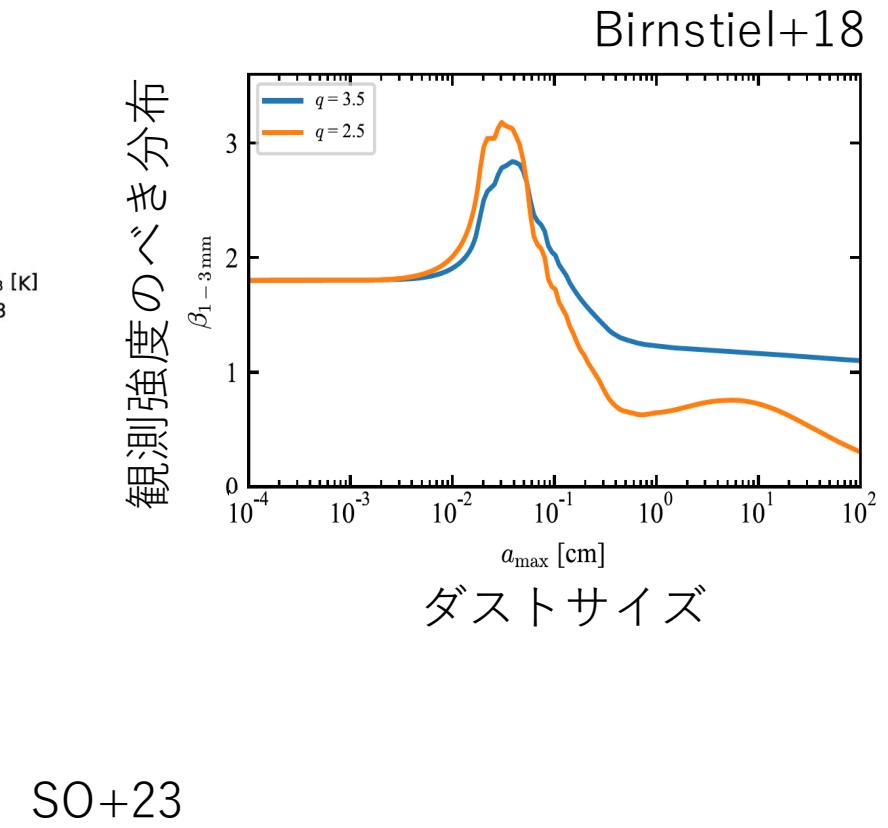
ただし、dust-to-gas mass ratioを1程度まで上げる必要がある（どうやって？）
遠くの重い惑星は重力不安定性が大事



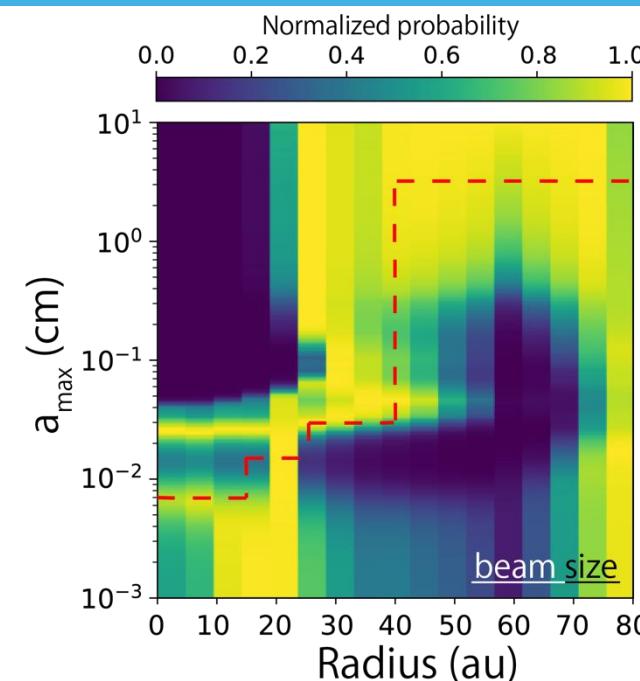
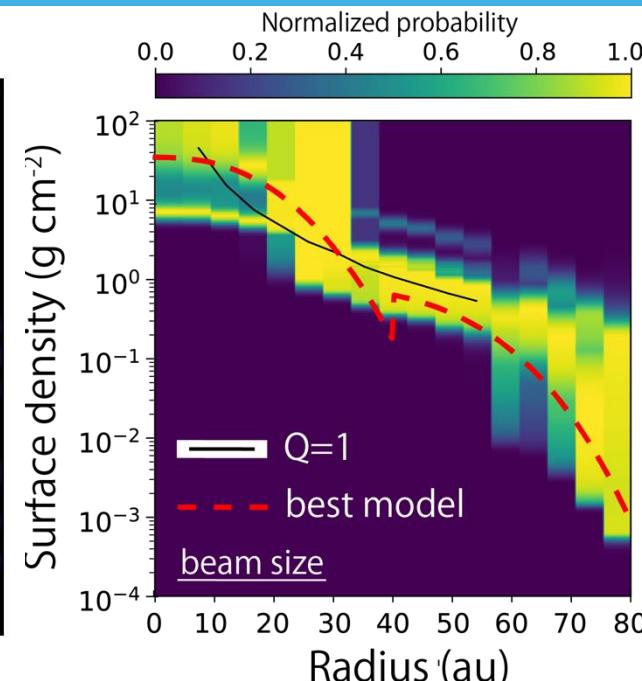
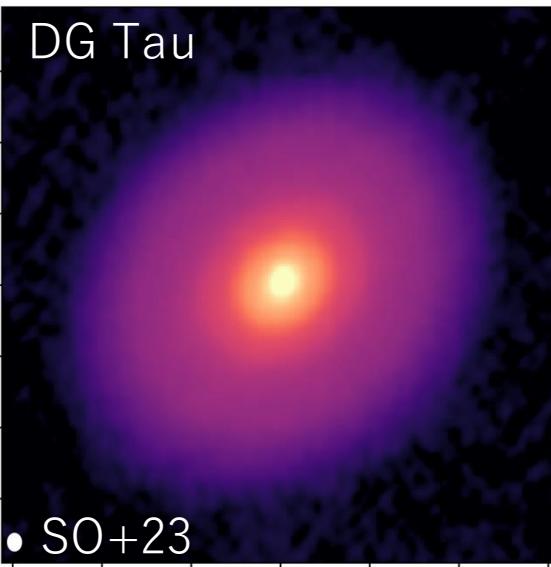
円盤のダストはつねに小さいのか？



ダスト熱放射の波長依存性と散乱偏光を同時に説明するダストサイズ分布モデルを構築



構造のない円盤ではダスト成長が進む？

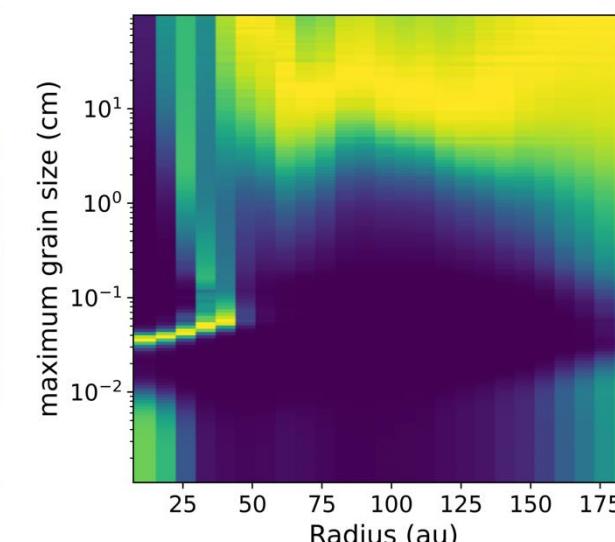
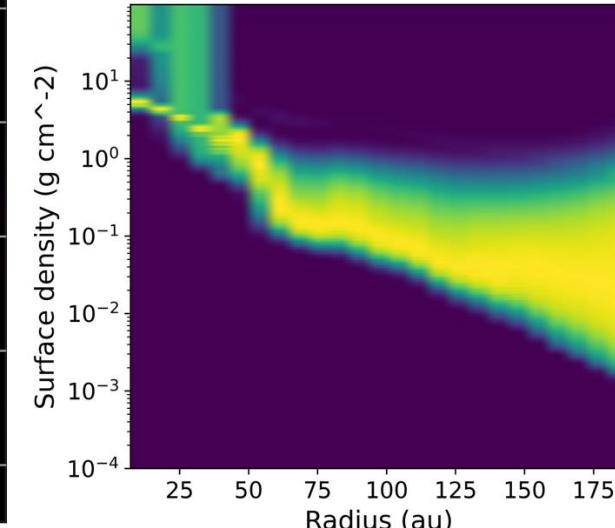


