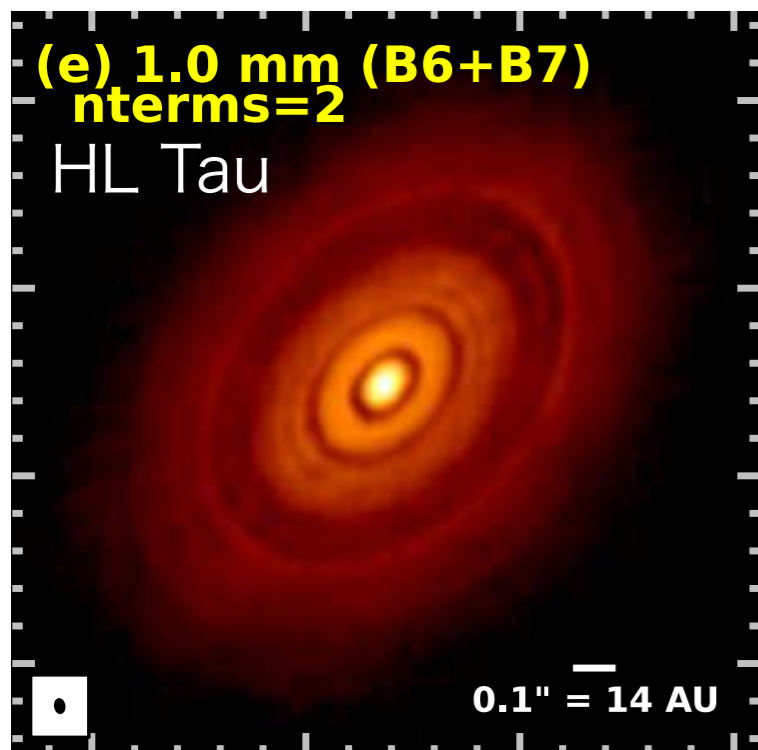


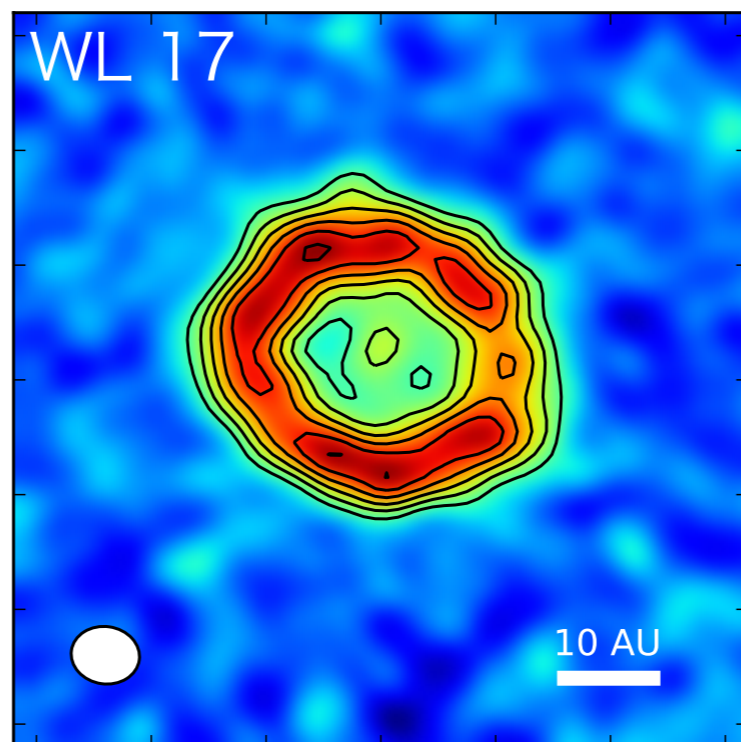
原始惑星系円盤における
リング・ギャップ構造形成メカニズム

Sanemichi Takahashi
(Kogakuin University/NAOJ)

