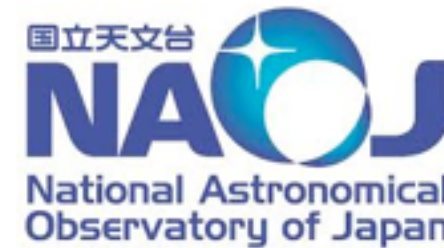




KOGAKUIN
UNIVERSITY



星・惑星形成の命運を握る 原始惑星系円盤の研究の現状

高橋 実道

(工学院大学/国立天文台)

自己紹介

2015年	京都大学	博士課程修了
2015年-2017年	東北大学	
2017年-	工学院大学/国立天文台	

夏の学校歴

2010年-2013年	4回参加
2012年	ポスター賞 5位入賞

研究対象

星・惑星形成 原始惑星系円盤
他の天体周りの円盤も少し（初代星、BH…）
主に理論的研究（観測にも手を出し始めた）

Outline

- イントロ 原始惑星系円盤の形成・進化の概要
- 円盤形成・進化の物理過程
- 現在の課題 円盤の詳細構造形成の理解
- 将来の展望、まとめ

Outline

- イントロ 原始惑星系円盤の形成・進化の概要
- 円盤形成・進化の物理過程
- 現在の課題 円盤の詳細構造形成の理解
- 将来の展望、まとめ

原始惑星系円盤

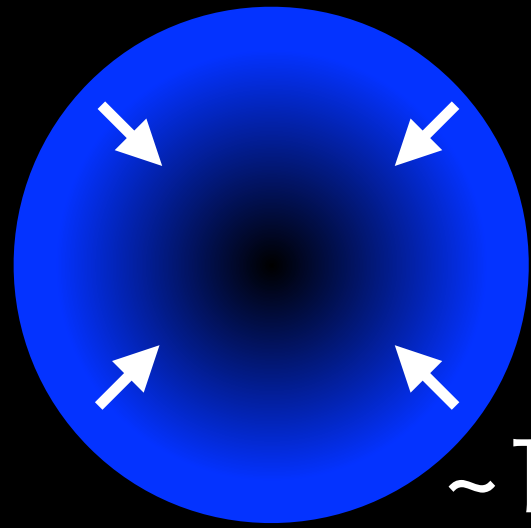
星形成の際に原始星周囲に形成、質量 $\sim 0.01 M_{\text{sun}}$