柱密度の急激な上昇
→ スノーライン？

外側でかなり大きなダスト
内側で小さなダスト

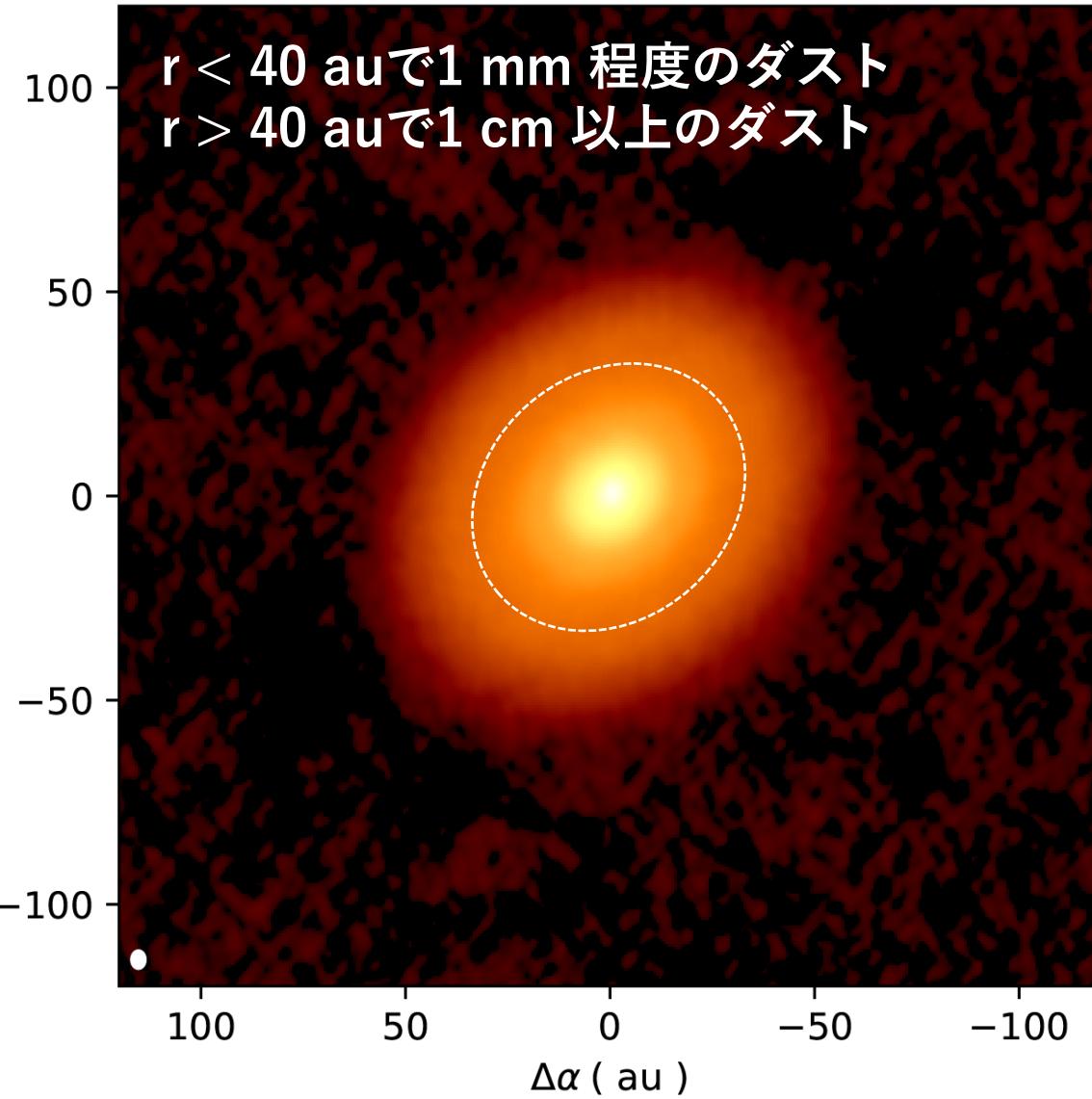
小さいダストを生み出すメカニズムが必要？

衝突破壊？

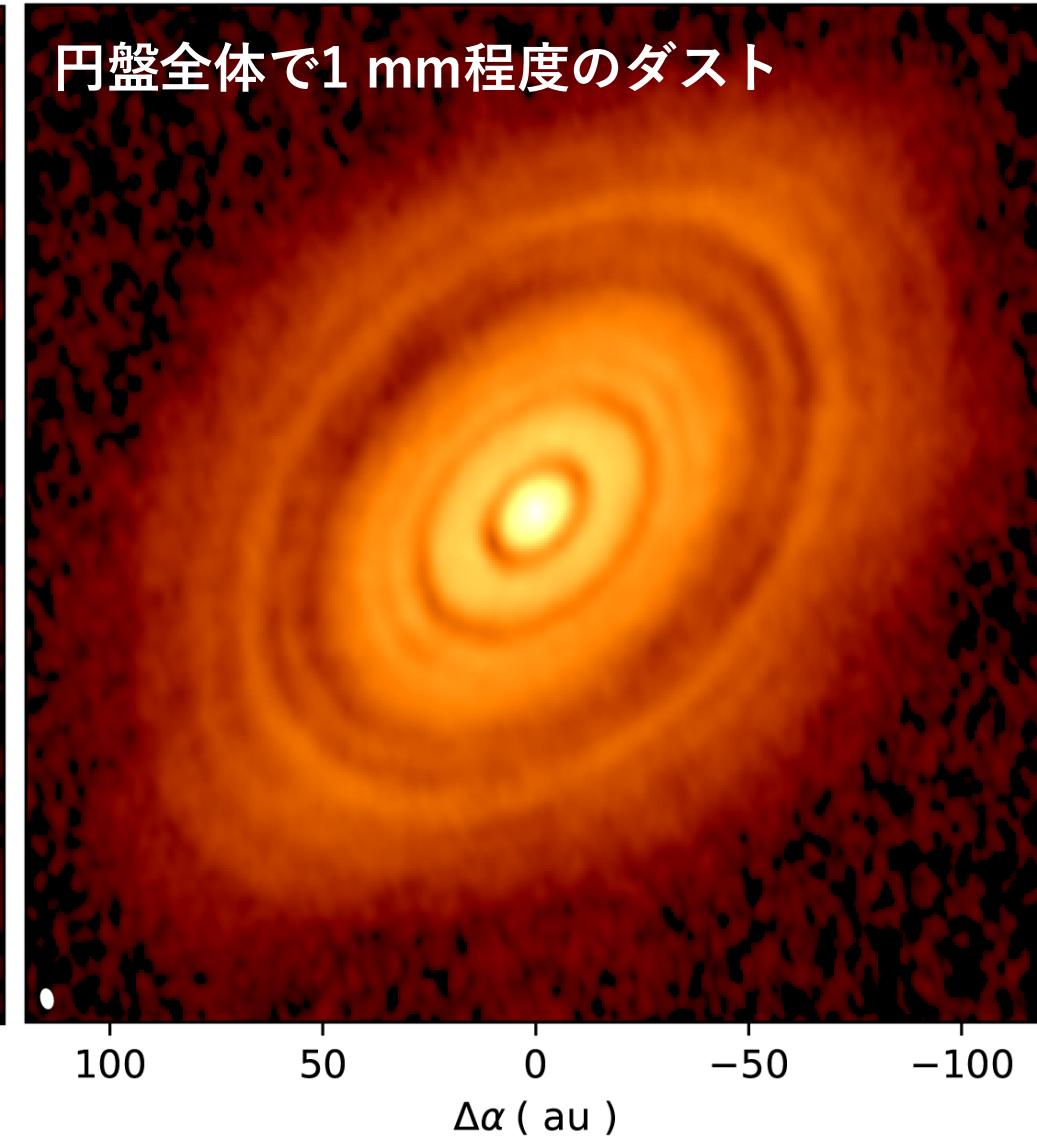


構造のない円盤ではダスト成長が進む？

DG Tau



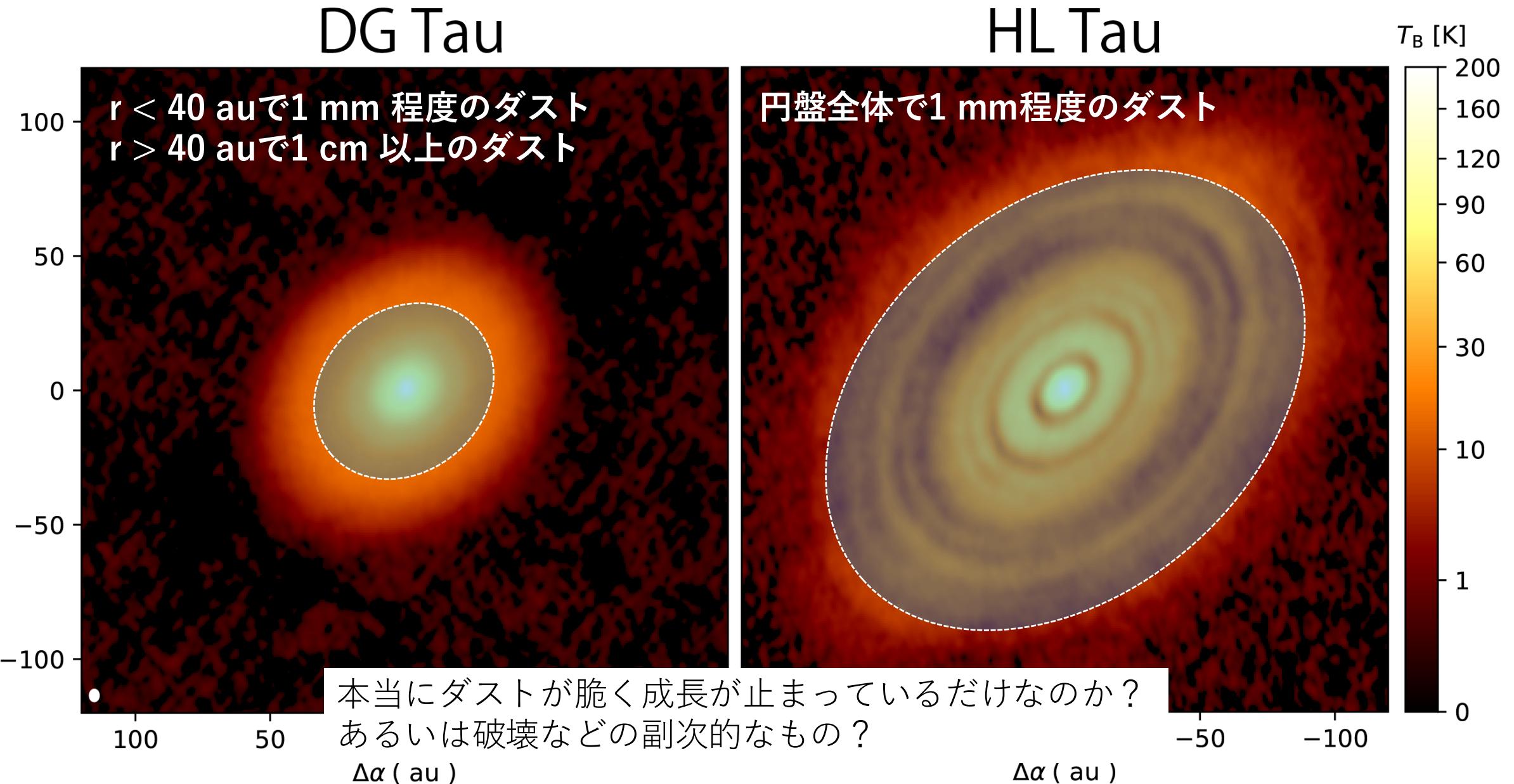
HL Tau



T_B [K]

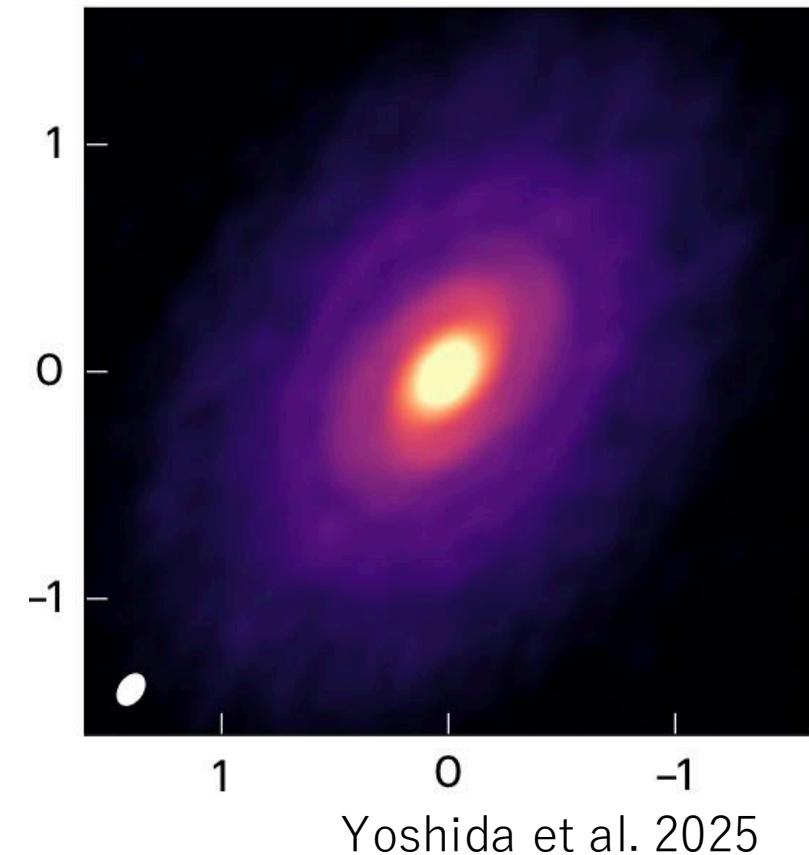
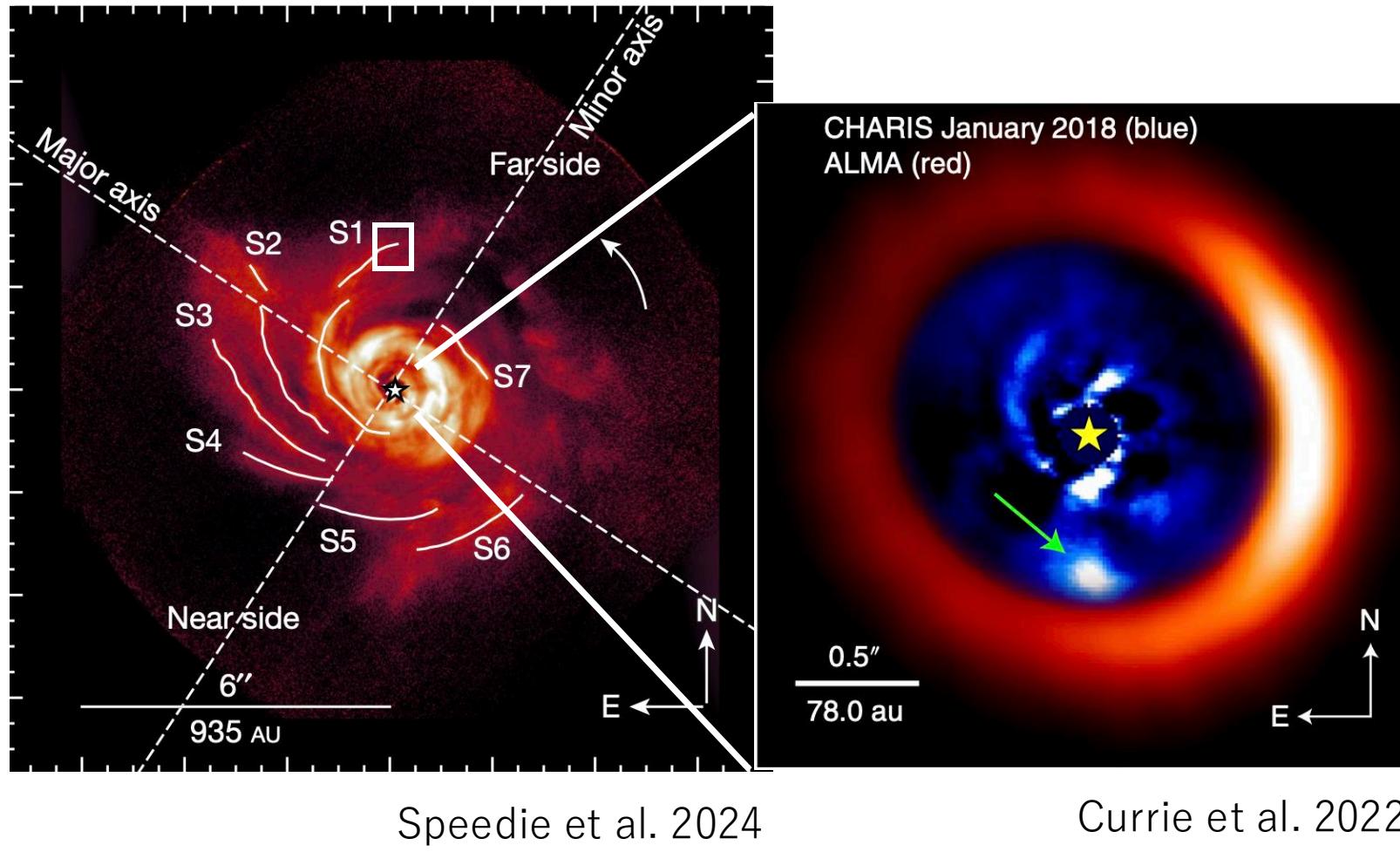
200
160
120
90
60
30
10
1
0

構造のない円盤ではダスト成長が進む？

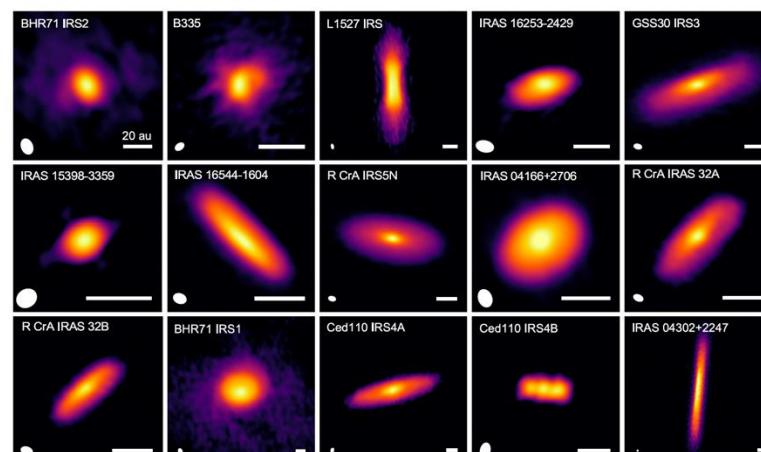
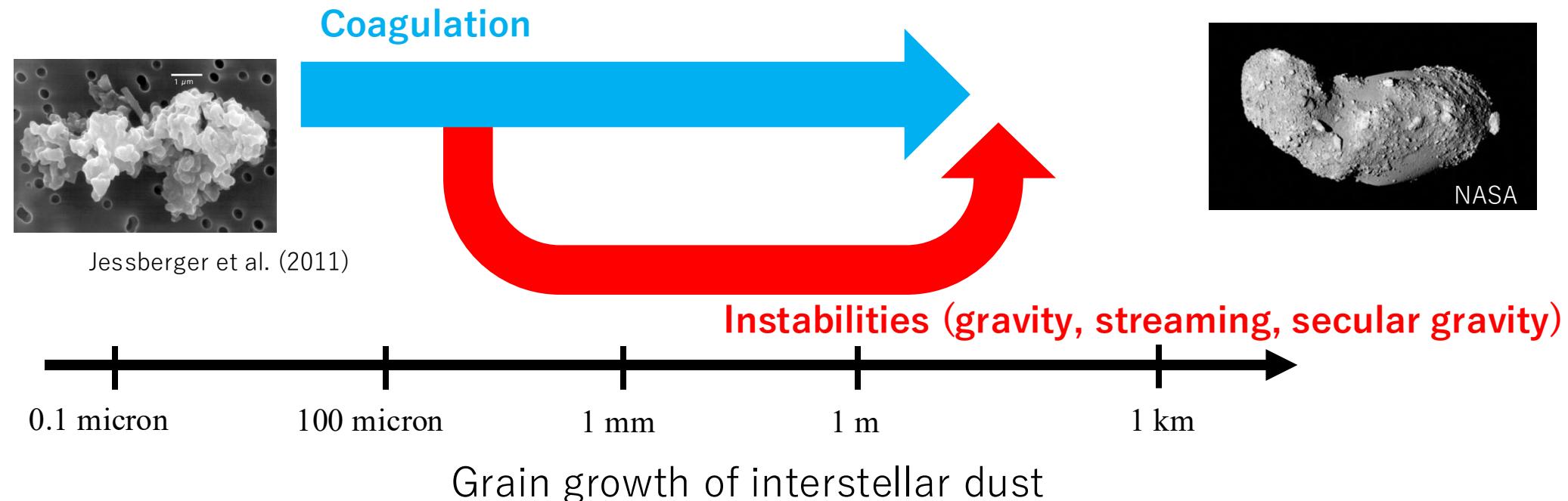


重力不安定性を示す円盤

巨大ガス惑星がいる円盤で重力不安定性を示すスパイラルがあるが、重力不安定性によって巨大ガス惑星が形成された証拠はまだない



惑星形成の議論



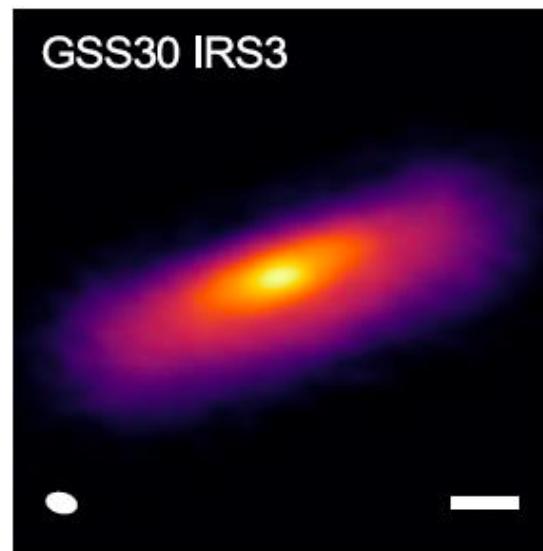
最近の流行

- ダストは脆く、コンパクトに成長？
- 重力不安定を示すスパイラル円盤は極めてレア
- 磁場の構造、強度は？
- アウトフローのメカニズム
- 円盤の化学組成（ダスト表面反応やshock）