原始惑星系円盤の詳細構造の観測



ALMA partnership et al. 2015

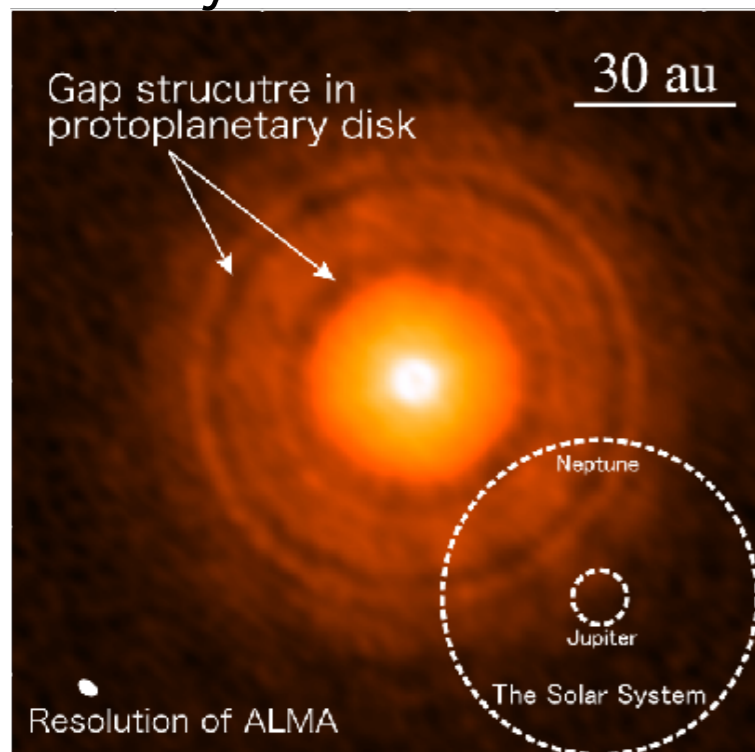


Sheehan et al. 2017

HL Tauを始めとする
数天体でリング構造が
観測

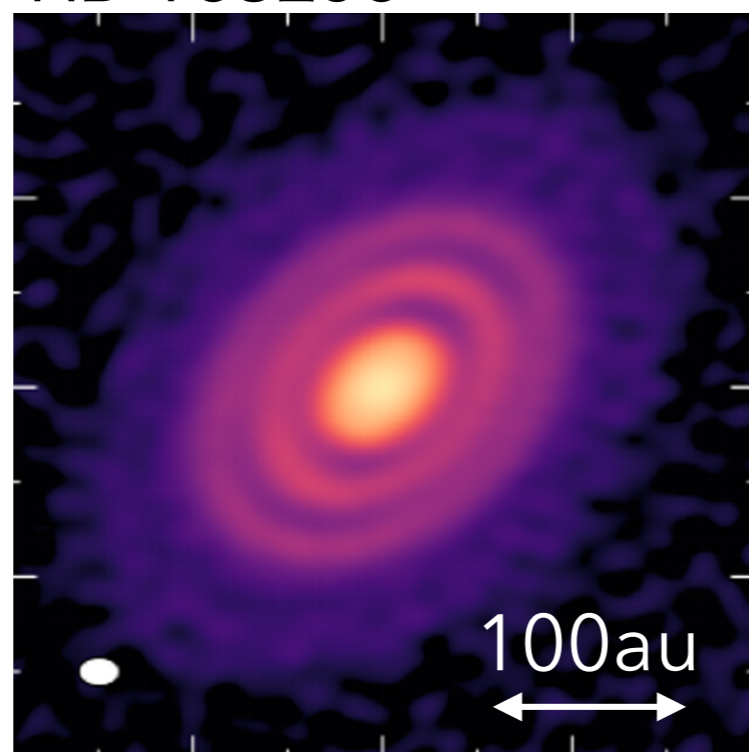
< 1 Myr

TW Hya



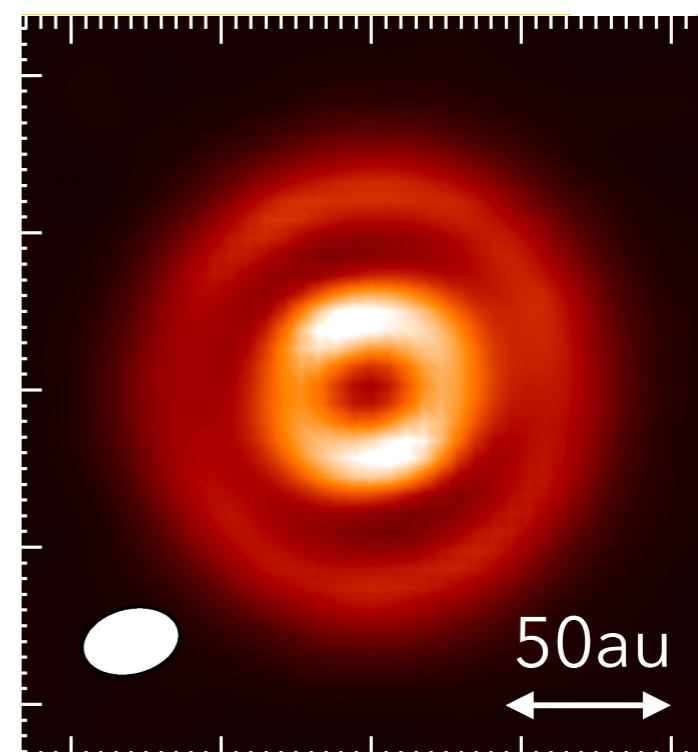
Tsukagoshi +2016

HD 163296



Isella +2016

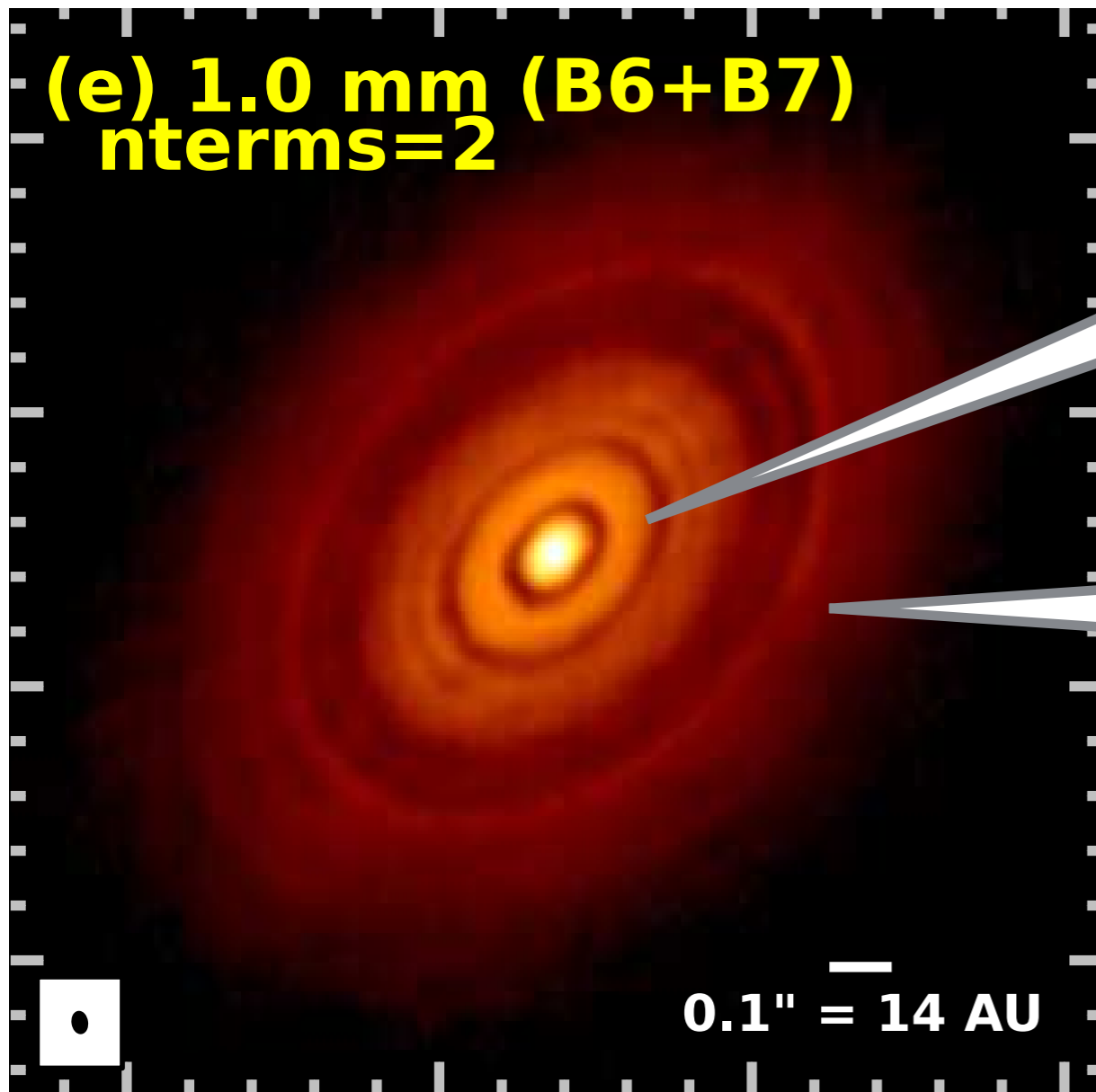
HD 169142



Fedele+2017

~10 Myr

惑星形成理論との関係



ギャップに惑星？
形成時間に制限 (<1 Myr)

リングにダスト濃集？
微惑星形成を促進

リング・ギャップ形成メカニズムの解明が
惑星形成過程の理解のヒントになる

リング・ギャップ形成メカニズム

多重リング

惑星 (cf. Kanagawa et al. 2015, 2016, Dong et al. 2015, 2017, Jin et al. 2016)

ダスト進化 (成長:Zhang et al. 2015 Sintering:Okuzumi et al. 2015)

永年重力不安定性 (cf. Takahashi Inutsuka 2014, 2016)

ダスト沈殿に伴う不安定性 (Loren-Aguilar & Bate 2015)

MRI (dead zone, zonal flow) (cf. Uribe et al. 2011, Flock et al. 2014)

単一リング/ギャップ (遷移円盤)

円盤散逸 (Photoevaporation, 円盤風)

ダスト成長 (内側で早い成長)