星・惑星形成に対して重要な役割を果たす。

星形成：星のガスは円盤を通して降着

惑星形成：円盤中で惑星が形成

星・原始惑星系円盤の形成・進化

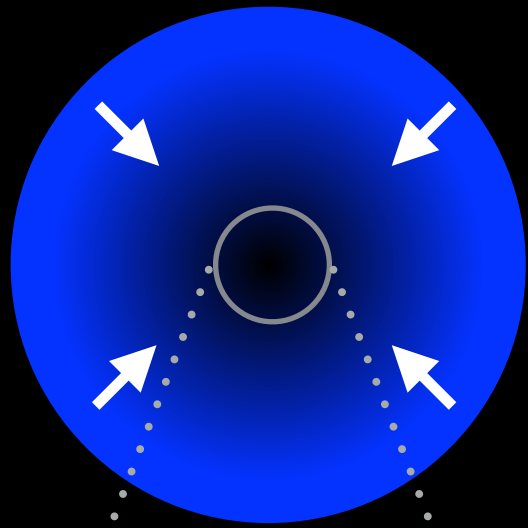


分子雲コア（重いガス塊）が重力崩壊
→ 星・円盤形成が開始

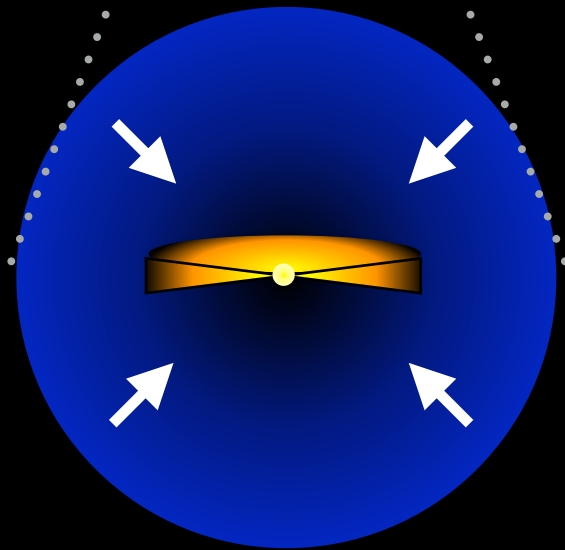
$\sim 1 M_{\text{sun}}$

$\sim 10^4 \text{ au}$

星・原始惑星系円盤の形成・進化



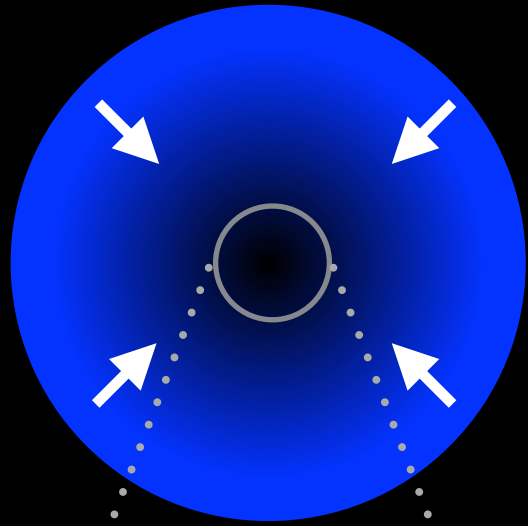
分子雲コア（重いガス塊）が重力崩壊
→星・円盤形成が開始



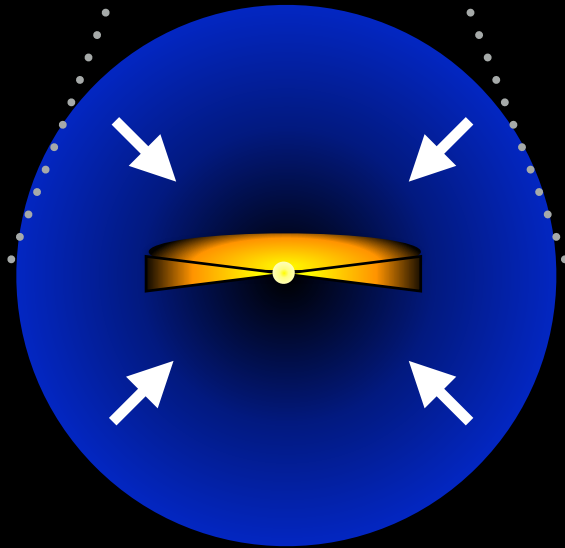
中心に原始星、
周囲に原始惑星系円盤が形成
ガスは円盤を通して星に落下

←→ $\sim 10^2 \text{ au}$

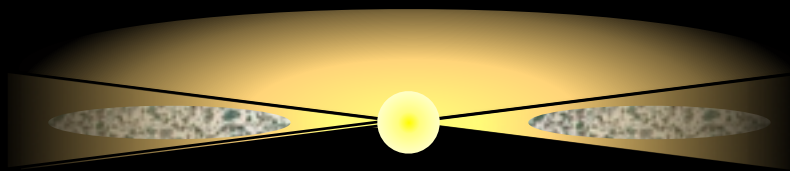
星・原始惑星系円盤の形成・進化



分子雲コア（重いガス塊）が重力崩壊
→星・円盤形成が開始

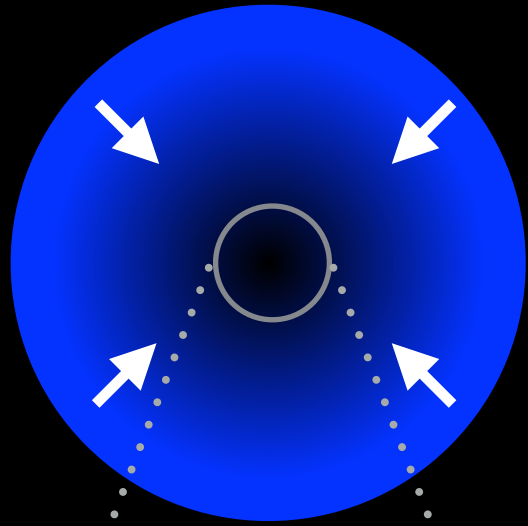


中心に原始星、
周囲に原始惑星系円盤が形成
ガスは円盤を通して星に落下

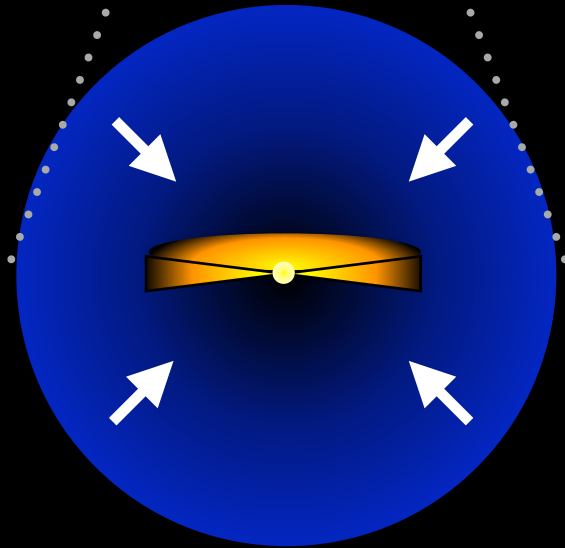


分子雲コアの全てのガスが降着
円盤形成が終了

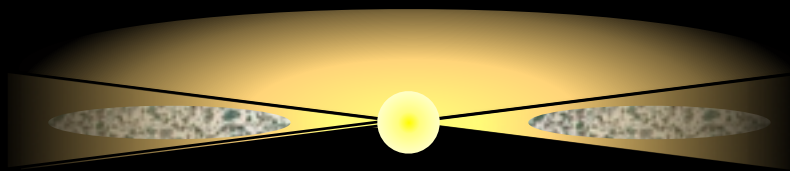
星・原始惑星系円盤の形成・進化



分子雲コア（重いガス塊）が重力崩壊
→星・円盤形成が開始



中心に原始星、
周囲に原始惑星系円盤が形成
ガスは円盤を通して星に落下



分子雲コアの全てのガスが降着
円盤形成が終了



円盤中で惑星が形成・円盤は散逸

Outline

- イントロ 原始惑星系円盤の形成・進化の概要
- 円盤形成・進化の物理過程
- 現在の課題 円盤の詳細構造形成の理解
- 将来の展望、まとめ