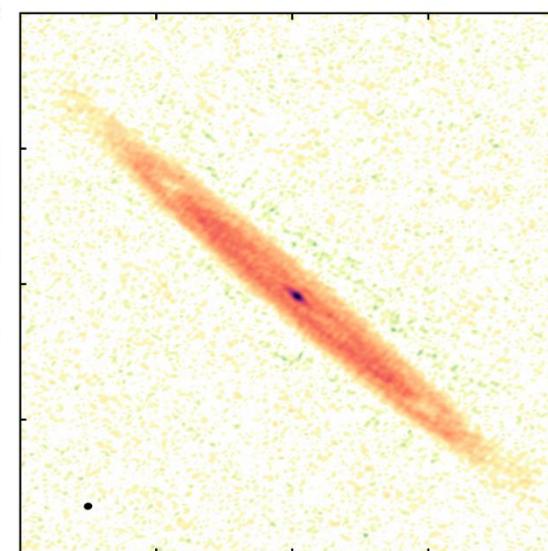
ALMAによる円盤観測（乱流）

乱流は円盤の質量降着やダストの衝突速度、沈澱に影響する。
乱流を測る方法は、1円盤の厚みを測る、2 速度幅を観測する

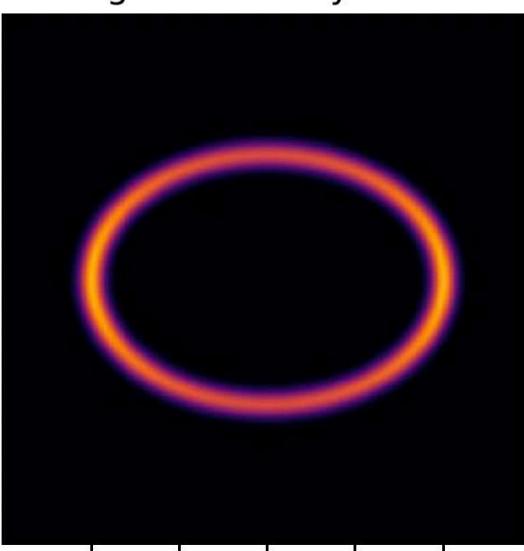
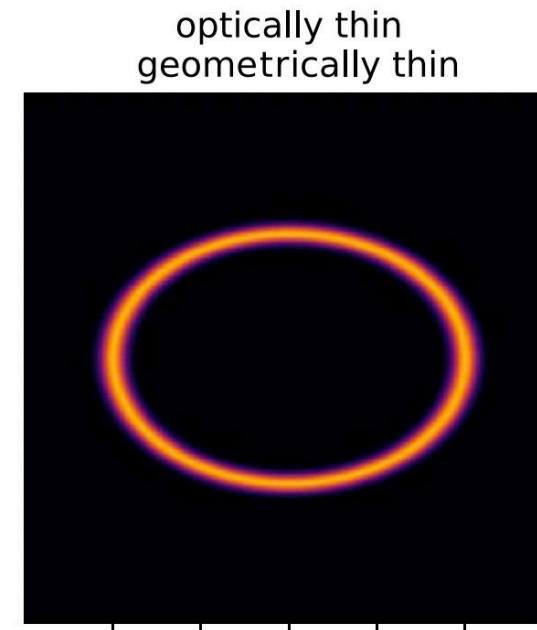
円盤が若いと厚い（乱流散逸？）



Ohashi+23



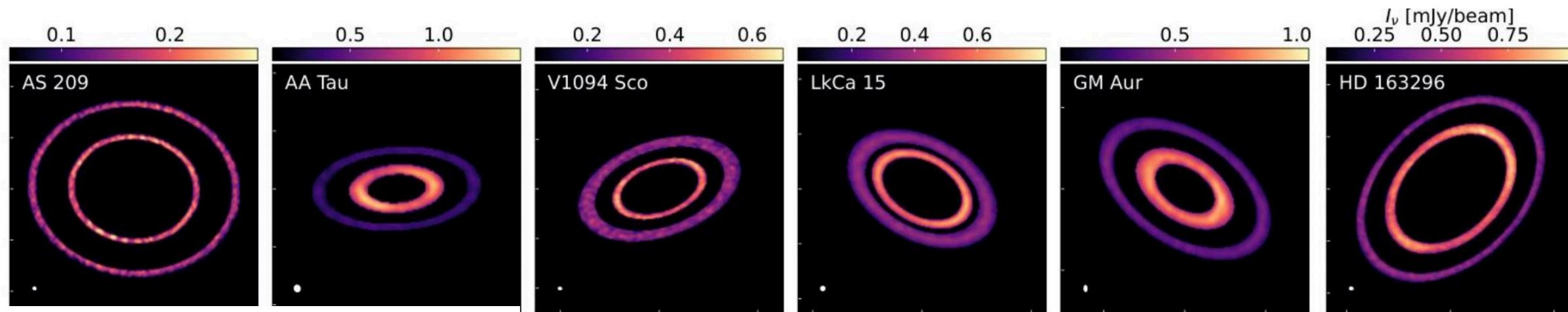
Villenave+18



Doi & Kataoka 2021

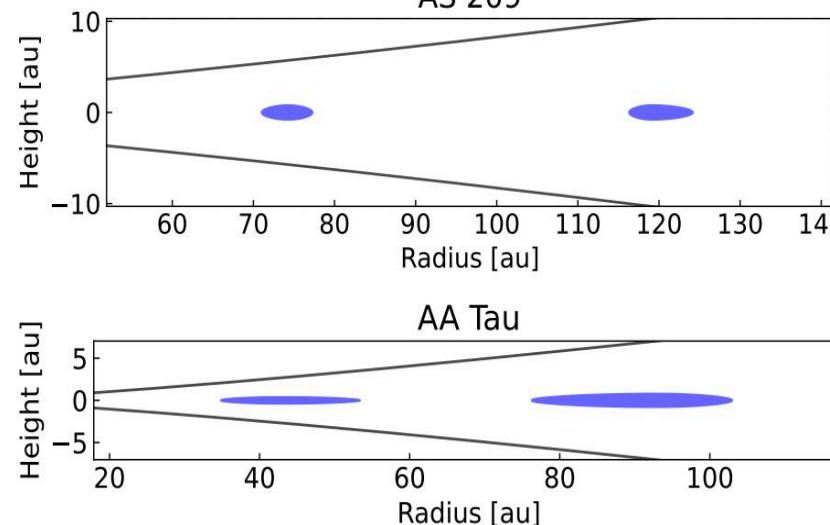
ALMAによる円盤観測（乱流）

乱流の起源はVertical Shear instability or Magneto Rotational Instability?
外側で沈殿→ 亂流が抑えられてる or ダストサイズが大きい



Both rings settled

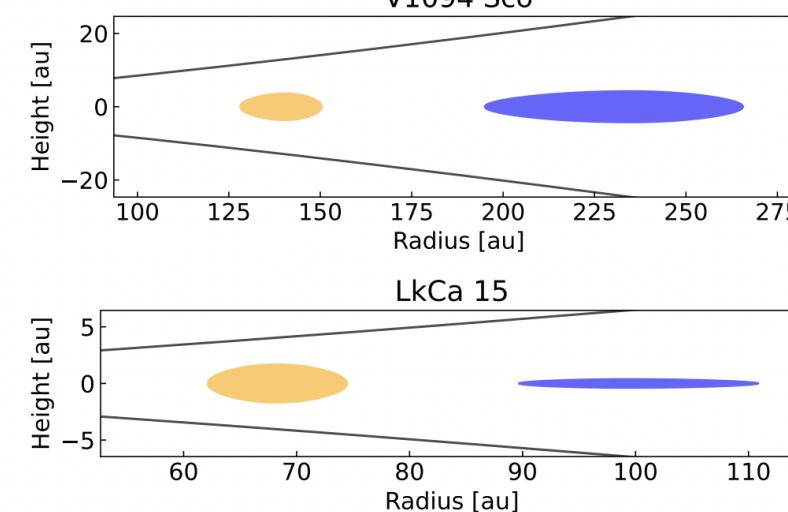
AS 209



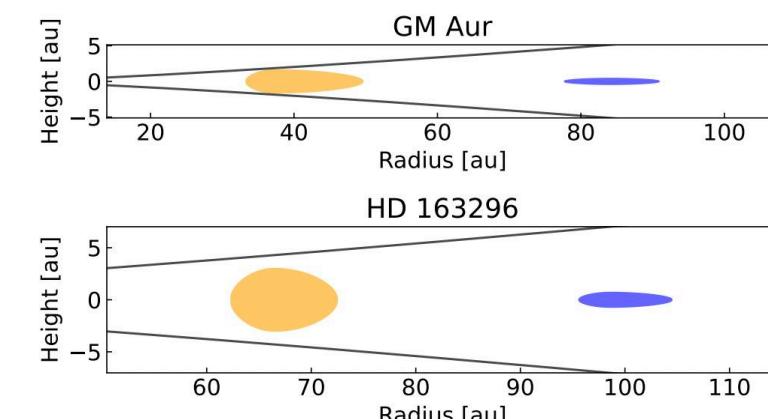
AA Tau

Inner rings puffed-up, outer rings settled

V1094 Sco



LkCa 15

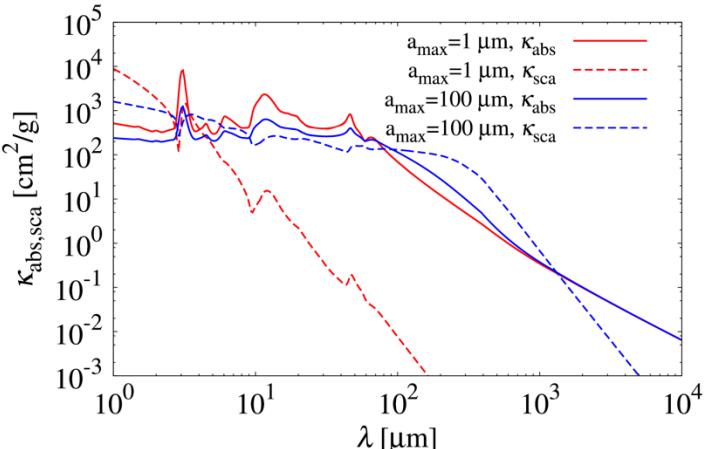
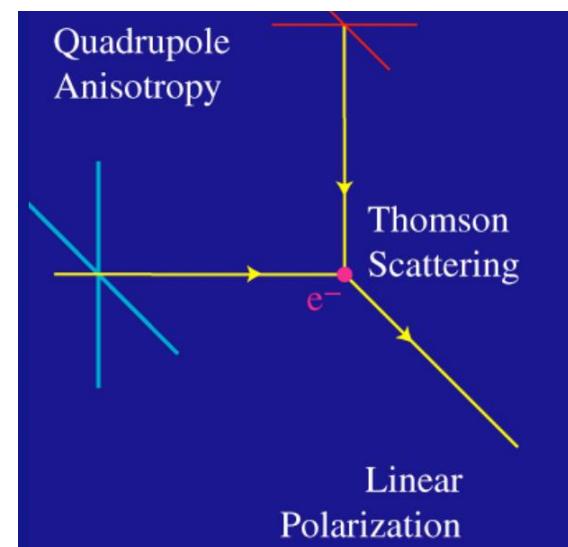


Jiang et al. 2025

ALMAによる円盤観測（磁場）

ダスト散乱

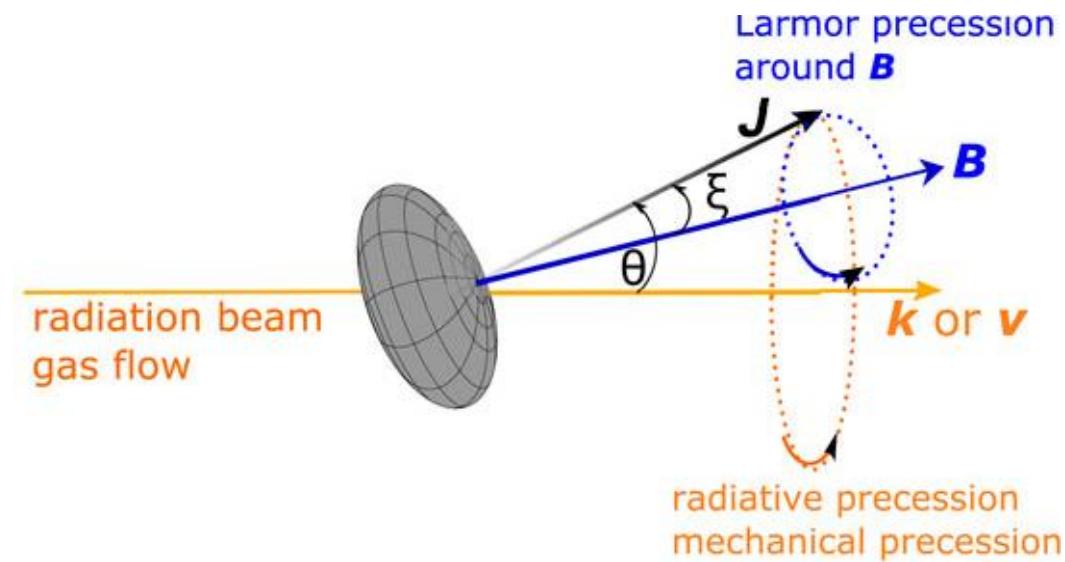
ダスト整列
(**磁場**、輻射場、ガス流による整列)