Outline

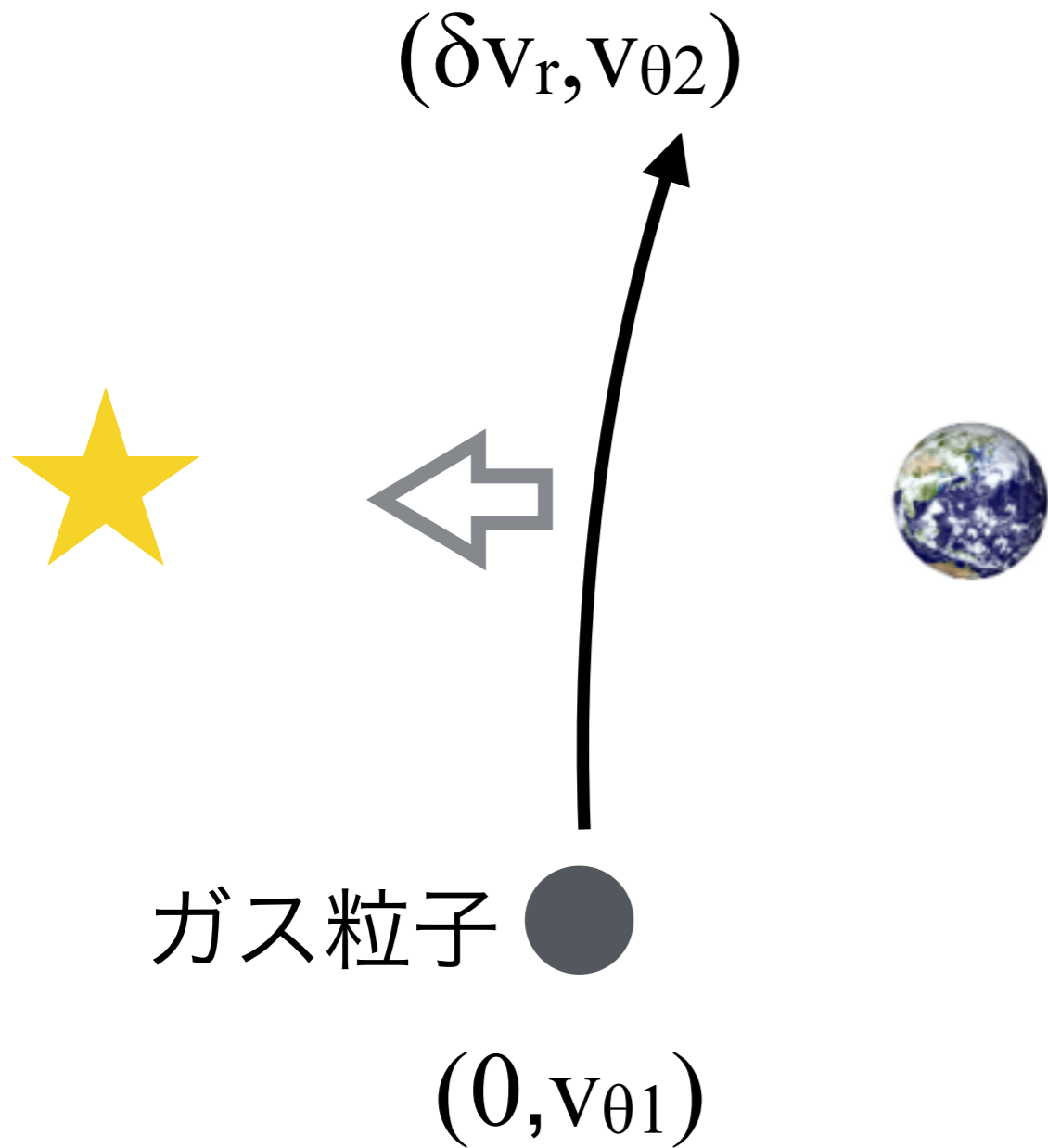
- ・ イントロ
- ・ 惑星によるギャップ構造形成
- ・ ダスト焼結によるリング構造形成
- ・ 永年重力不安定性によるリング構造形成
- ・ モデルの比較
- ・ まとめ

Outline

- ・ イントロ
- ・ 惑星によるギャップ構造形成
- ・ ダスト焼結によるリング構造形成
- ・ 永年重力不安定性によるリング構造形成
- ・ モデルの比較
- ・ まとめ

惑星によるギャップ構造形成

惑星と円盤ガスとの重力相互作用でギャップを形成



惑星がガスに与えるトルク
(Lin and Papaloizou 1979)

惑星重力 $\Rightarrow \delta v_r$

運動エネルギー保存

$$v_{\theta 2}^2 + \delta v_r^2 = v_{\theta 1}^2$$

\Rightarrow 回転速度の減少 $v_{\theta 2} < v_{\theta 1}$

惑星周囲にギャップ形成

トルク \propto

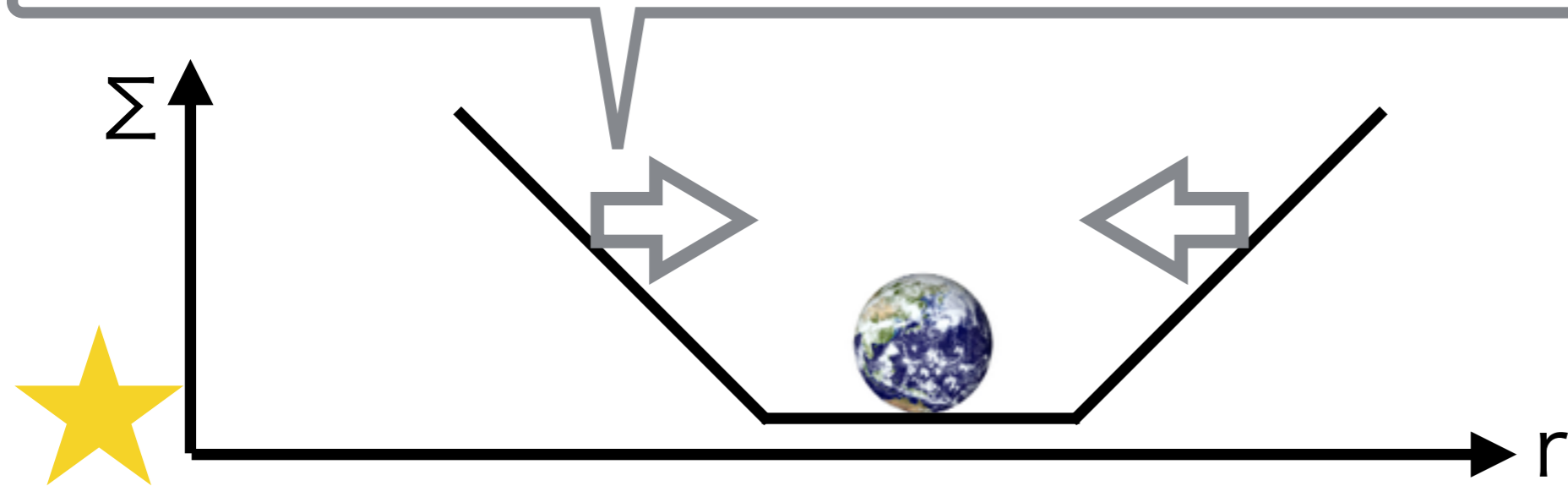
$$\left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 R_p^3 \Omega_p^2 \Sigma_p \left(\frac{R_p}{R - R_p}\right)^4$$

ギャップの構造

粘性との釣り合いで決定

粘性による正味のトルク $\propto -\frac{\partial}{\partial r} \left(\Sigma \nu r^2 \left| \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right| \right)$