分子雲コアの重力崩壊の特徴的スケール

ここでは簡単のため球対称の場合を考える（磁場・回転無視）

温度 T , 密度 ρ 一定

自由落下時間：崩壊したガスが中心に達する時間

$$t_{\text{ff}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}}$$

ジーンズ長：ガスが重力崩壊するために必要なサイズ

$$\lambda_J \sim c_s t_{\text{ff}} \quad L > \lambda_J \text{で重力崩壊} \quad (t_{\text{ff}} < L/c_s)$$

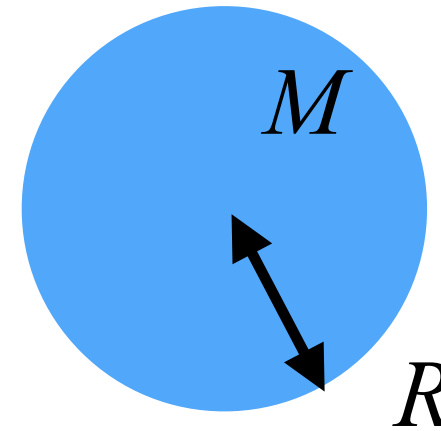
ジーンズ質量 $M_J \sim \rho \lambda_J^3$

$$\Rightarrow \text{質量降着率} \quad \dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{\text{ff}}} = \frac{c_s^3}{G} \sim 10^{-6} \text{ Msun/yr}$$

重力崩壊はいつまで続くか？

$$\text{圧力勾配力} \sim P/R \propto \rho^\gamma/R \propto R^{-3\gamma-1}$$

$$\text{重力} \sim GM\rho/R^2 \propto R^{-5}$$



分子雲コア
質量M, 半径R

$$P \propto \rho^\gamma \quad \rho \propto M r^{-3}$$

重力崩壊でRが小さくなる時、重力・圧力は増加

$\gamma < 4/3 \rightarrow$ 重力が圧力より増加率大

$\gamma > 4/3 \rightarrow$ 圧力が重力より増加率大

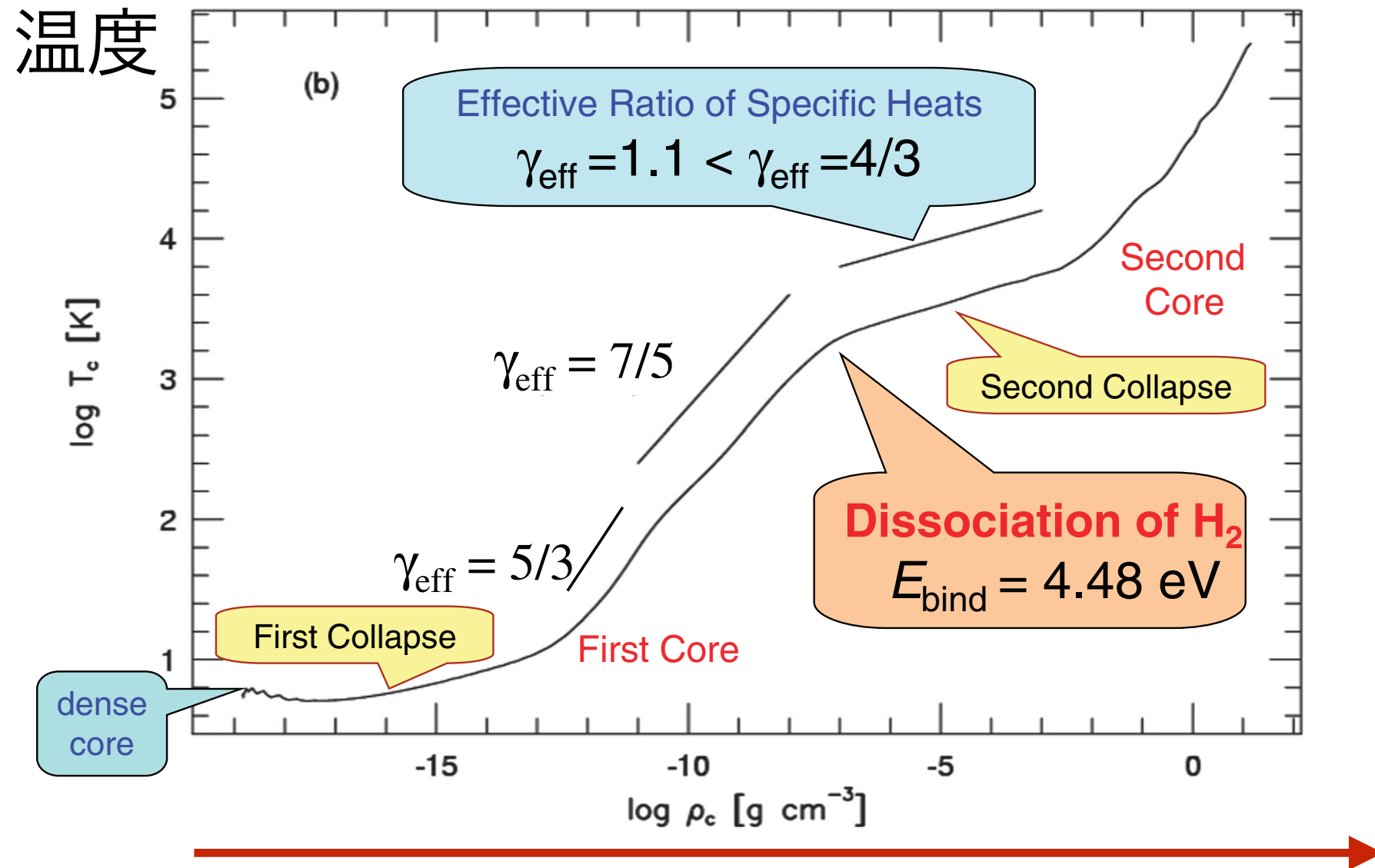
分子雲コアは $T \sim 10\text{K}$ でほぼ等温 $\gamma \sim 1$