Kataoka et al. 2015

観測波長がダストサイズ程度でしか散乱偏光しない

多波長偏光観測による偏光の起源の切り分けが重要



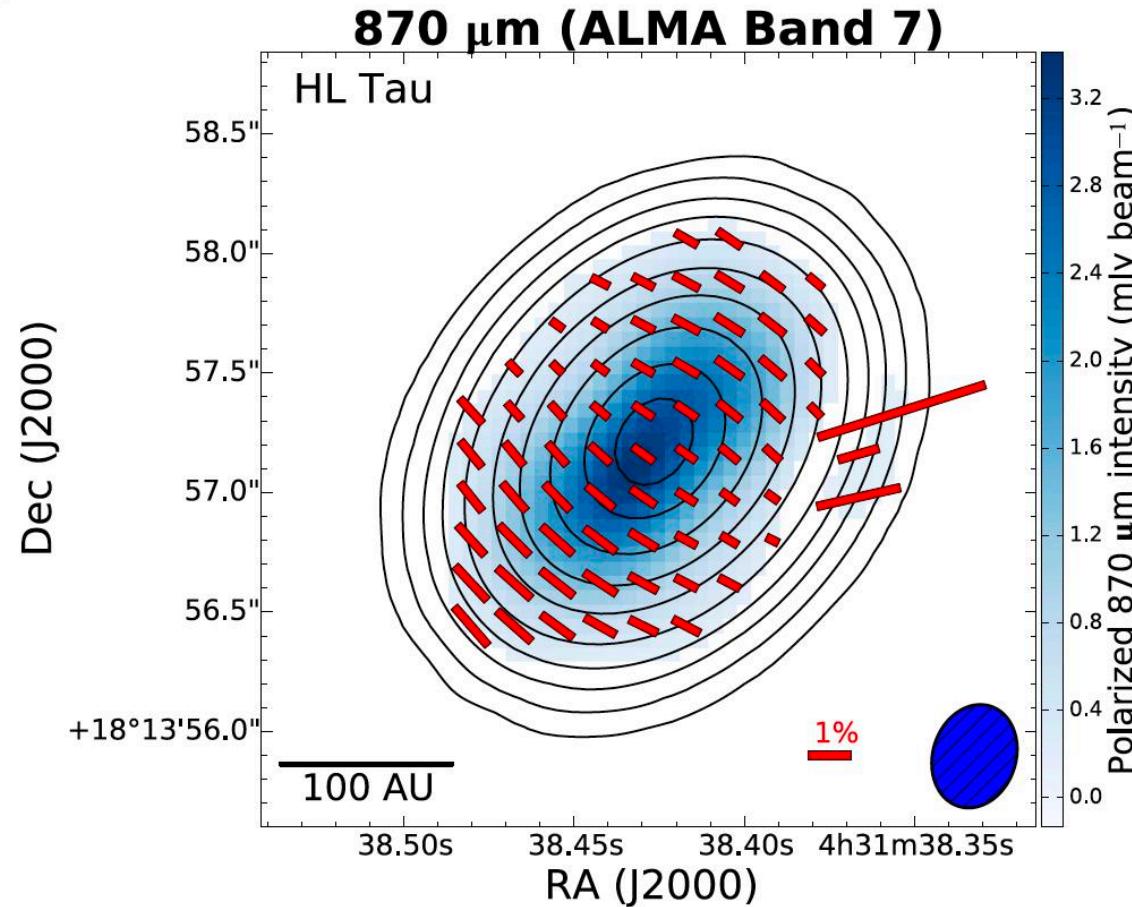
B field (Hoang et al. 2018), Radiation (Tazaki et al. 2017), Gas flow (Lazarian & Hoang 2007, Kataoka et al. 2019)

観測波長の依存性はほぼない

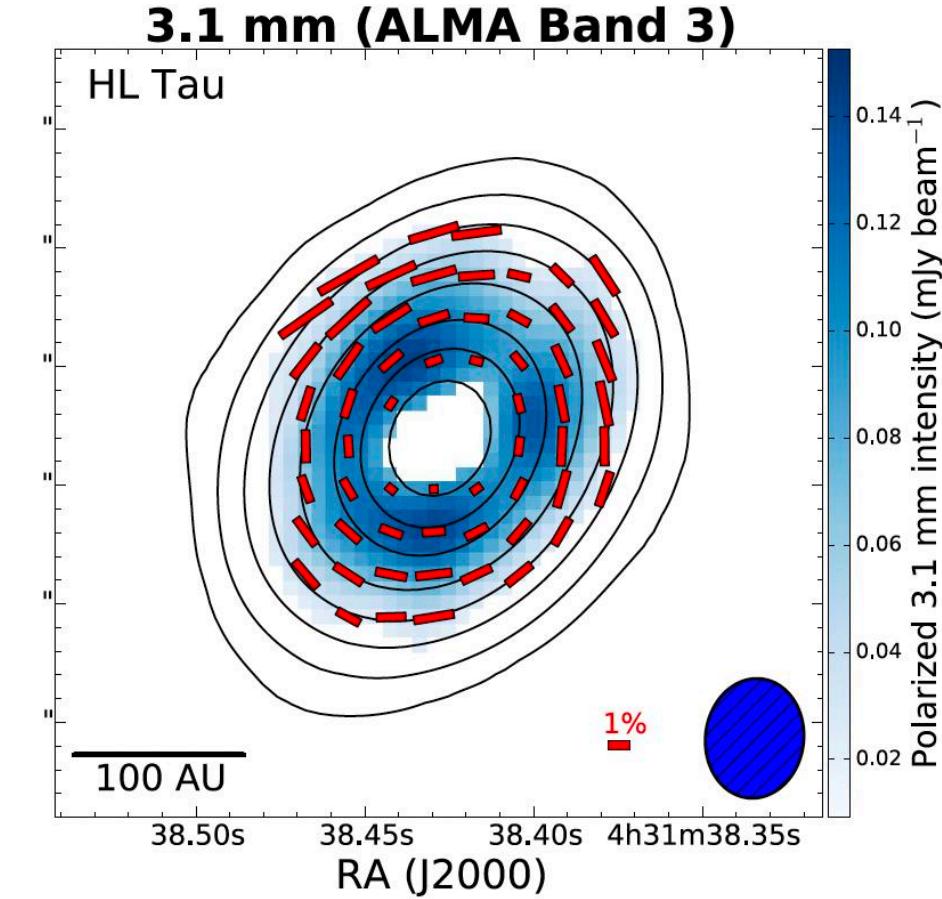
ALMAによるダスト偏光観測（磁場ではない）

HL Tau円盤: 波長を1 mmから3mmに変えるだけで、偏光パターンが劇的に変化

散乱による偏光



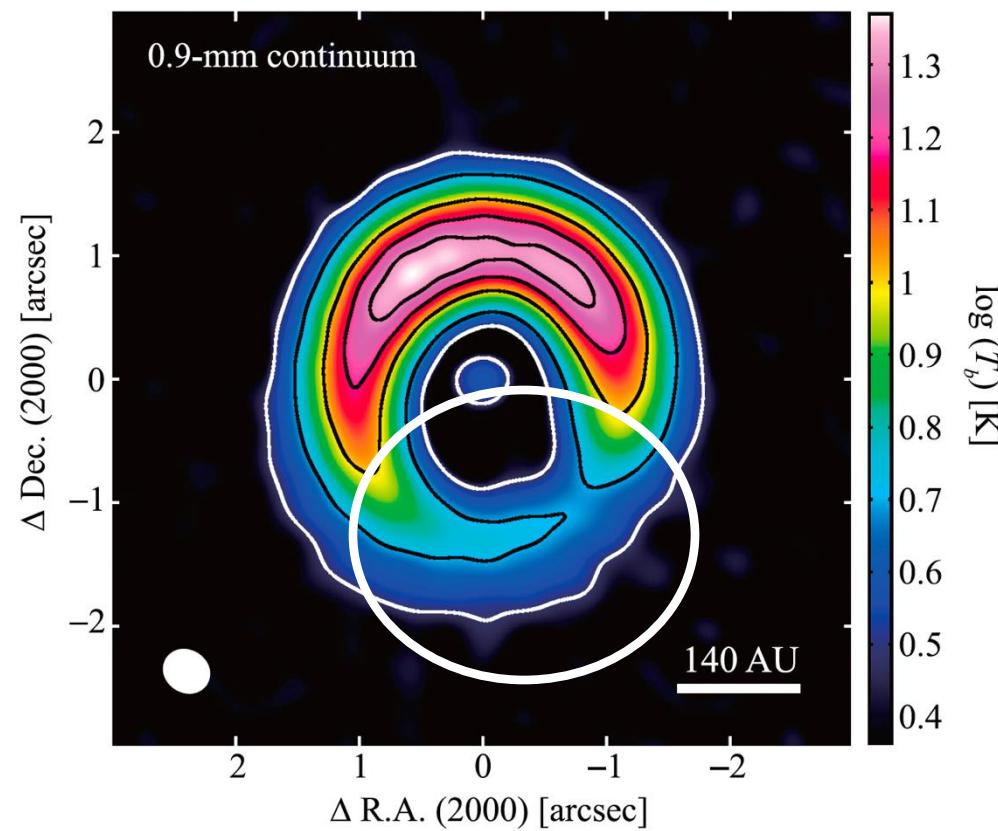
ガス流整列による偏光



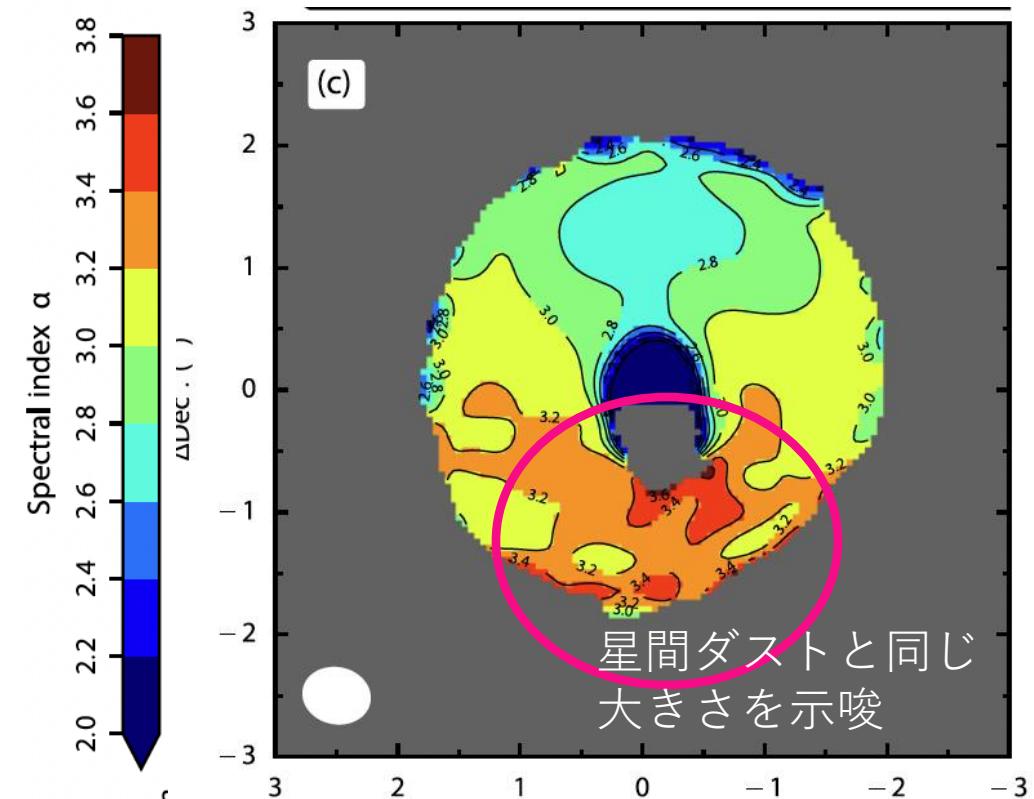
円盤のダストサイズが100 μm を超えると散乱やガス流整列による偏光が見える

ALMAによるダスト偏光観測（磁場）

HD 142527 disk (Fukagawa et al. 2013)



(Soon et al. 2019)