密度勾配負 \Rightarrow 角運動量増加 \Rightarrow ギャップを埋める



深さ

$$\frac{M_p}{M_*} = 5 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{\Sigma_p / \Sigma_0} - 1 \right)^{1/2} \left(\frac{h_p}{0.1} \right)^{5/2} \left(\frac{\alpha}{10^{-3}} \right)^{1/2} .$$

幅

$$\frac{M_p}{M_*} = 2.1 \times 10^{-3} \left(\frac{\Delta_{\text{gap}}}{R_p} \right)^2 \left(\frac{h_p}{0.05 R_p} \right)^{3/2} \left(\frac{\alpha}{10^{-3}} \right)^{1/2} .$$

(Kanagawa et al. 15, 16)

観測との比較

	R_{in} (AU)	R_{out} (AU)	$\frac{\Delta_{\text{gap}}}{R_p}$	$\frac{n_p}{R_p}$	$M_p (M_J)$ (from the width)
10AU gap	7	16.5	0.81	0.05	1.4
30AU gap	28.5	36	0.23	0.07	0.2
80AU gap	70	94	0.29	0.1	0.5

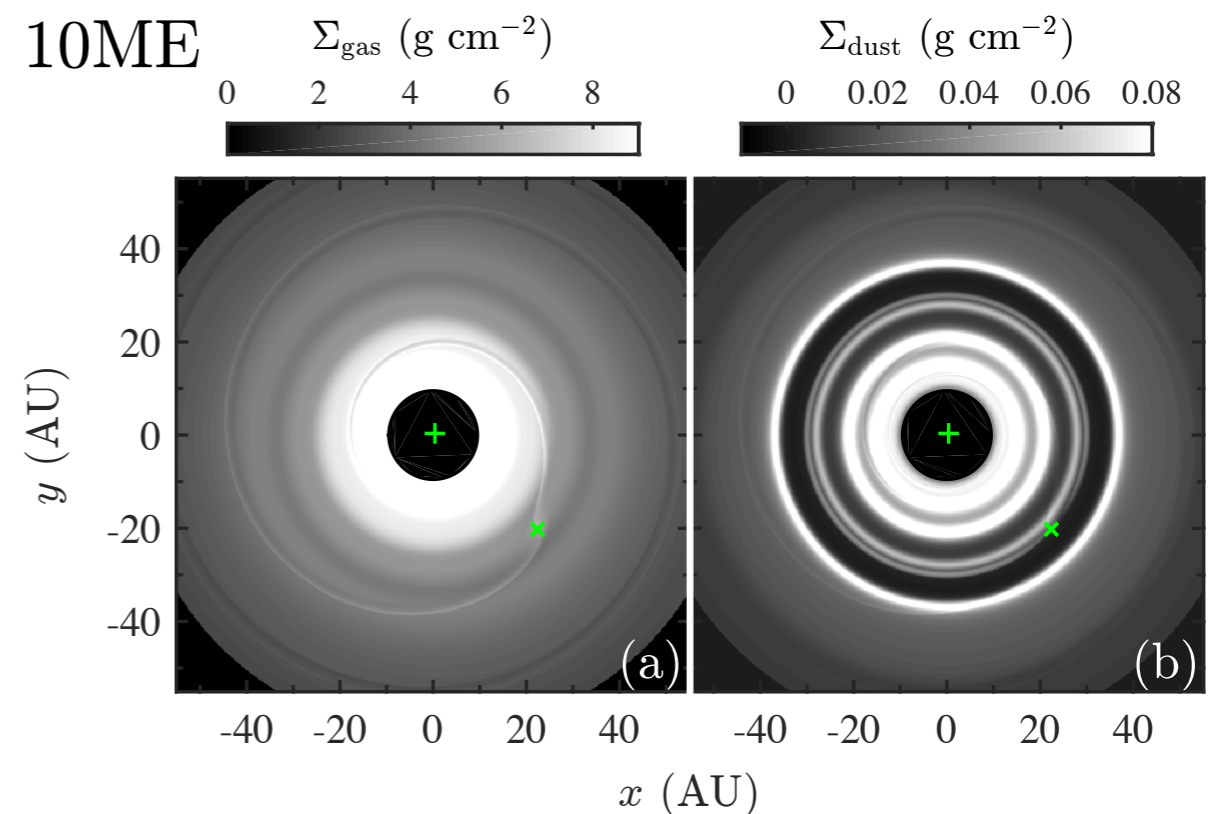
惑星の観測/惑星最大質量の制限からモデルを検証可能

惑星形成？

全てのギャップを惑星で説明？

一つの惑星で複数のリングを説明可能かもしれない

(Dong et al. 2017)



Outline

- ・ イントロ
- ・ 惑星によるギャップ構造形成
- ・ **ダスト焼結によるリング構造形成**
- ・ 永年重力不安定性によるリング構造形成
- ・ モデルの比較
- ・ まとめ

ダスト進化によるリング・ギャップ形成

観測で見えているのはダストの熱放射

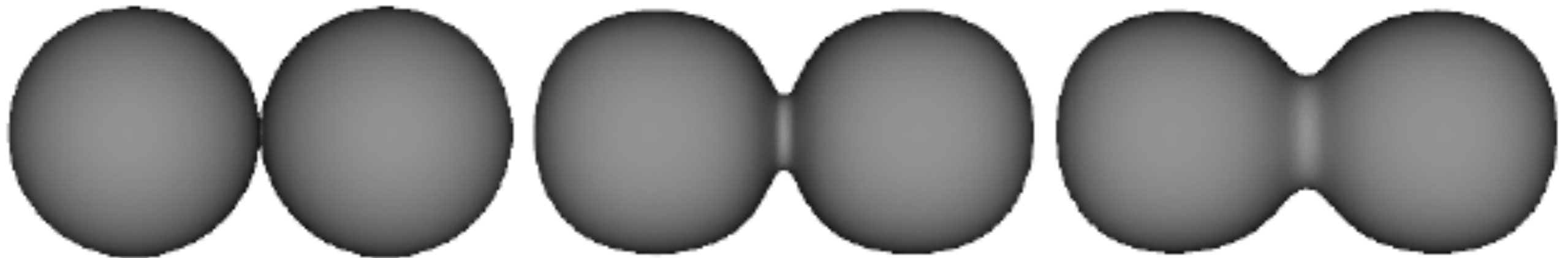
⇒ガスが滑らかな分布でも、ダスト放射に構造があれば良い

ダストの焼結による構造形成 (Okuzumi et al. 2015)