$\Rightarrow$ 重力崩壊が続く

等温進化が終わった時に崩壊が止まる。

原始星形成過程の1次元計算

分子雲コアの重力崩壊によりFirst Coreを経て原始星が形成
(Larson 1969, Masunaga et al. 1998, Masunaga Inutsuka 2000)



Inutsuka 2012

中心密度
(時間発展)

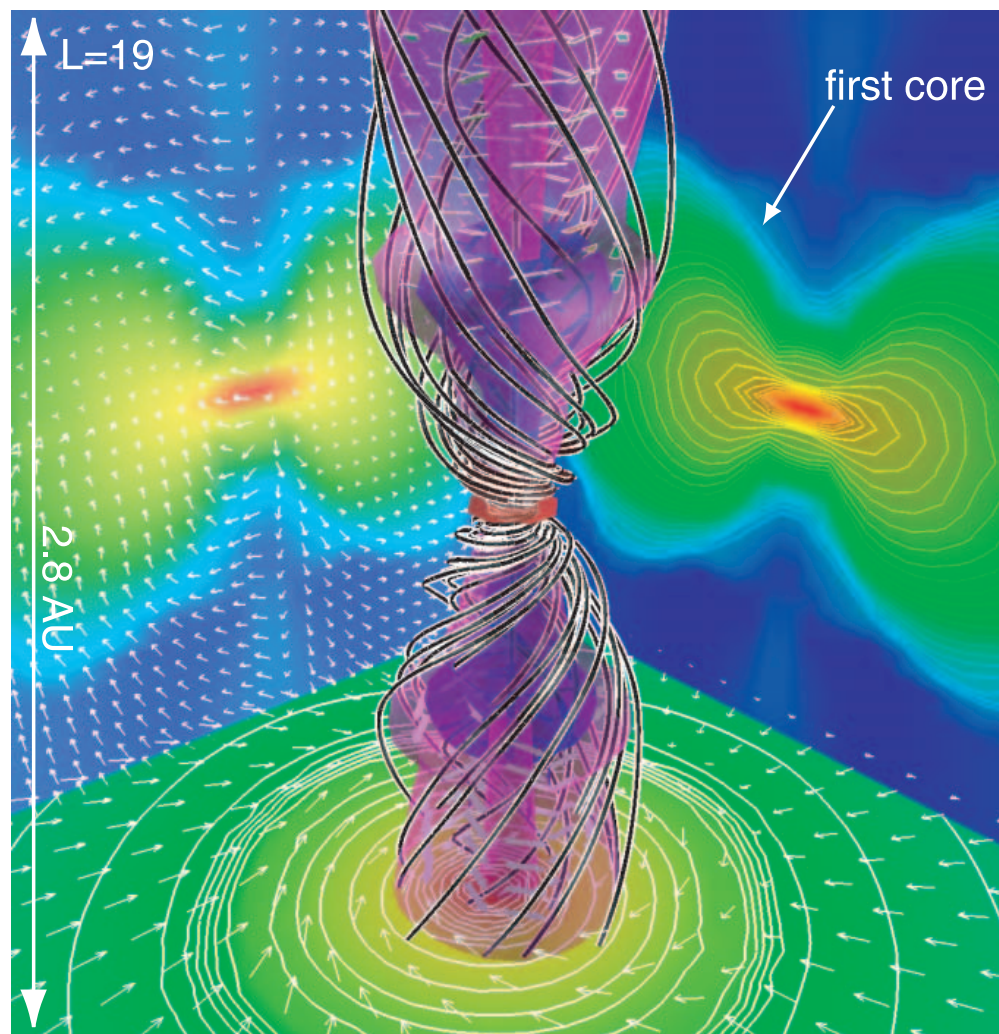
形成直後の質量 : First Core $\sim 10^{-2}$ Msun
原始星 $\sim 10^{-3}$ Msun