円盤の中でも小さいダストしか存在しない領域では、磁場に整列した偏光が見えるのでは？

ALMAによるダスト偏光観測（磁場）

ALMA Band 3, 4, 6, 7の
多波長偏光観測

南側で

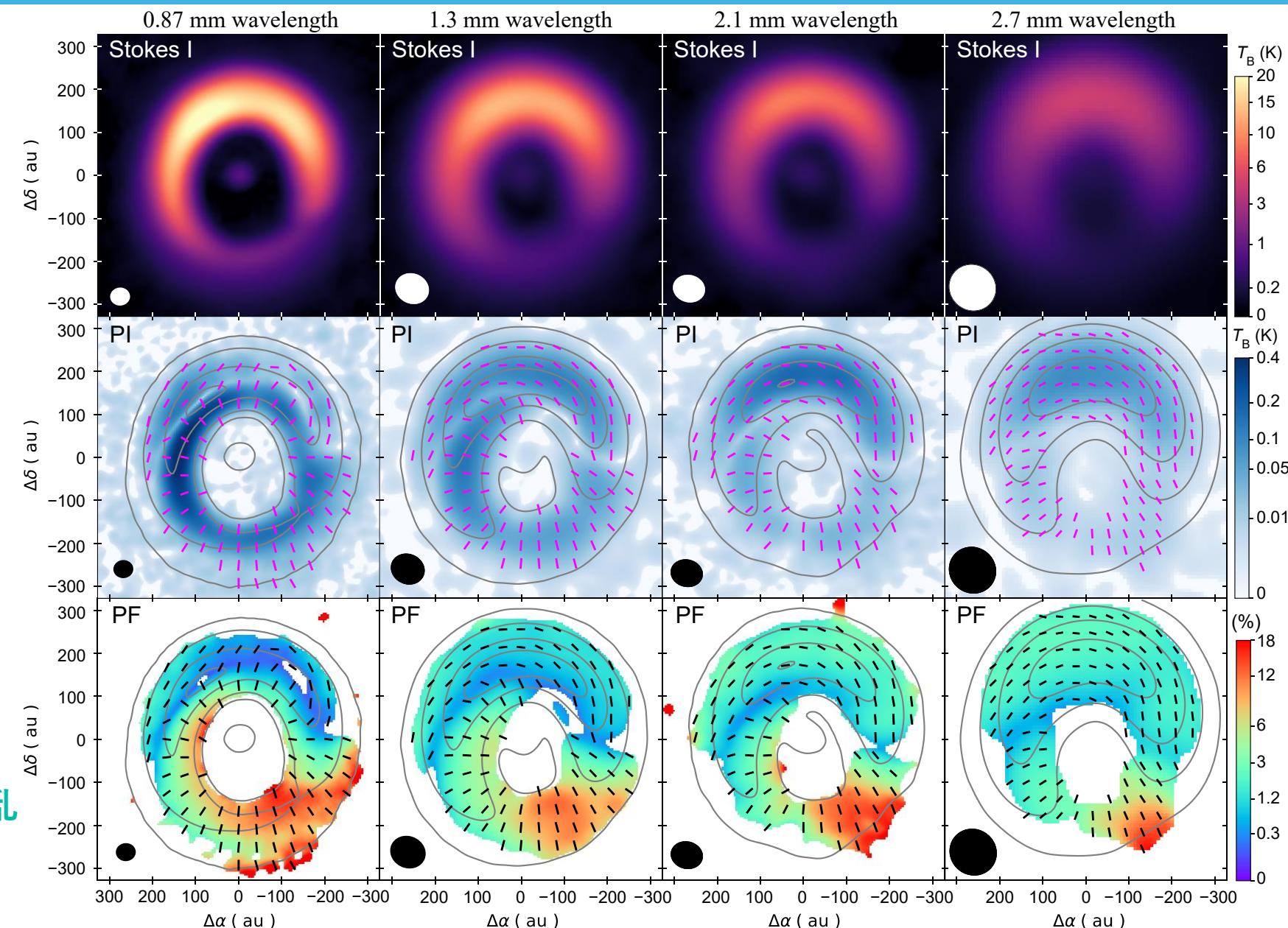
- 波長依存性がない
- 偏光ベクトルが動径方向
- 偏光度が10%以上と高い

**(トロイダル) 磁場による
ダスト整列と整合**

北側で

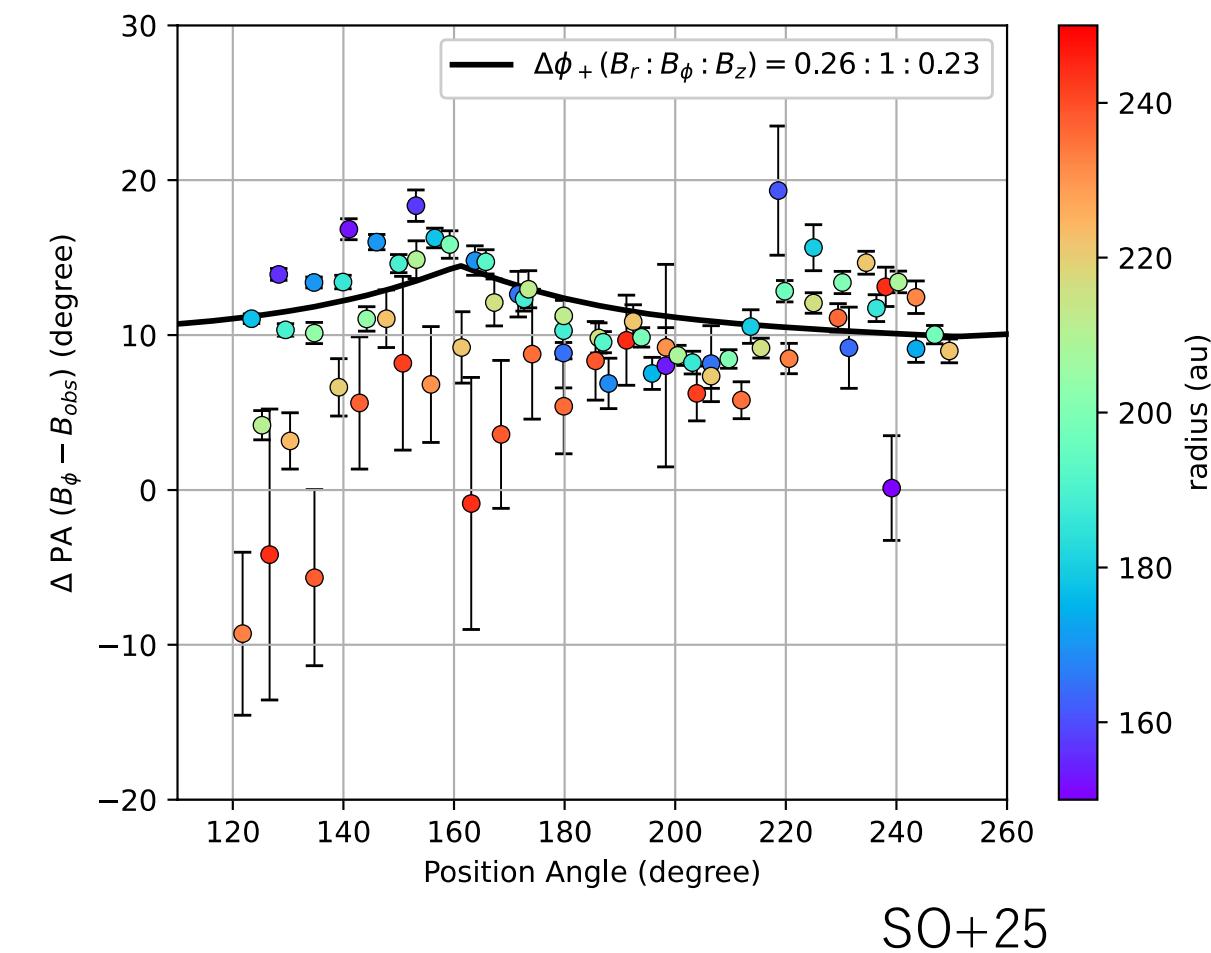
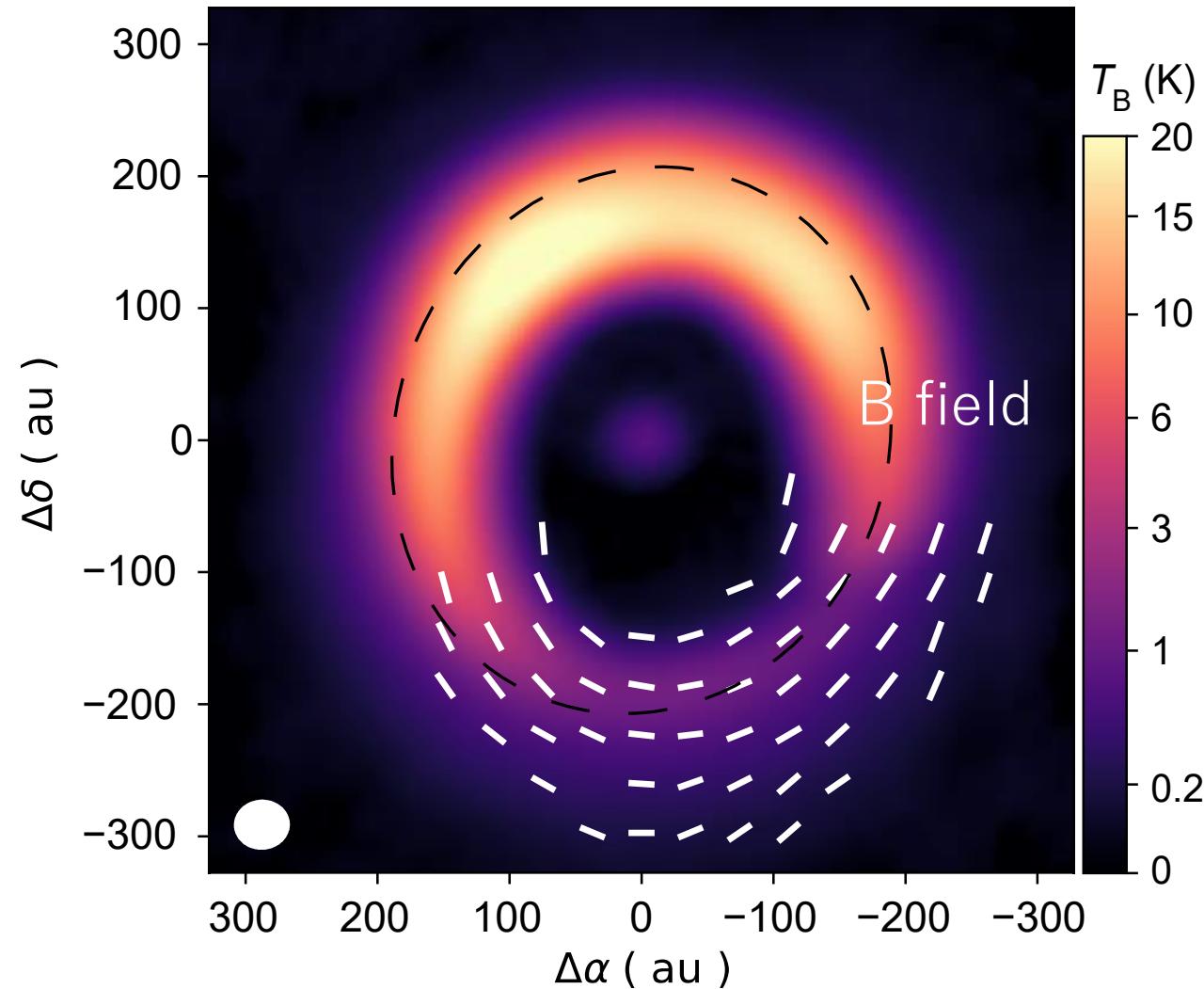
- 波長依存性があり
- 偏光ベクトルが円周方向
- 偏光度が1%程度

**ガス流のダスト整列や自己散乱
と整合**



円盤の3次元磁場と強度の推定

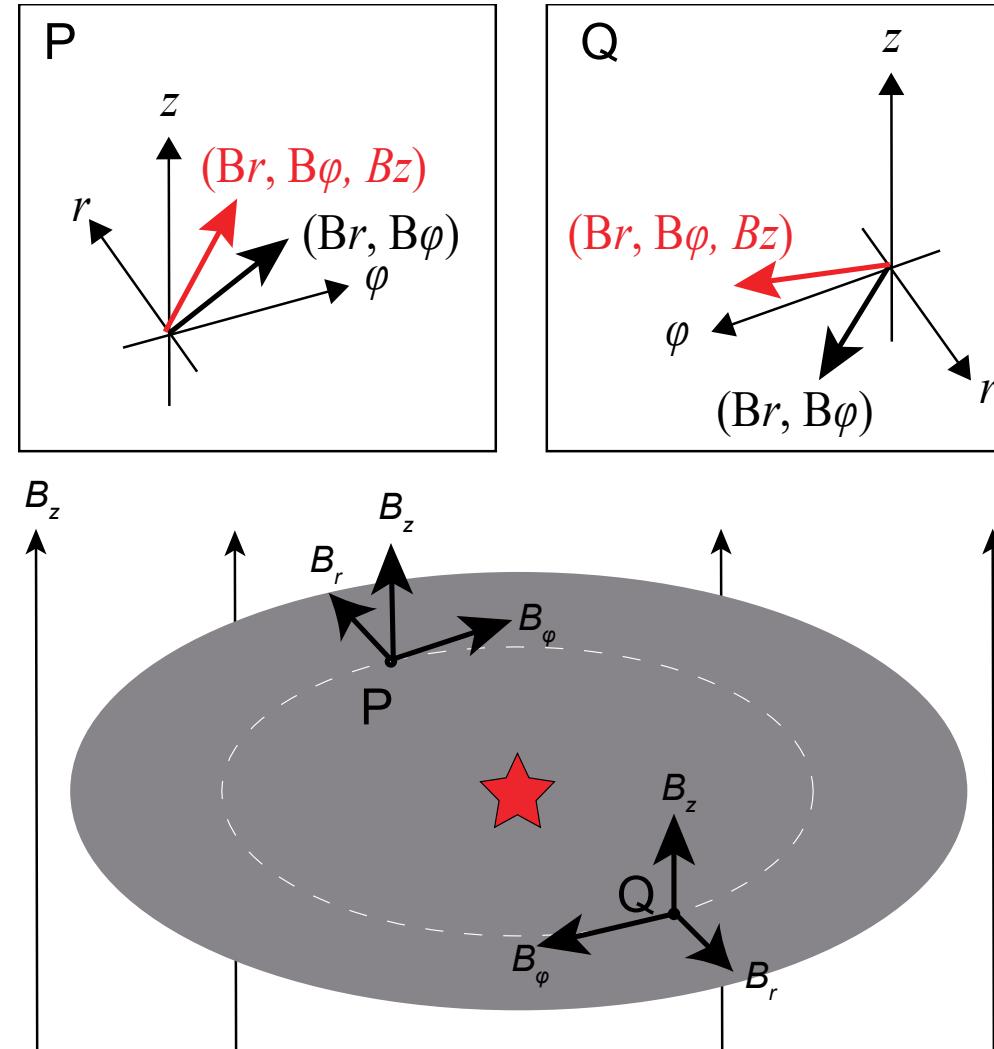
The magnetic field are found to be almost azimuthal (toroidal), but slight offsets are also identified
 The offset angle from the toroidal will be caused by poloidal magnetic field



SO+25

円盤の3次元磁場と強度の推定

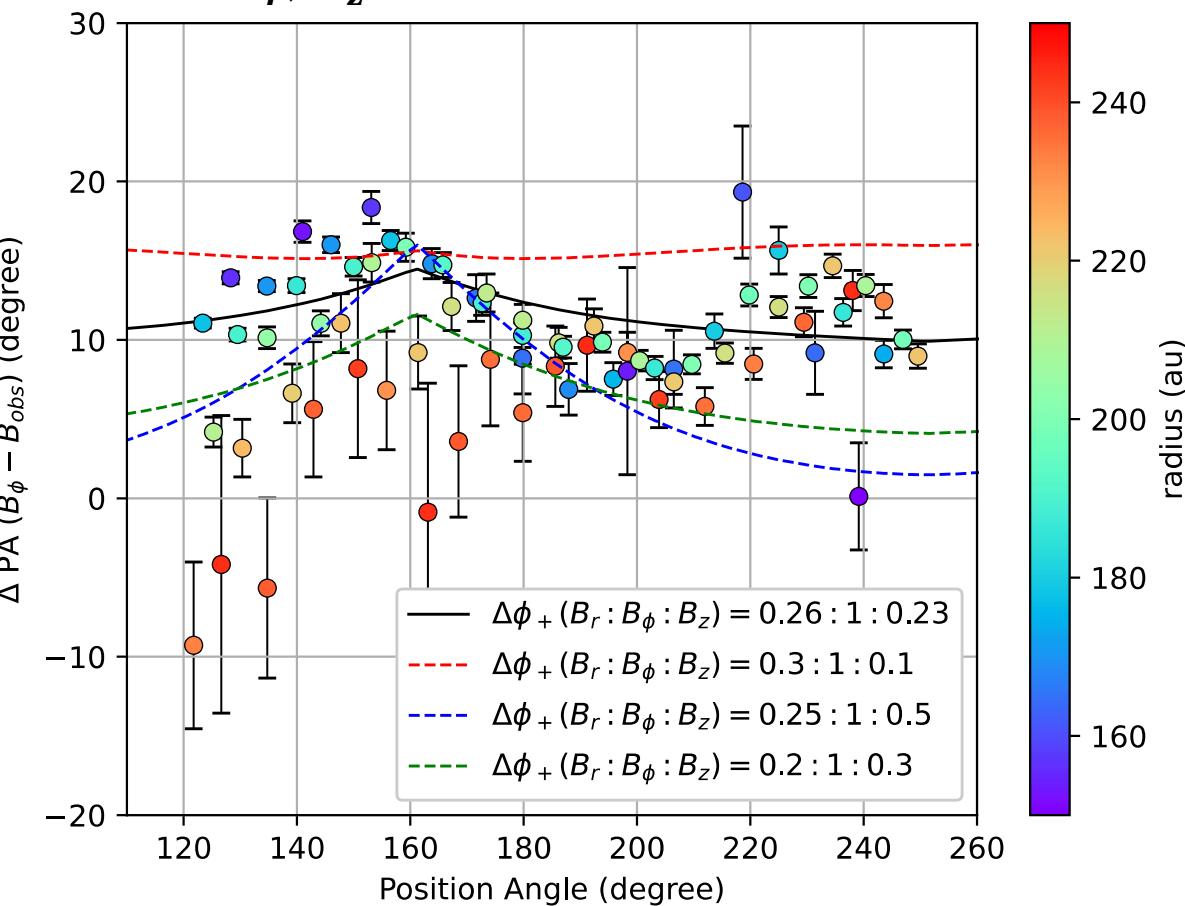
トロイダル方向とのずれは、円盤磁場の3次元構造で説明可能
 → B_r や B_z 成分の寄与が円盤の位置角(position angle)に依存する



The best fit parameter is

$$|B_r| : |B_\varphi| : |B_z| \sim 0.26 \pm 0.01 : 1 : 0.23 \pm 0.03$$

※ B_r, B_z の割合がシミュレーションより高い



円盤の3次元磁場と強度の推定

The magnetic strength will be estimated from B_ϕ/B_z

the balance between the generation and the dissipation of B_ϕ by ambipolar diffusion
(Tsukamoto+23)