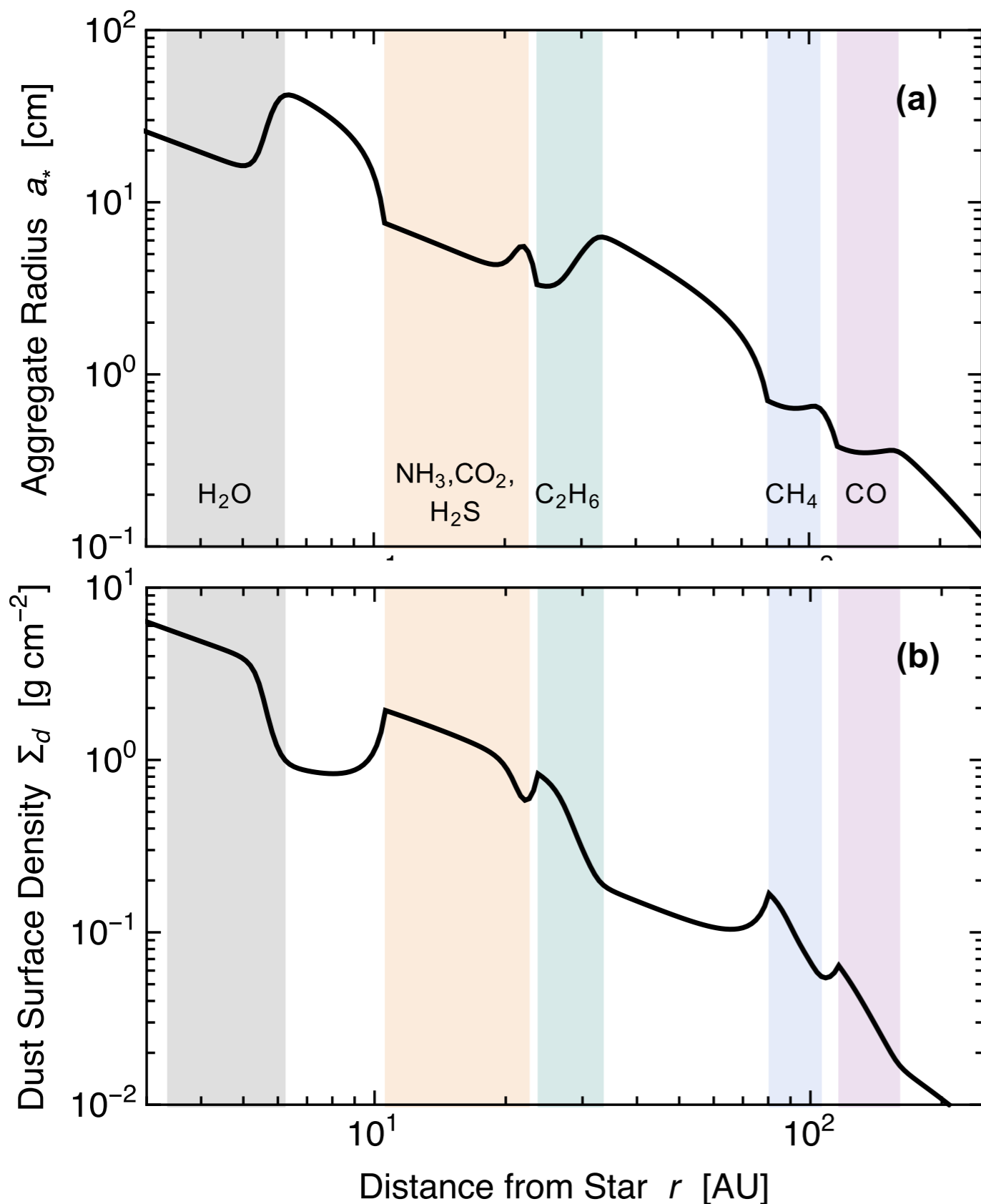
円盤温度 \leq 各分子の昇華温度で焼結が起こる

⇒モノマーの結合部が太くなる

⇒衝突時にエネルギーを逃がしにくくなり、**壊れやすくなる**



ダスト焼結によるリング構造形成



$T \lesssim$ 昇華温度でダスト破壊

⇒ drift 速度減少

⇒ 面密度上昇

⇒ リング構造