星形成の3次元シミュレーション

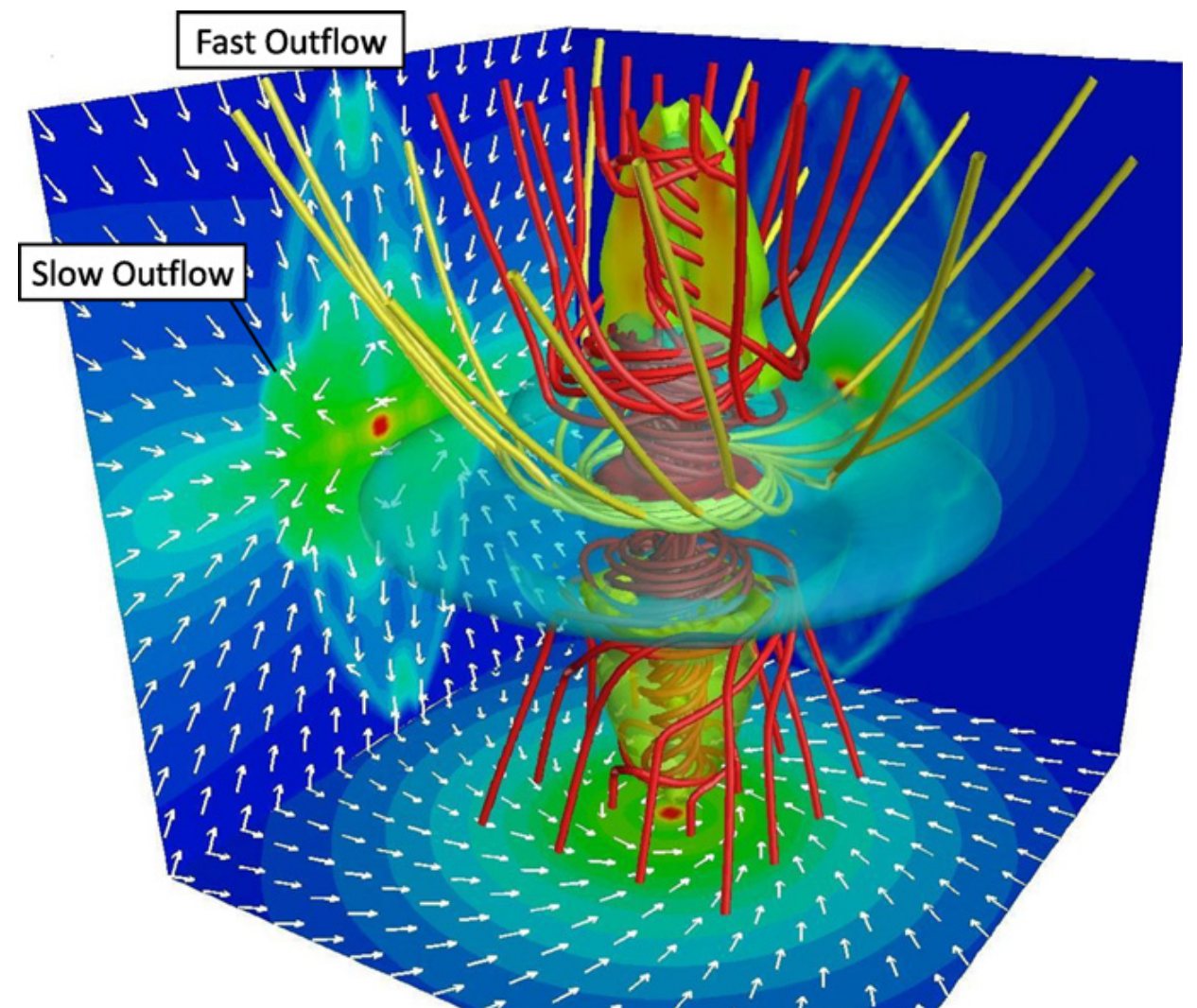
回転・磁場を含めた3次元シミュレーション

原始星形成後、First Core から円盤形成

磁場によって Outflow, Jet が形成



Machida et al. 2008



Tomida et al. 2010

原始惑星系円盤の形成・進化

分子雲コアのガスは一般に**角運動量**を持つ

(Goodman et al. 1993 Caselli et al. 2002)