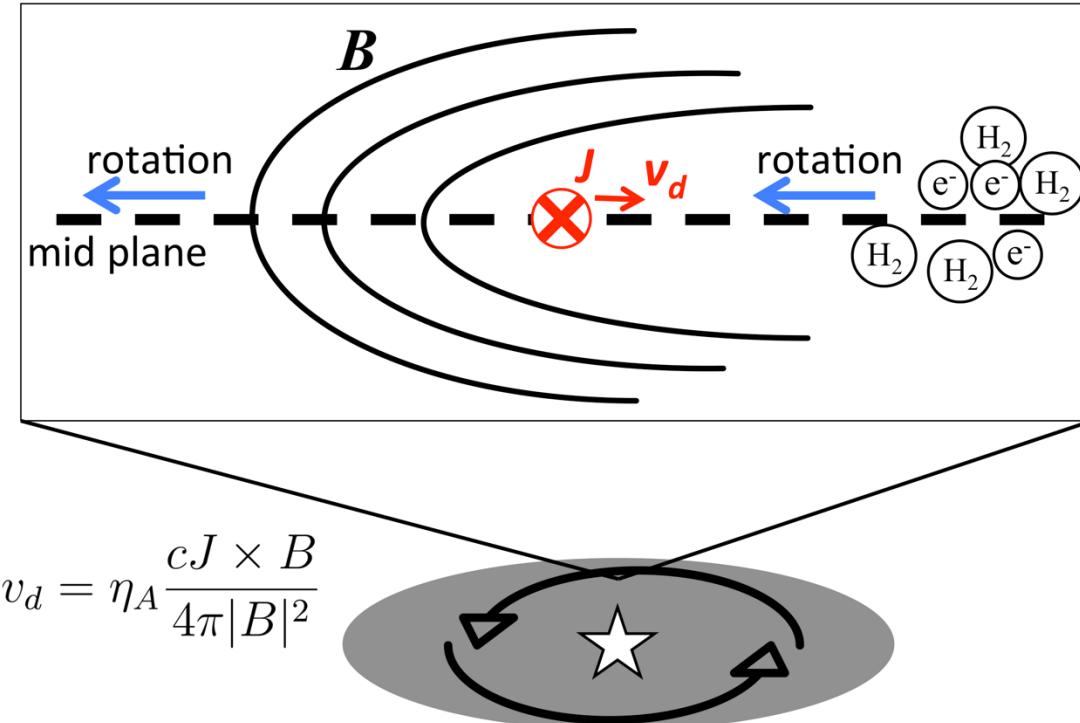
$$B_\phi = \left(\frac{H}{r}\right)^2 \left(\frac{B_z H}{\eta_A}\right) v_\phi = \frac{H^3}{r} \frac{\Omega_K}{\eta_A} B_z$$

$$\eta_A = \frac{H^3 \Omega_K}{r} \frac{B_z}{B_\phi}$$

Applying $M = 2.4 M_\odot$, $T = 30$ K, and $\frac{B_z}{B_\phi}$ of 0.23,
 η_A is derived to be $\eta_A = 2.3 \times 10^{17} (\text{cm}^2 \text{s}^{-1})$

the ambipolar resistivity is written as

$$\eta_A = \frac{B^2}{4\pi C \gamma \rho^2}^{\frac{3}{2}}, \text{ then } \mathbf{B} \sim 0.3 \text{ mG}$$



円盤の3次元磁場と強度の推定

The plasma beta and MRI

By assuming $B \sim 0.3$ mG, $\eta_A = 2.3 \times 10^{17}$ cm² s⁻¹, and $\rho = 6.6 \times 10^{-16}$ g cm⁻³,

the Am parameter is derived to be $\text{Am} \sim 0.4$ ($\text{Am} = \frac{v_A^2}{\eta_A \Omega_K} = \frac{B^2}{\eta_A \Omega_K \times 4\pi\rho} = \frac{C\gamma\rho^{\frac{1}{2}}}{\Omega_K}$) .

The plasma beta

$\beta = \frac{8\pi\rho c_s^2}{B^2}$ and was derived to be $\beta \sim 2.0 \times 10^2$

$$(C = \sqrt{\frac{m_i^2 \zeta_{\text{CR}}}{m_g \beta_r}} \text{ and } \gamma = \frac{\langle \sigma v \rangle_{\text{in}}}{(m_g + m_i)})$$

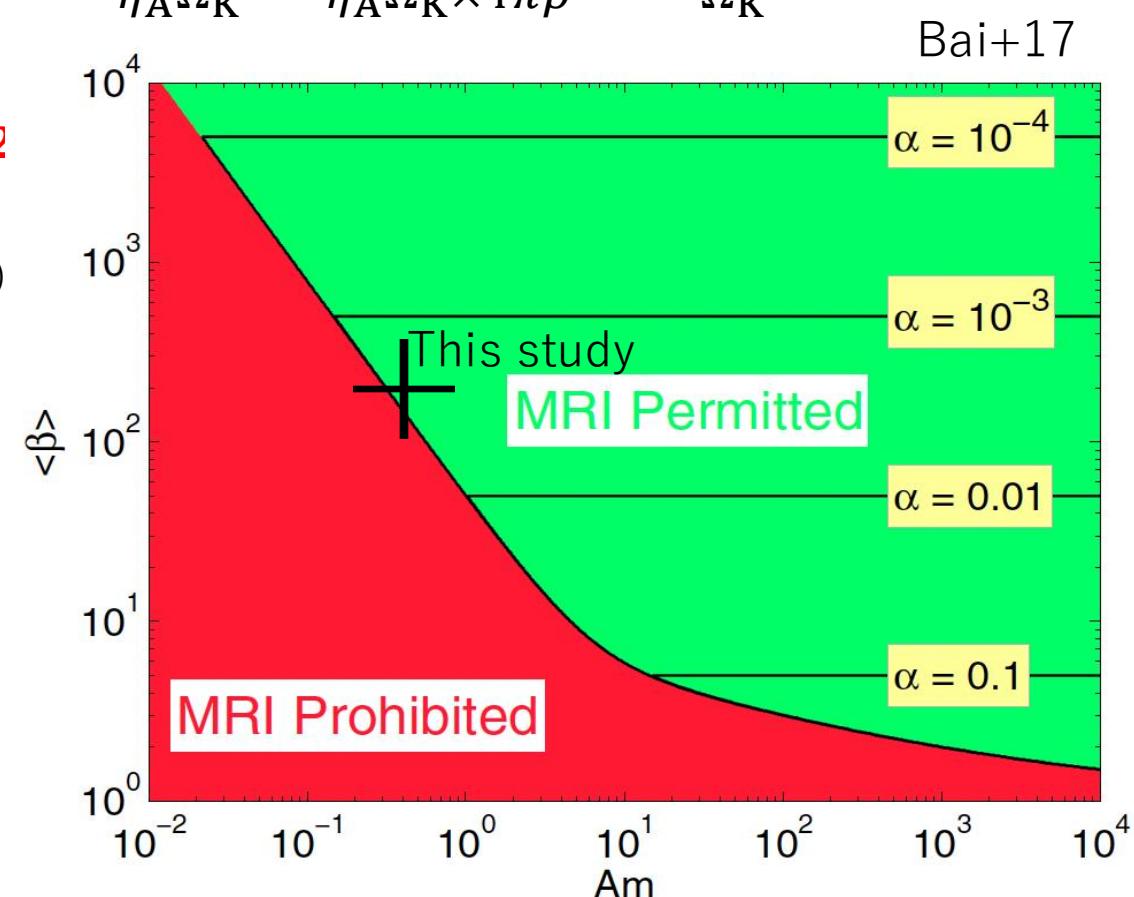
The disk around $r \sim 200$ au is MRI active!!

The disk is highly turbulent (Tazaki+19)

※MRI activeとdeadの境界に位置する

→ 少し電離度が低いと乱流がなくなる（観測と整合？）

円盤 100 auスケールの磁場構造はシミュレーションによって様々 (Suzuki 2014, Bai et al. 2017)
観測・理論とも未開拓な分野



円盤の3次元磁場と強度の推定

The alpha value related to the angular momentum transfer

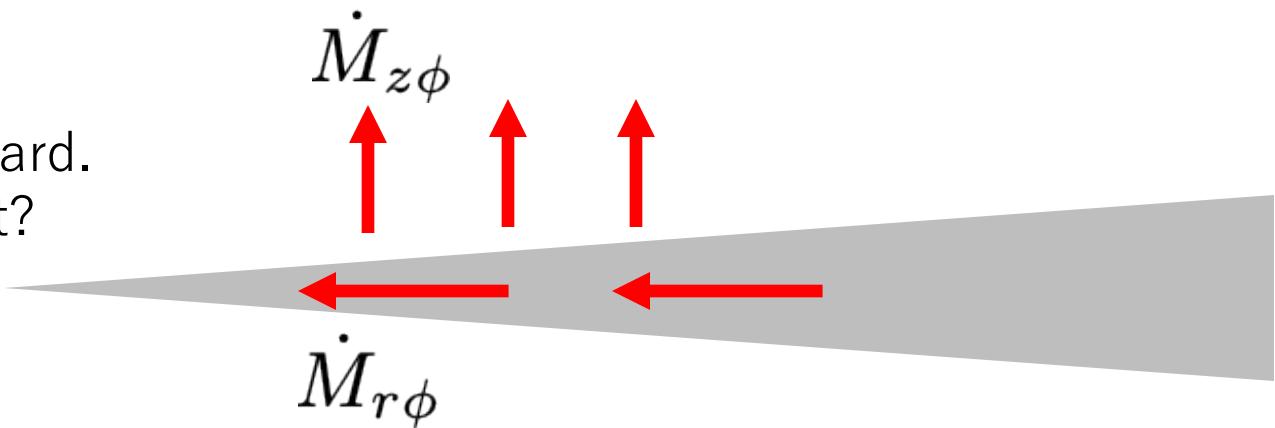
- Radial angular momentum transfer

$$\alpha_{r\phi} = \frac{M_{r\phi}}{\rho c_s^2} \sim 2.5 \times 10^{-3} \quad M_{r\phi} = \frac{B_r B_\phi}{4\pi}$$

- Vertical angular momentum transfer

$$\alpha_{z\phi} = \frac{M_{z\phi}}{\rho c_s^2} \sim 2.2 \times 10^{-3} \quad M_{z\phi} = \frac{B_z B_\phi}{4\pi}$$

By considering the mass flux of in and outward.
The vertical angular momentum is dominant?



(磁場に関する) ALMAの大型プロジェクト

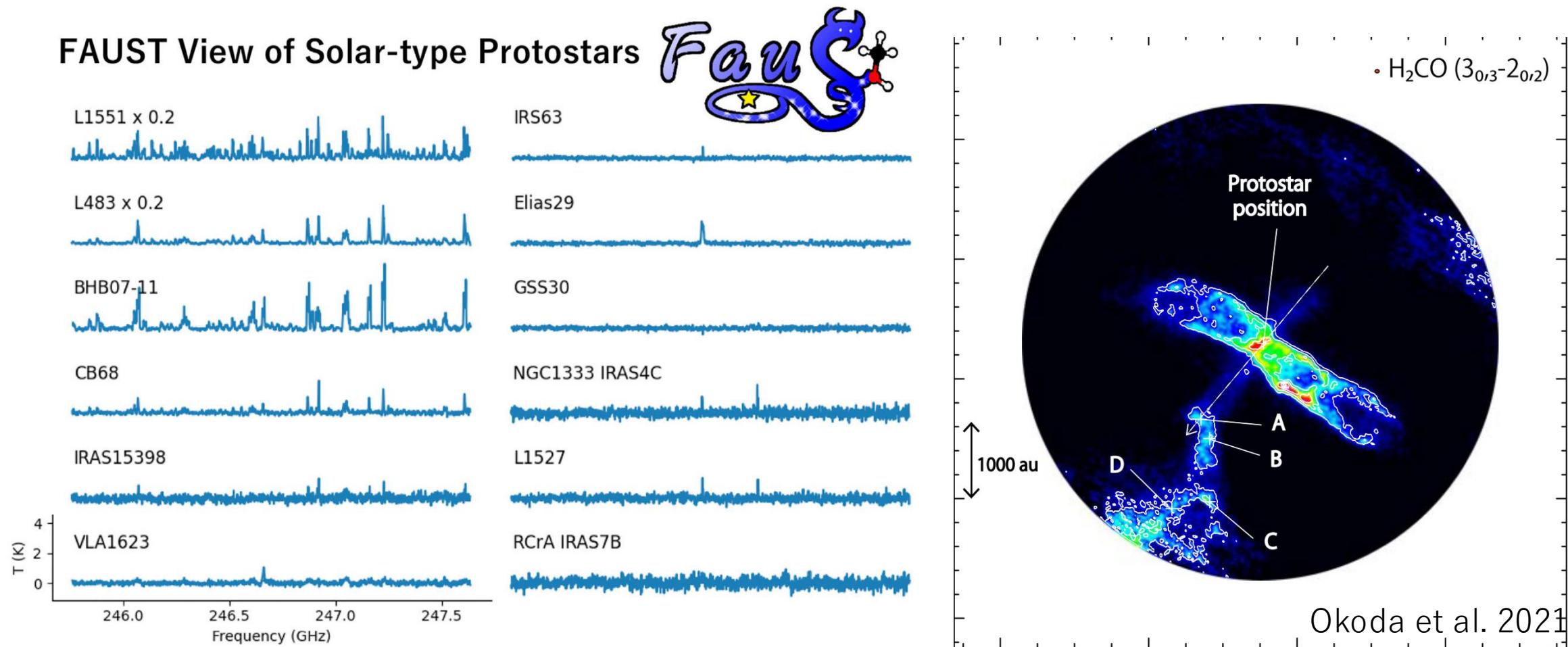
化学的多様性

→ 星形成の開始時間(UV遮蔽)差や環境

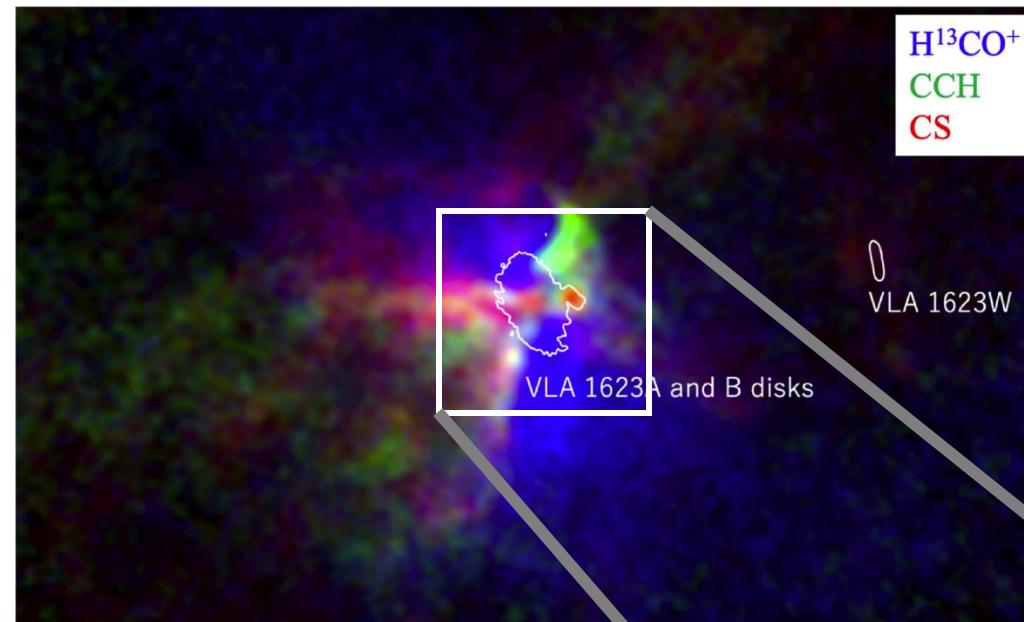
様々な分子を観測し、見れなかった成分も見えた

- Secondary outflow (Okoda et al. 2021)