焼結する分子の種類で
多重リング構造を形成

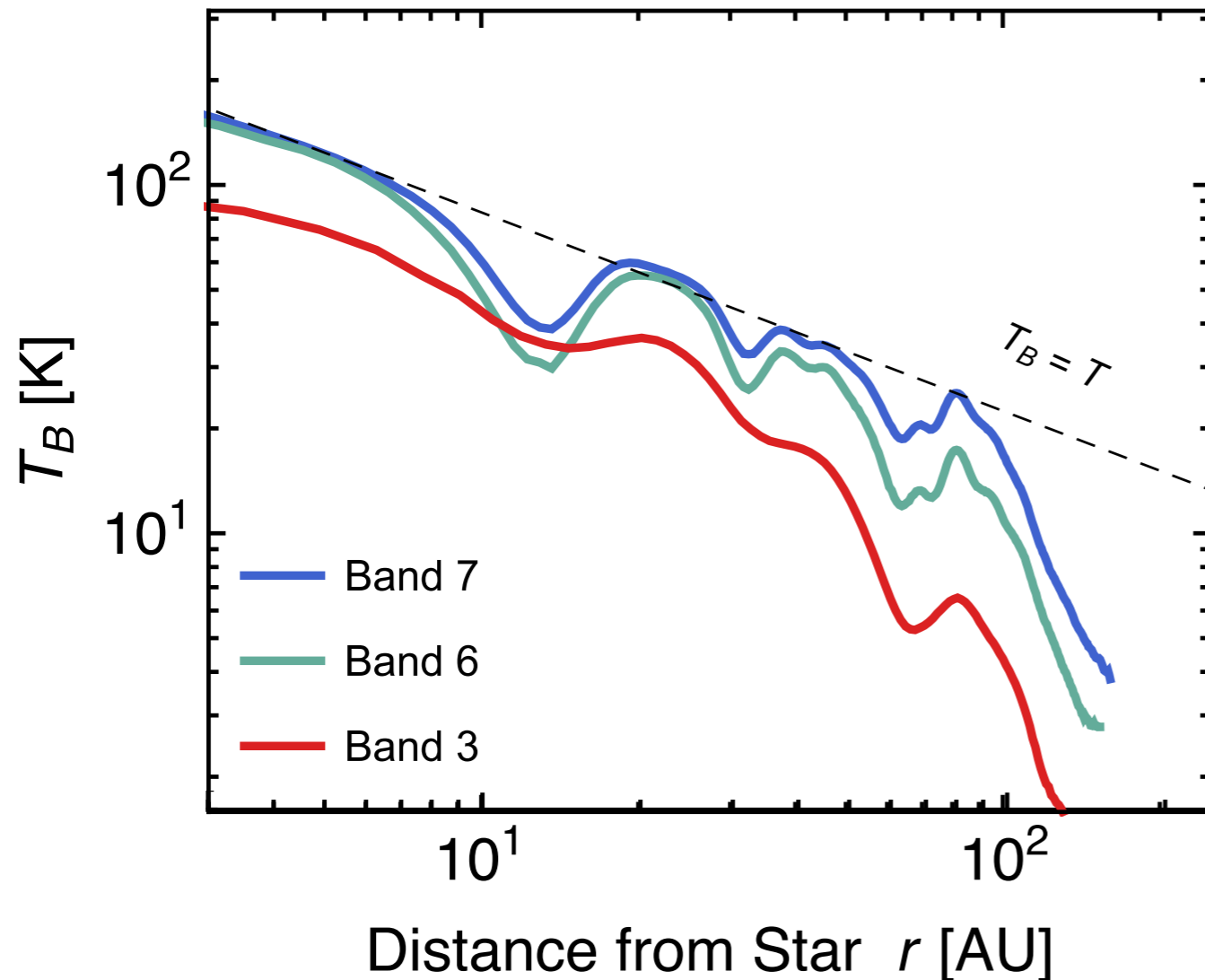
リングの位置・幅は
温度で決まる。

観測との比較

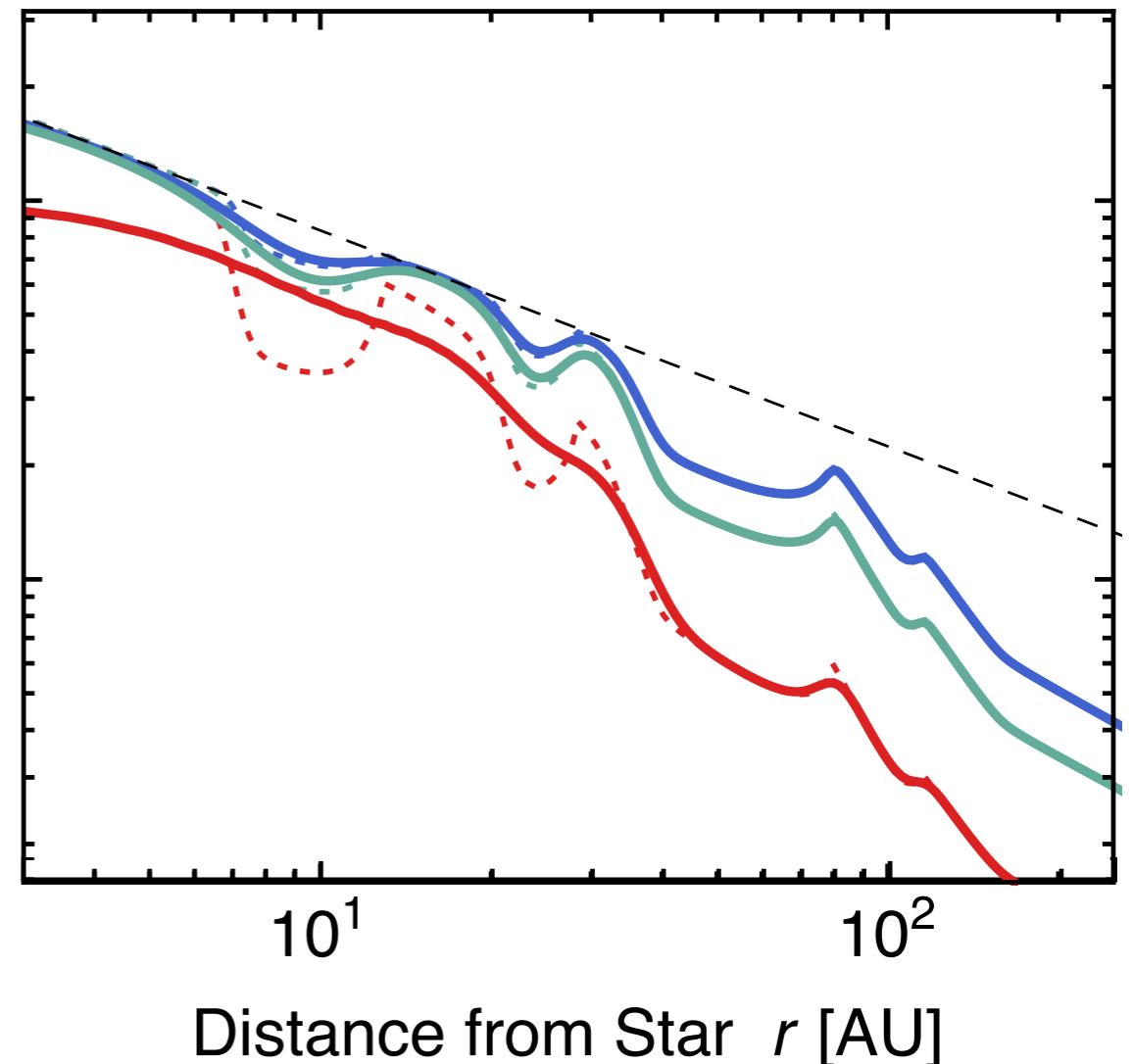
$t \sim 0.26\text{Myr}$ で観測を再現するようなリング構造が形成
その後、ダスト落下と共にリング構造も消える