重力崩壊したガスは遠心力半径(重力＝遠心力)で円盤に降着

分子雲コアのガスのほとんどは直接星に落ちず

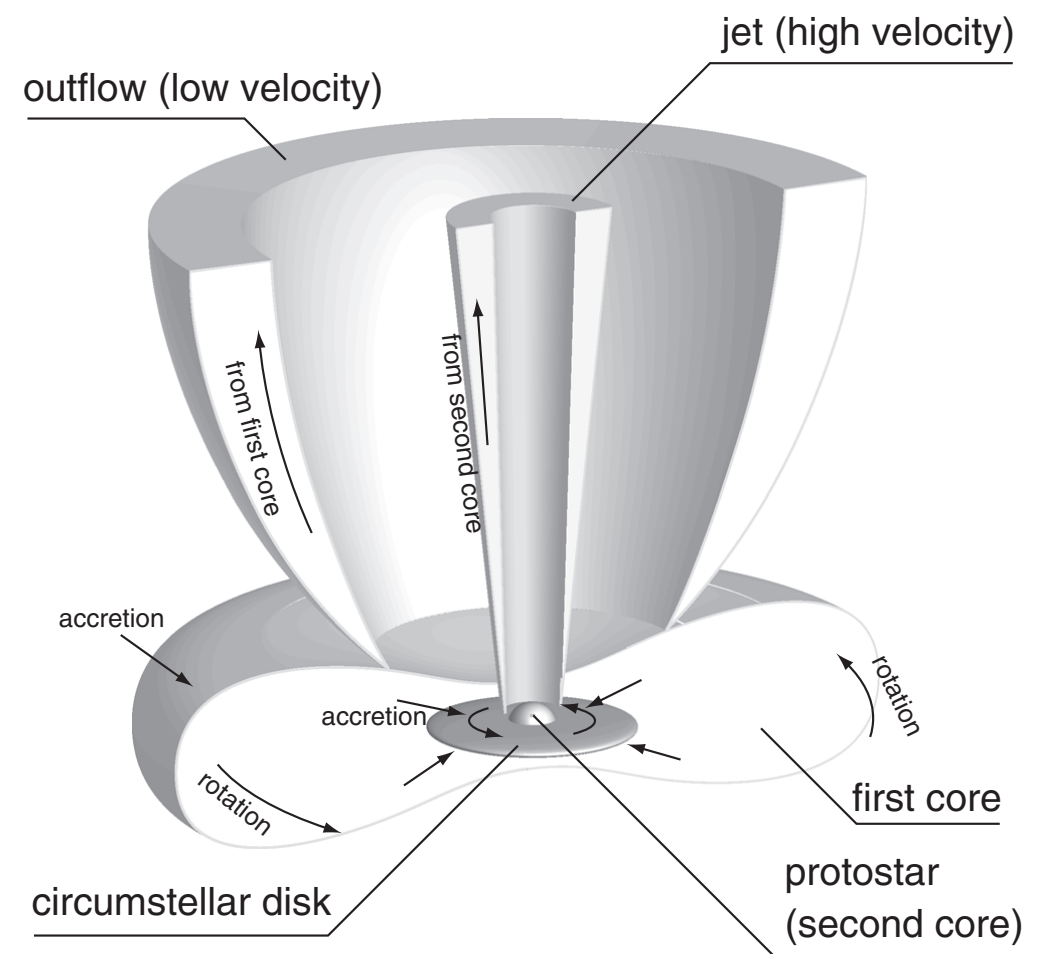
円盤を通して星に降着

円盤は**角運動量輸送**により拡散

内側のガスは角運動量を失う

→星に降着

外側のガスは角運動量を得て広がる



Inutuka 2012

円盤中の角運動量輸送：重力不安定性

Toomre's Q parameter

回転、圧力による安定化

$$Q = \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma}$$