→ 磁場と角運動量のずれによってアウトフローの向きが揺れる？

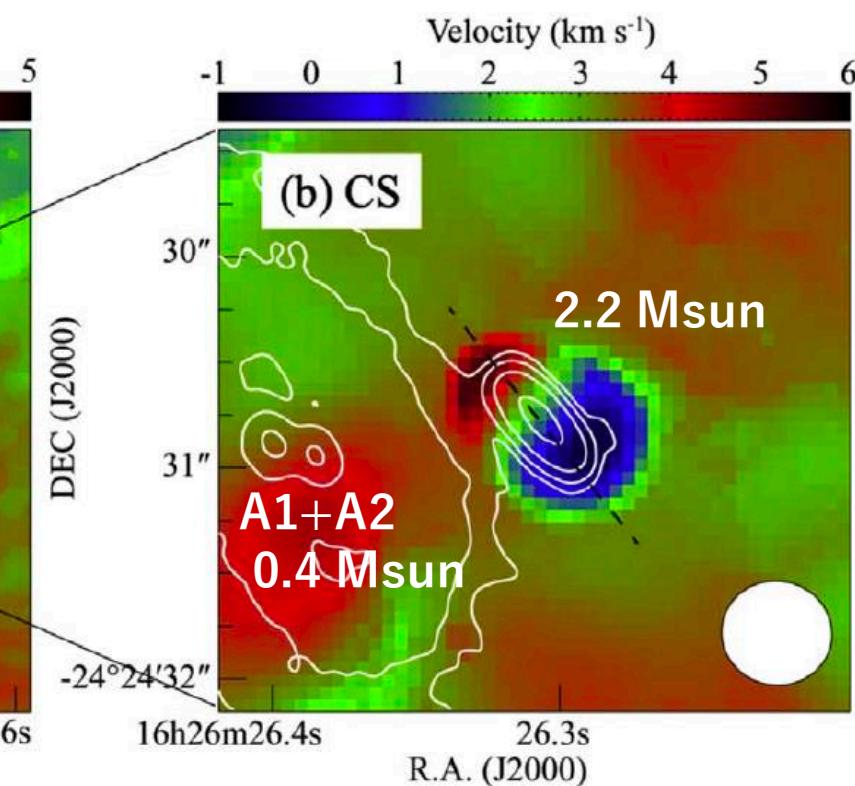
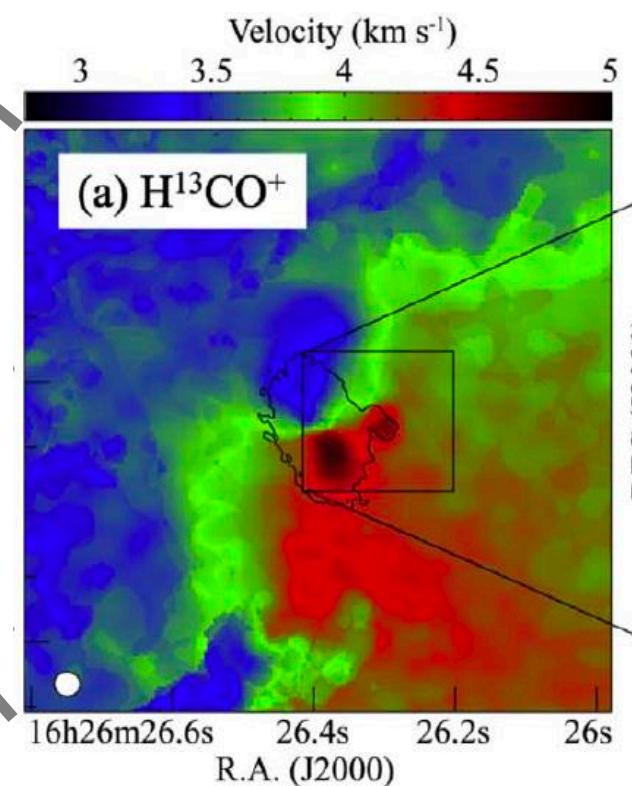


(磁場に関する) ALMAの大型プロジェクト



分子雲コアとcircum-binary disk(A)の回転は15度ずれ
アウトフローは分子雲コアの回転に垂直
Circum-stellar disk (B)はcircum-binary diskや分子雲コアの回転と正反対

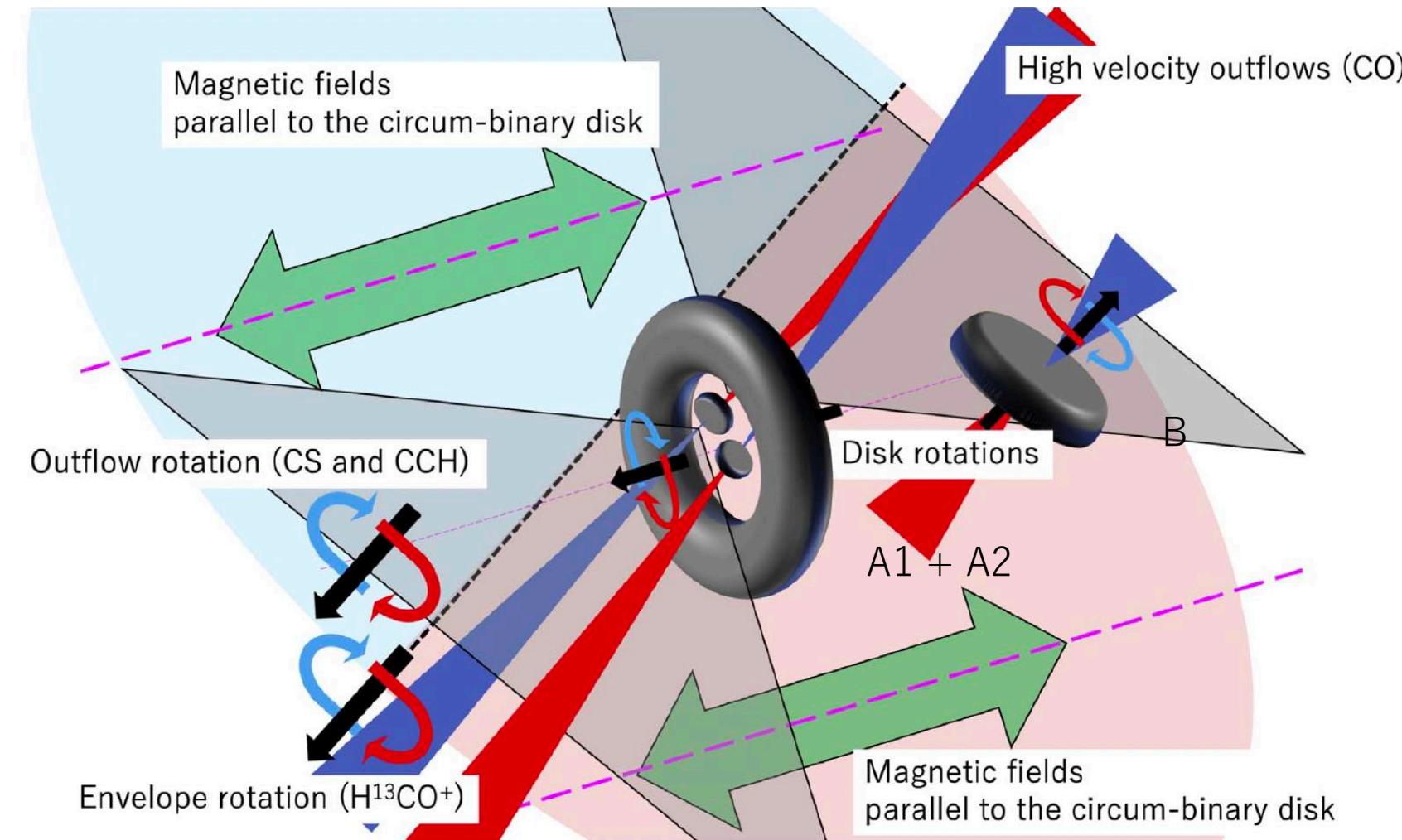
Bの原始星は2.2 Msun, A(A1+A2)は0.4 Msun



(磁場に関する) ALMAの大型プロジェクト

磁場と分子雲コアの回転にズレがあり、アウトフローや円盤の回転軸にズレを生じる
(Hirano & Machida 2019)

ただし、Bの回転は不明 (Aからのアウトフローによって押された?)



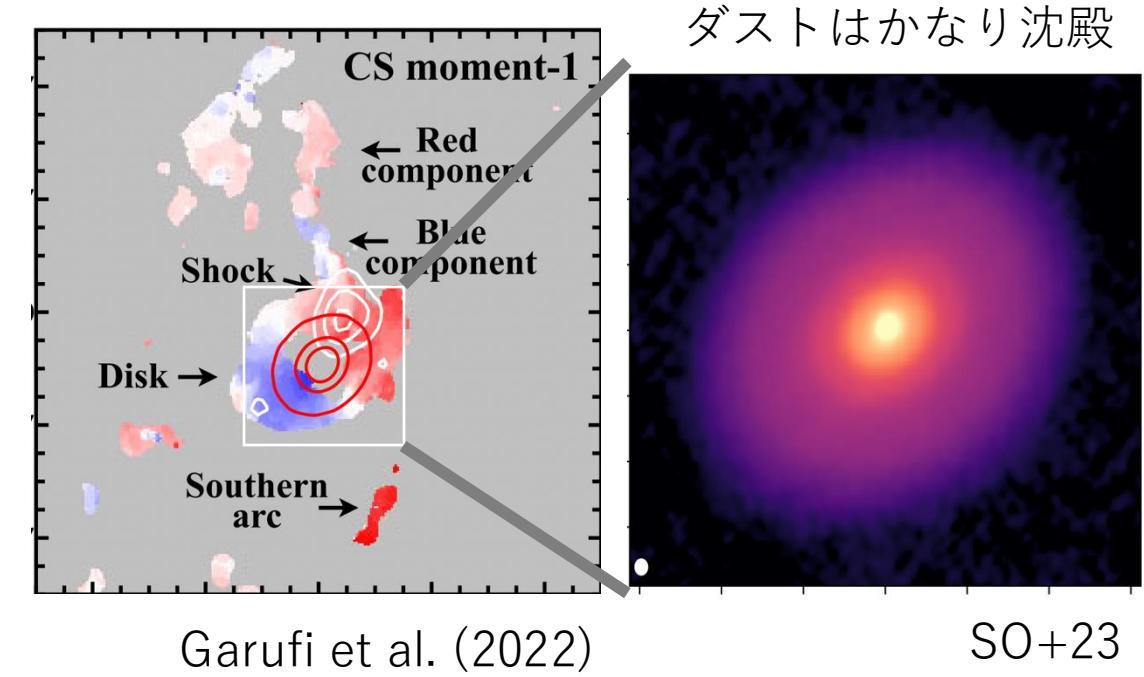
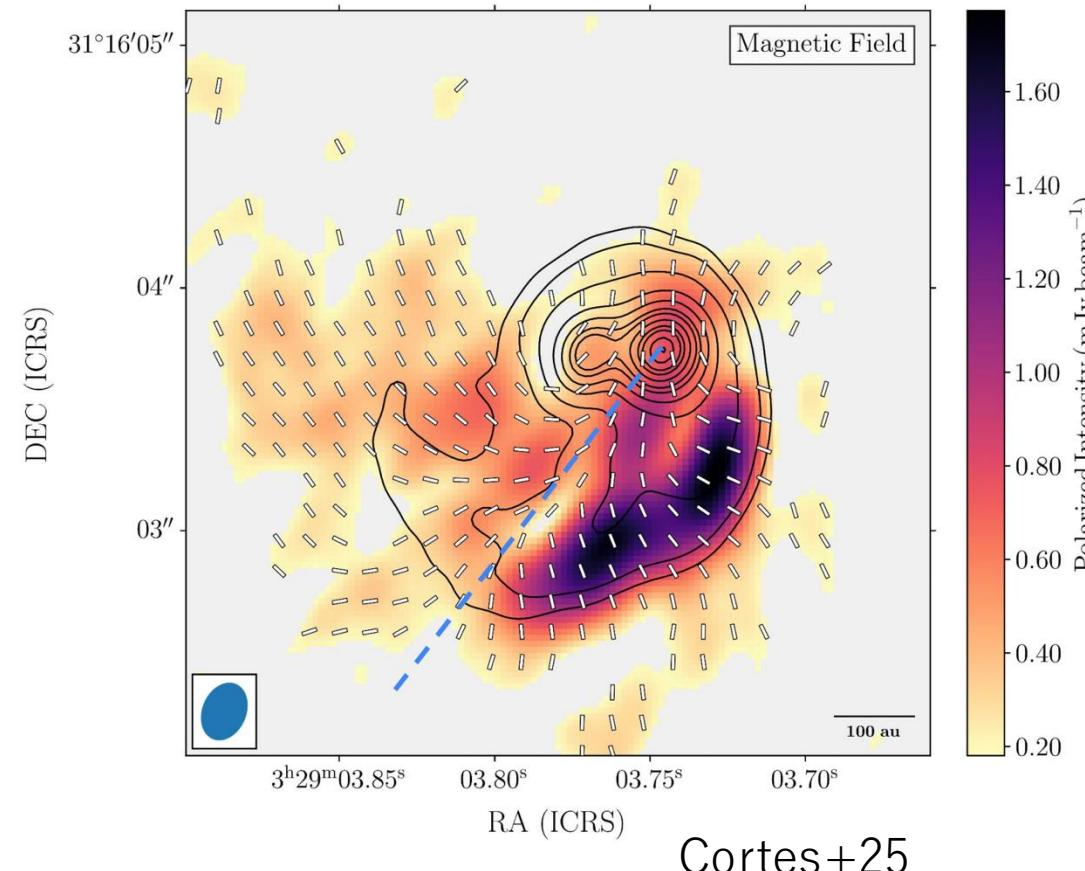
(磁場に関する) ALMAの大型プロジェクト

原始星の降着段階でストリーマー構造を観測、磁場に沿って降着($B \sim 1.1$ mG)

→ 化学的にフレッシュな分子が円盤に降り積もる

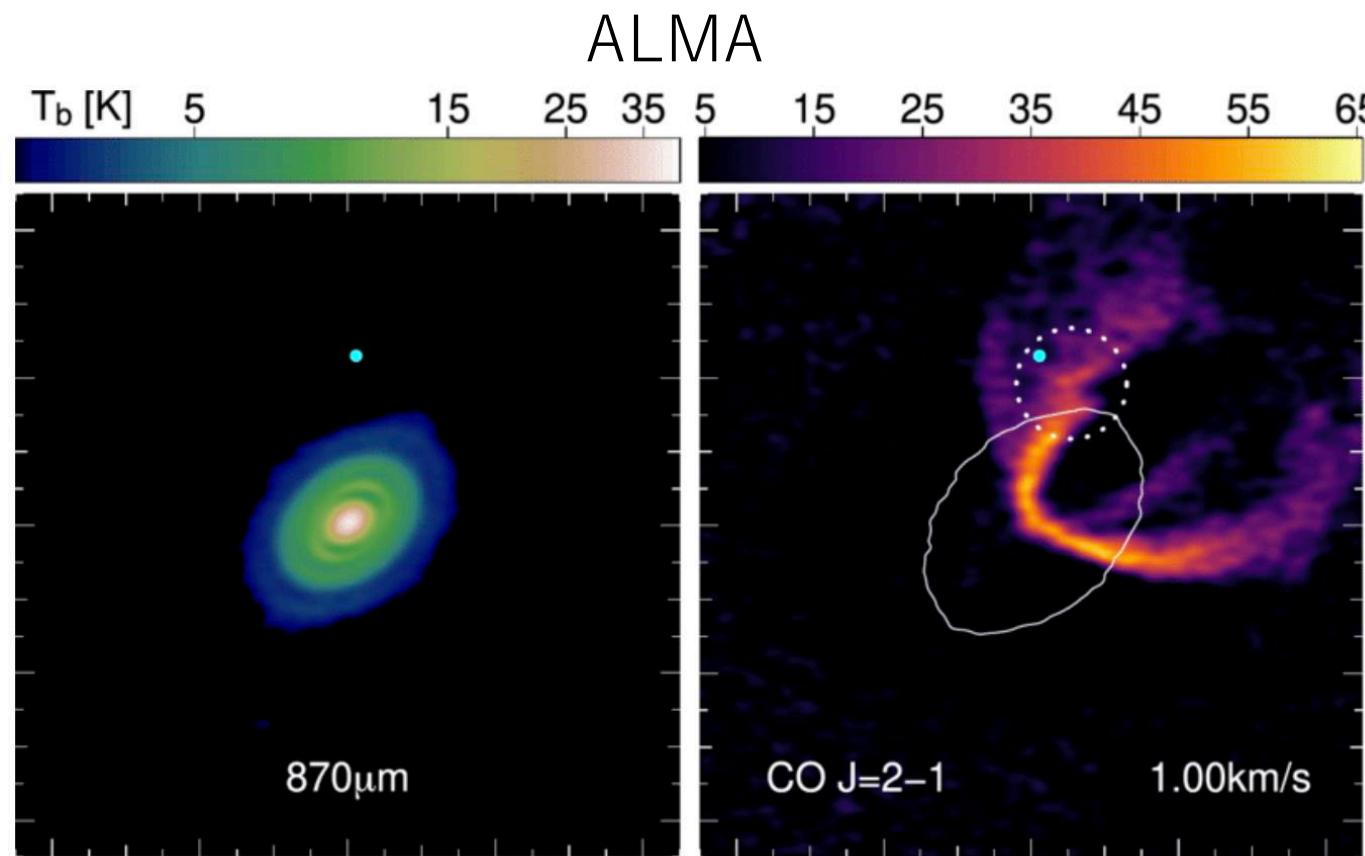
理論的にはよく見られる構造?