⇒リング構造は若い円盤の特徴

ALMA Observation



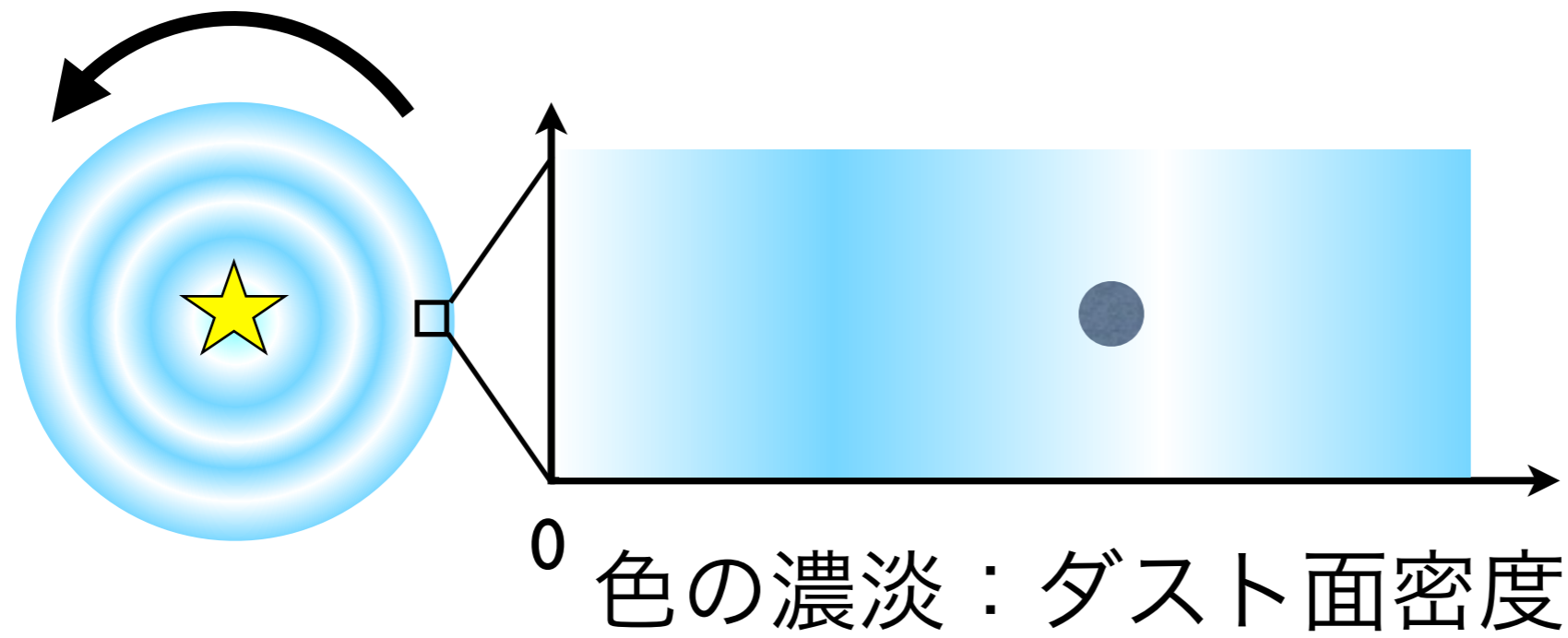
Sa0- tuned



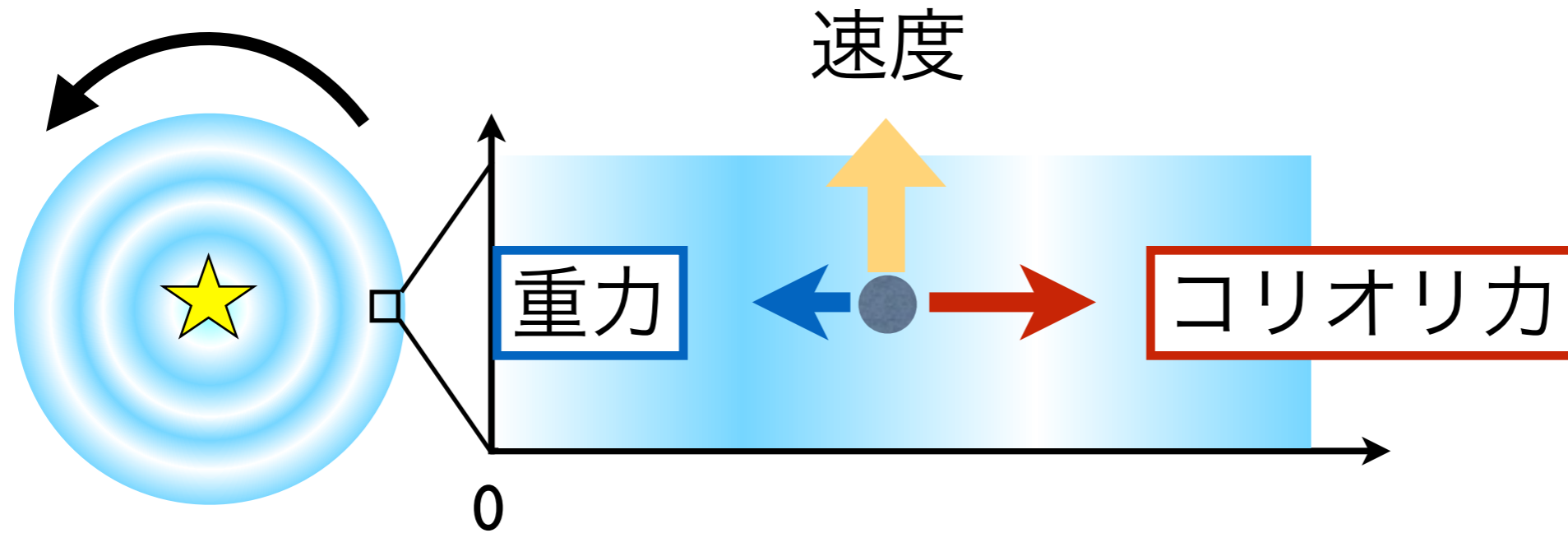
Outline

- ・ イントロ
- ・ 惑星によるギャップ構造形成
- ・ ダスト焼結によるリング構造形成
- ・ 永年重力不安定性によるリング構造形成
- ・ モデルの比較
- ・ まとめ

Secular GIのメカニズム



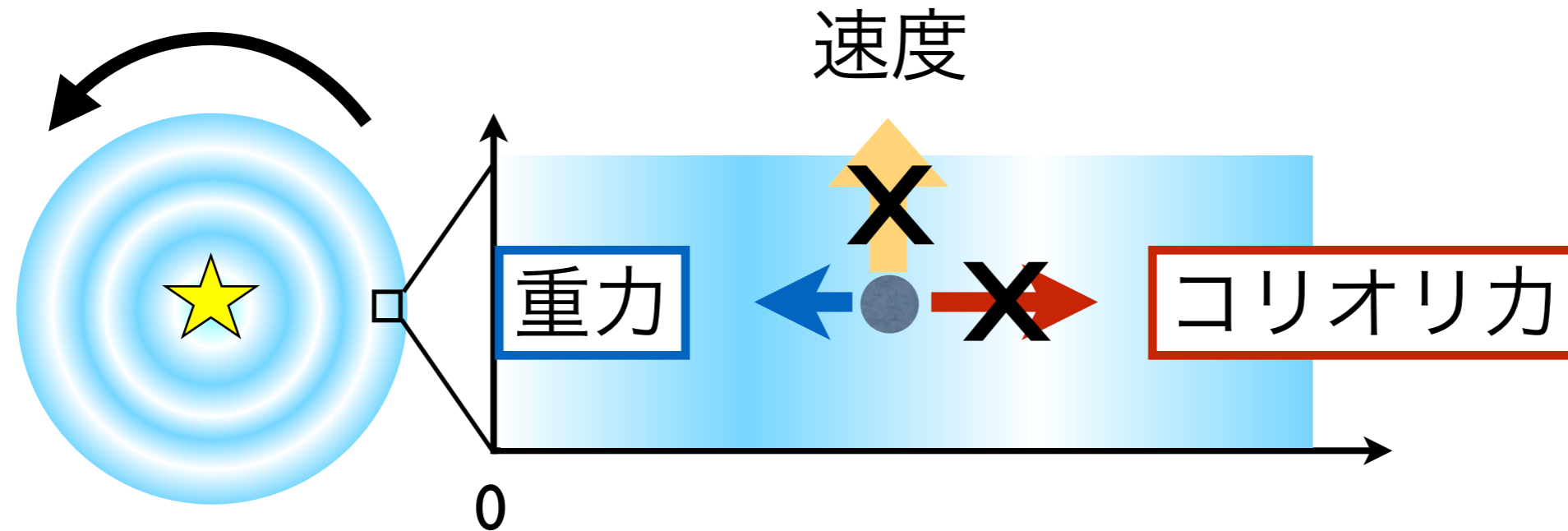
Secular GIのメカニズム



色の濃淡：ダスト面密度

長波長の揺らぎはコリオリ力で安定化される。

Secular GIのメカニズム



色の濃淡：ダスト面密度

長波長の揺らぎはコリオリ力で安定化される。

ガス・ダスト摩擦でダストの速度揺らぎが減少

⇒長波長の揺らぎが不安定化

→Secular GIが成長

永年重力不安定性によるリング形成

Takahashi and Inutsuka 2014

- ◆ 永年重力不安定性 (Secular GI)
ダスト-ガスの摩擦が引き起こす重力不安定性
- ◆ 成長時間が長い⇒リングとして観測可能
- ◆ 半径 **100AU** に **13AU** 間隔の **リング構造** が形成
- ◆ 「**ダスト(多)**」 と 「**乱流(弱)**」 が必要