が小さいほど不安定

自己重力による不安定化

c_s : 音速

Ω : 回転角速度

Σ : 面密度

若い円盤は Σ が大きく不安定

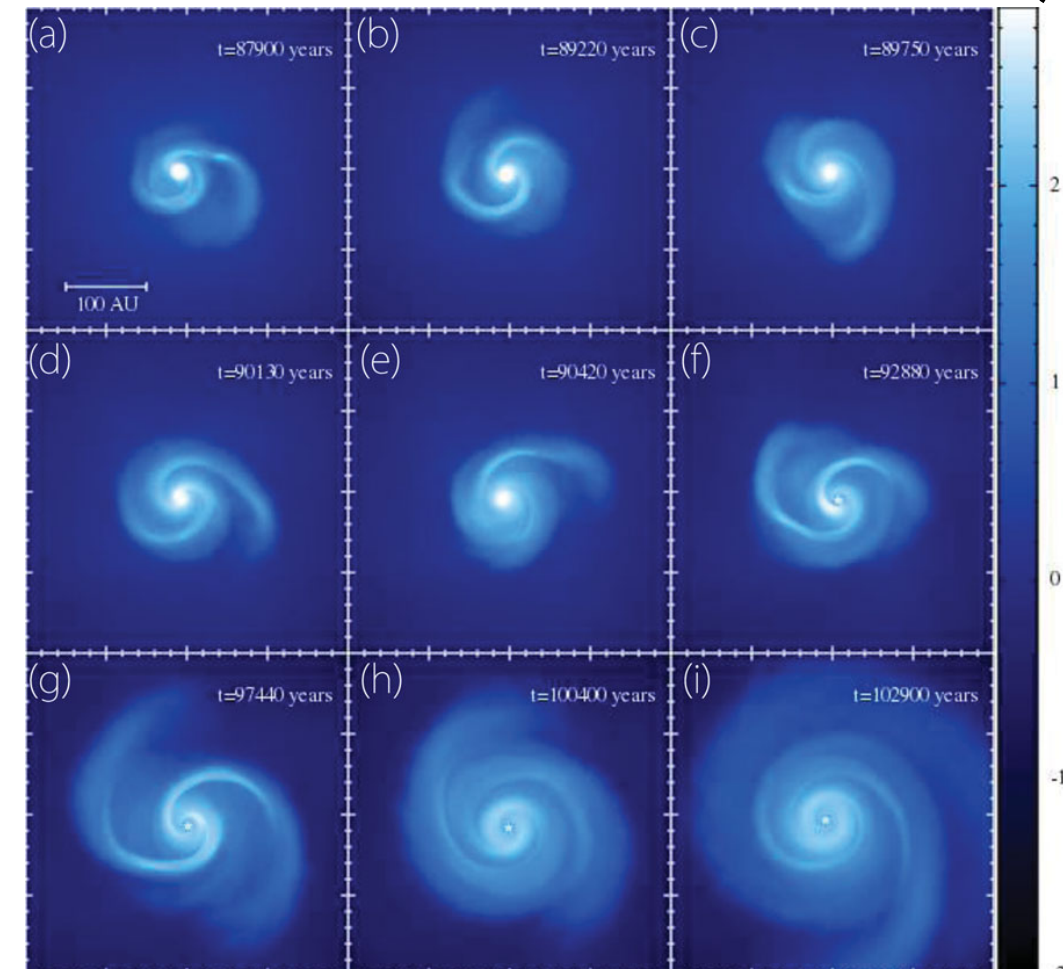
$Q > 2$: 安定

$1 < Q < 2$: 渦状腕形成

→ 非軸対称な重力による角運動量輸送

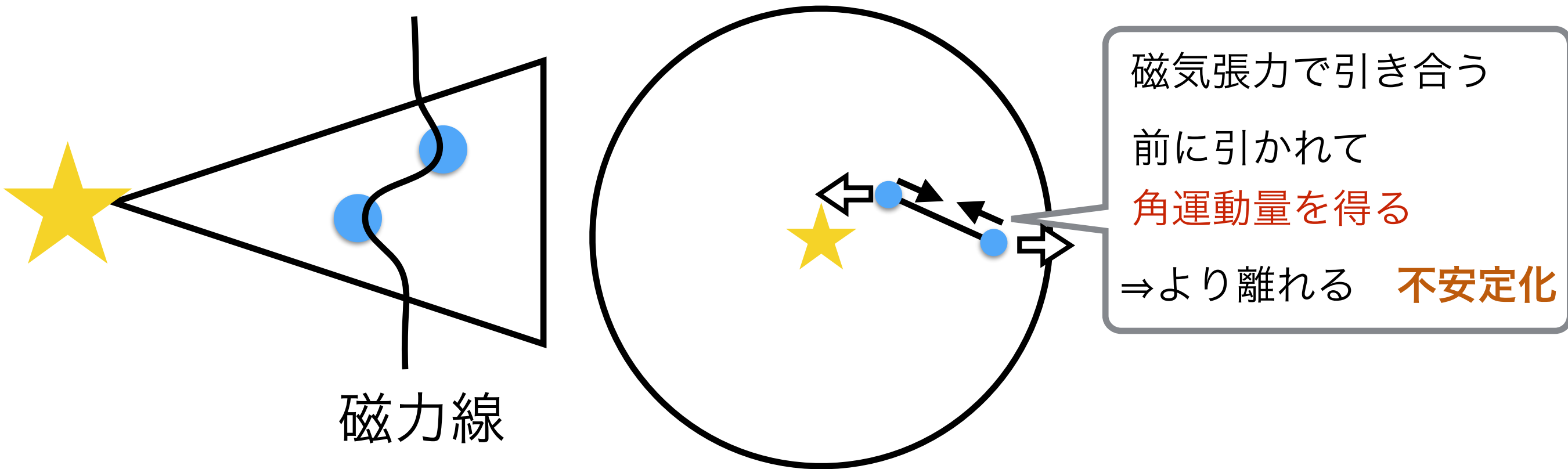
$Q < 1$: 分裂

(Tsukamoto Takahashi et al. 2015)