ストリーマーが円盤にぶつかってSO分子がショックで検出されるが、ダスト構造に影響なし

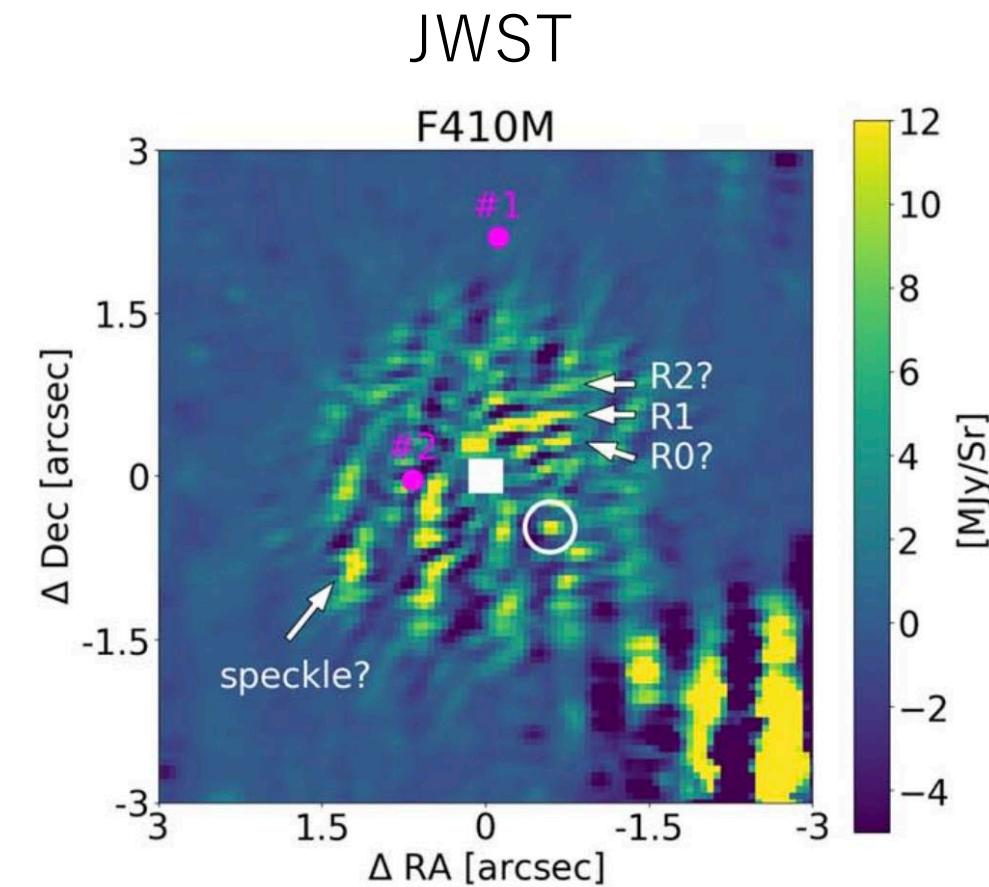


JWSTとALMAのシナジー

JWSTでは惑星による速度擾乱(kink)の位置で惑星見つからず、
 → kinkは惑星以外でも？近赤外ではダストの散乱減光が効いてる？

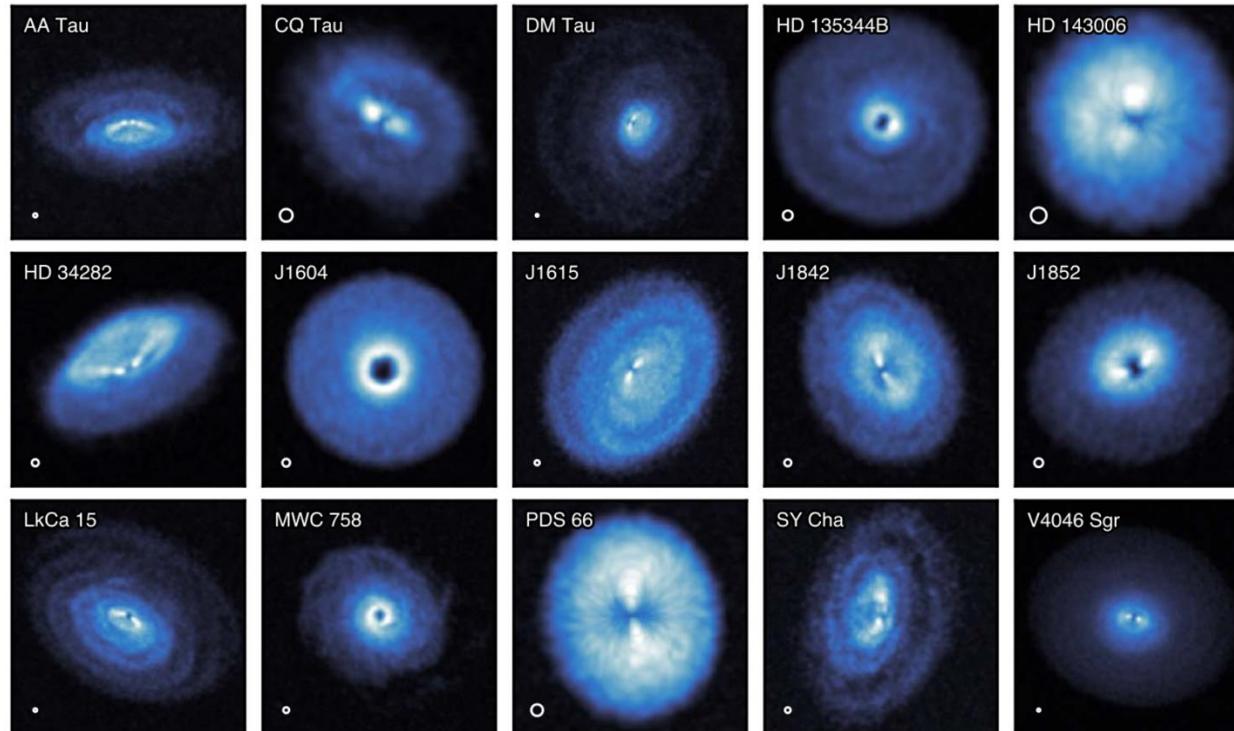


Pinte et al. 2018

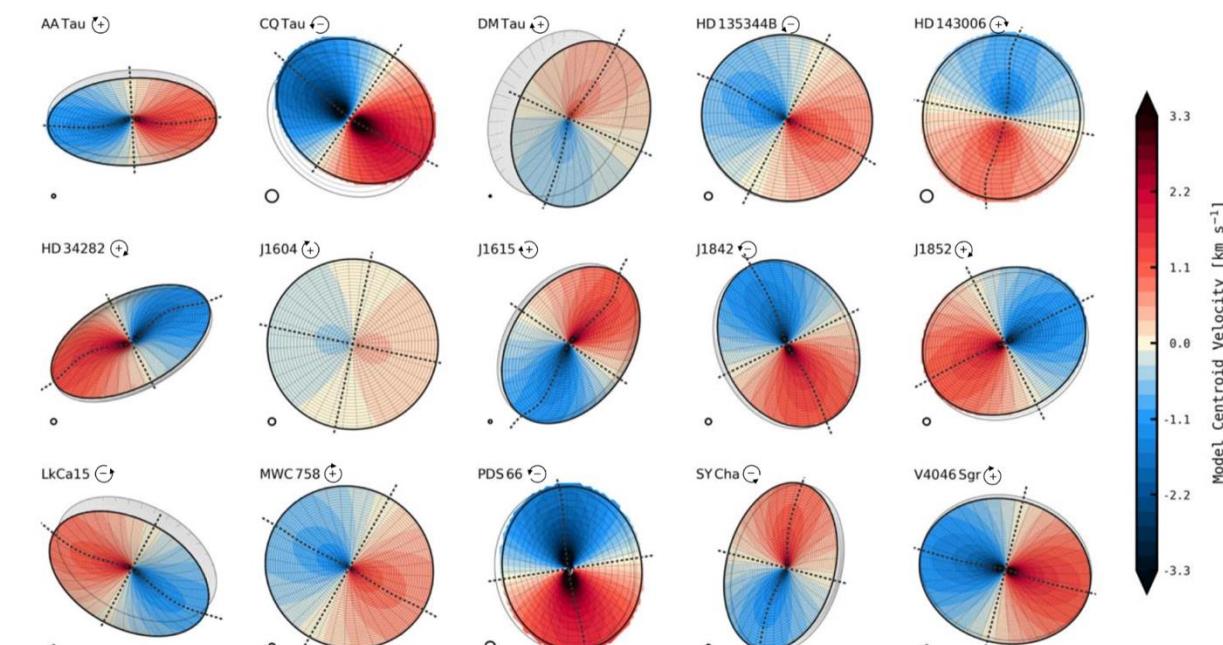


ALMAの大型プロジェクトによる成果

exoALMA (Teague+25)



^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O での円盤速度構造と鉛直分布がわかる

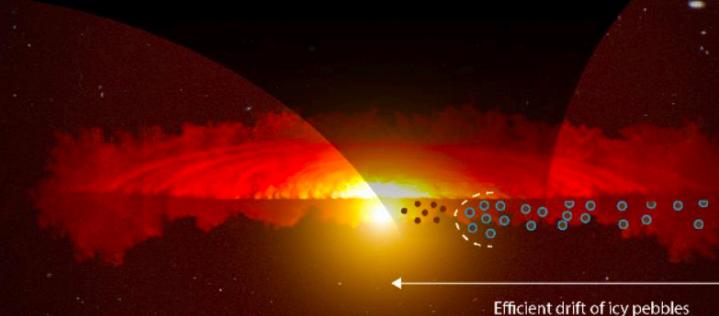
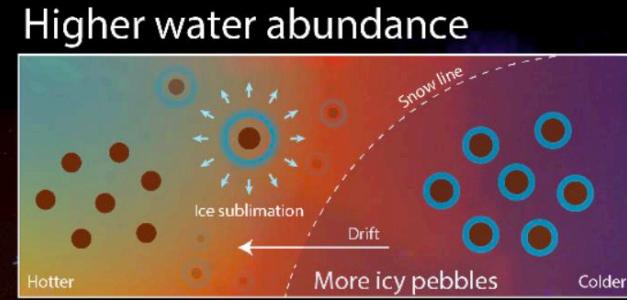


- 埋もれた惑星を見たい
→ 惑星の存在と思われる速度擾乱はあるが、ギャップ位置と相関なし。惑星なのか？
- 円盤の温度や鉛直構造が明らかに

JWSTとALMAのシナジー

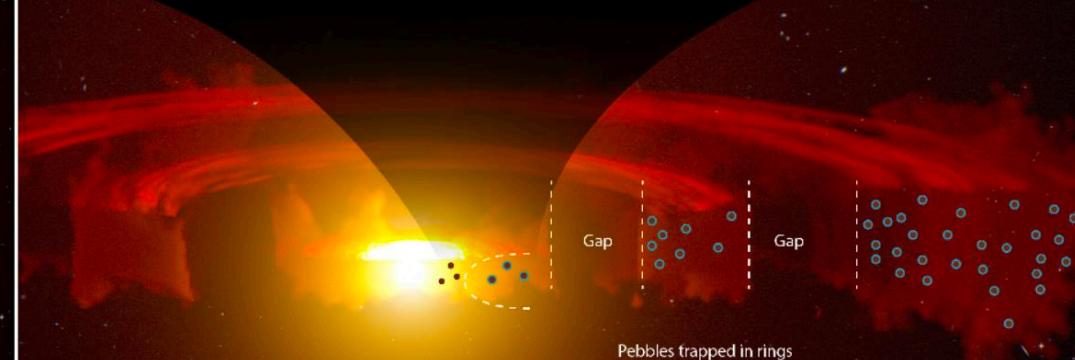
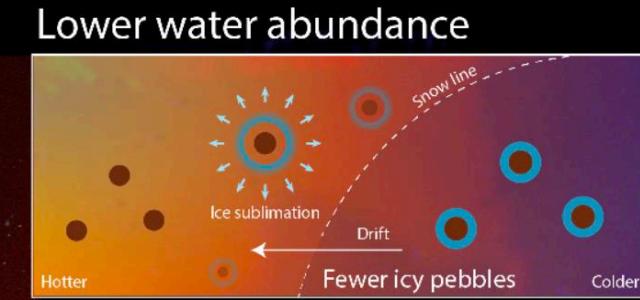
PROTOPLANETARY DISKS ICY PEBBLE DRIFT

MIRI | Medium Resolution Spectroscopy



Compact Disk

Credit: NASA, ESA, CSA, J. Olmsted (STScI)



Extended Disk

WEBB
SPACE TELESCOPE

まとめ

- ALMA観測で惑星形成の時期が100万年程度と示された
- 円盤ダストは光学的に厚い領域では0.1-1mm程度でコンパクトである（惑星形成はダスト成長ではない？）
- 0.1-1mmダストは成長が止まっているvs副次的に生成（破壊）？
- 光学的に薄い領域はcmやmサイズまで？（さらなる検証が不可欠）
- 磁場は星形成から惑星形成まで重要
- 円盤磁場は観測・理論とも未開拓な分野**
- $|B_r|:|B_\phi|:|B_z| \sim 0.26 \pm 0.01: 1: 0.23 \pm 0.03$**
※ B_r, B_z の割合がシミュレーションより高い
- ストリーマーは磁場に沿って流れ、円盤にぶつかる
- S0分子などのshock輝線は検出されるが、ダストの構造に変化なし→円盤ダストは沈殿し硬い
- 連星系の形成にも磁場は影響（secondary outflowや misalignment）
- 逆回転円盤の起源は不明
- GIは惑星形成にも重要？ただし螺旋を示す円盤はレア