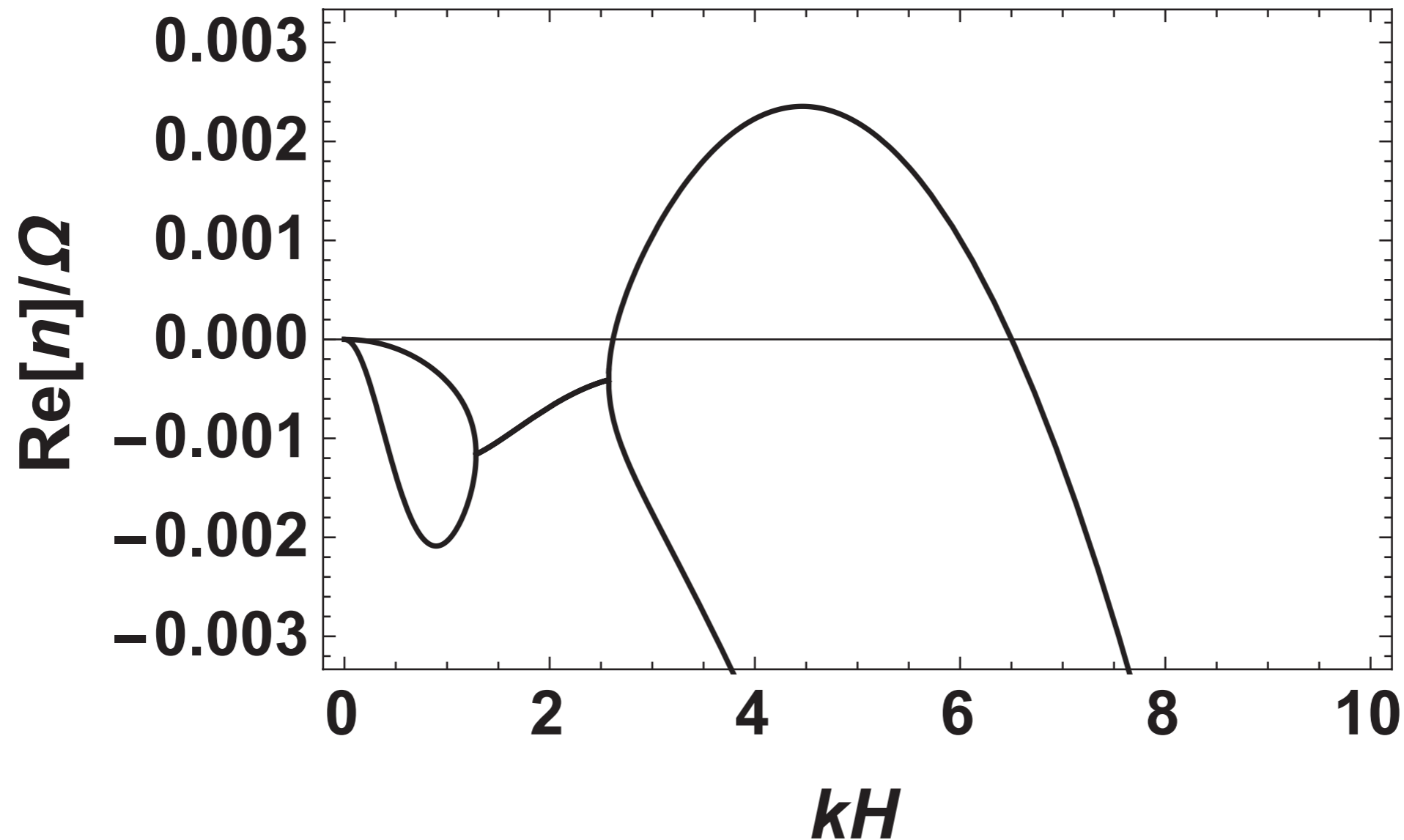
リング構造が **ダスト/ガス > 0.01** と

弱い乱流 ($\alpha \lesssim 10^{-3}$) を表す指標になる

Secular GI によるリング構造形成シナリオと整合的

実際に HL Tau は Secular GI に対して不安定か？

分散関係 @ 100AU



最大成長波長11AU

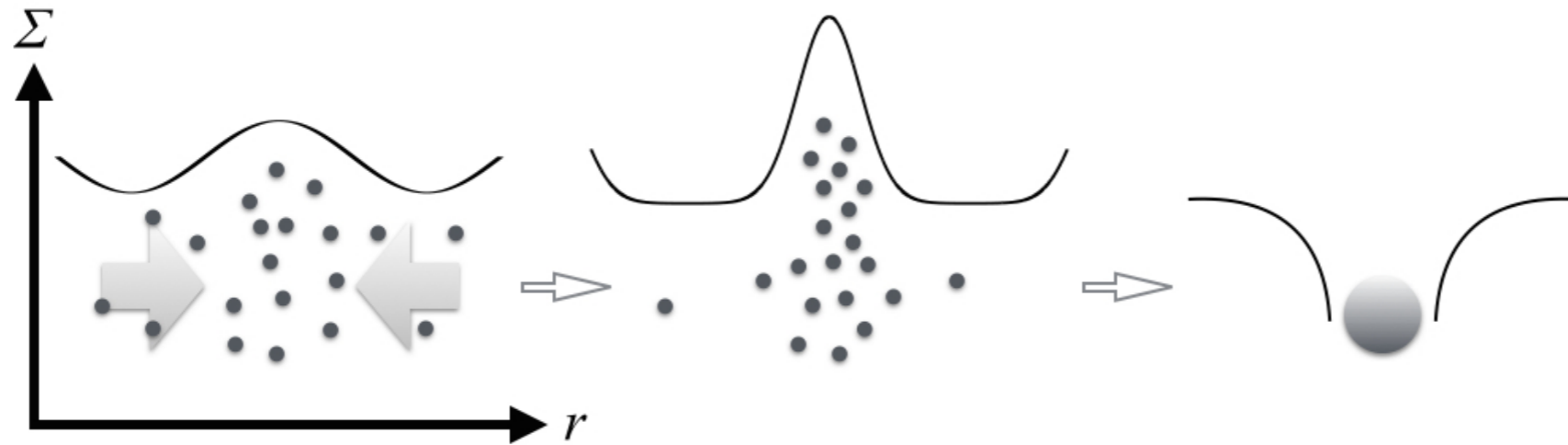
≈ 観測されたリング間隔

成長のタイムスケール 9×10^4 年

≲ HL Tau の年齢

不安定モードの成長でリング構造形成を説明可能

HL-Tau での惑星形成シナリオ



Secular GI の成長 \Rightarrow ダスト濃縮 \Rightarrow 微惑星、惑星形成

外側の10auリング

内側2本の深いギャップ

典型的にはリング間隔 $\sim 0.1r$

(半径と同程度のリング形成は困難、リングのradial drift?)

Secular GI で予想されるダスト分布は？

\Rightarrow **大局的非線形計算が必要** (次の講演)

ダスト成長・サイズ分布との関係？

モデルの比較

	惑星	焼結	Secular GI
ガス構造	有	無	ほぼ無
温度分布	ギャップ構造	リング位置/幅	安定条件
リングの ダストサイズ	大	小	大
リング間隔	惑星の軌道	温度分布	不安定波長
得意な年齢	老	若	若
惑星形成	結果	—	原因

モデルの検証/複数天体を説明可能か？

まとめ

- ・ ALMAによるリング・ギャップ構造の観測により、その形成メカニズムについての研究が注目されている。
- ・ 形成メカニズムの解明から、円盤進化・惑星形成の理解が深まることが期待される。
- ・ 形成メカニズムとして、惑星によるギャップ、ダスト焼結、Secular GI等様々な理論が提唱されているが、決着はついていない。
- ・ 各モデル毎に、予想するガス分布などに違いがある。各モデルの研究と観測の進展からモデルの制限が可能か？
- ・ “一般的な”円盤進化・惑星形成の理解という観点からは、複数天体を一貫して説明可能なモデルを探すことも重要