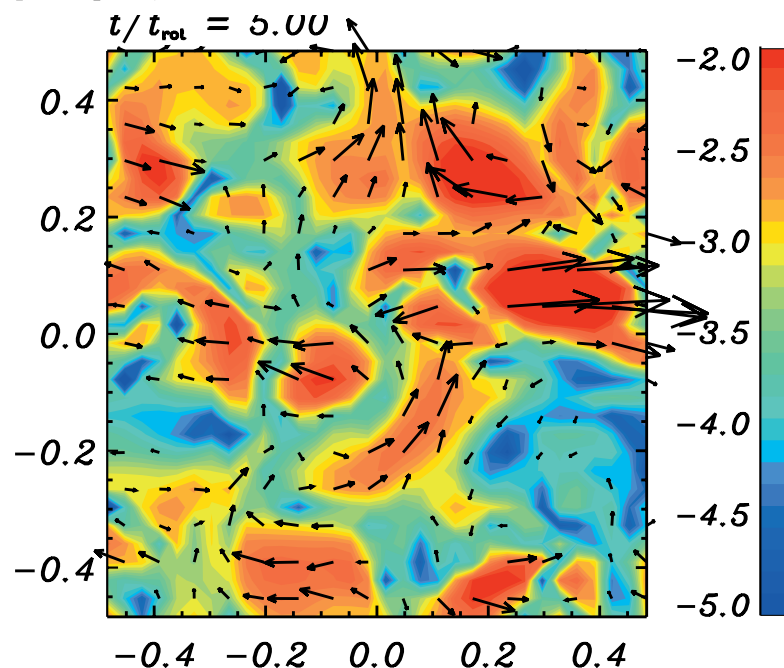


円盤中の角運動量輸送：MRI

磁気回転不安定性 (MRI) (Bulbus and Hawley 1991)



最終的に乱流状態 ⇒ 乱流粘性による角運動量輸送



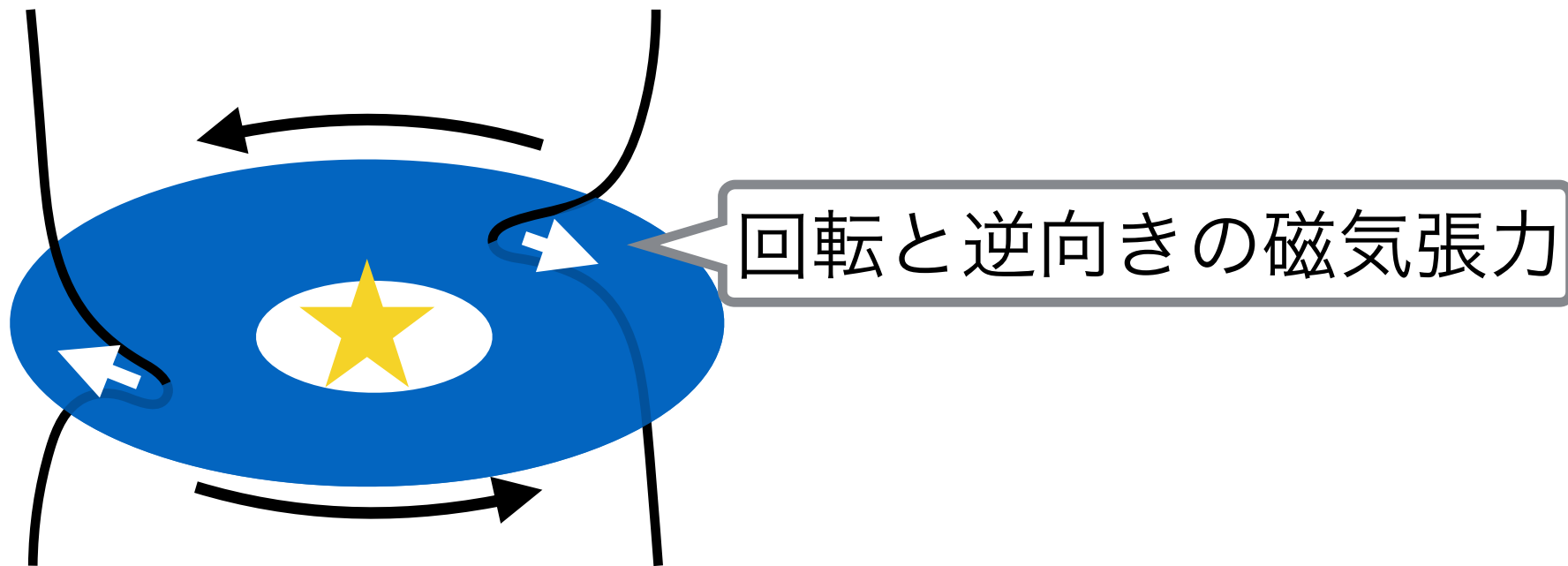
非理想磁気流体力学の効果を考慮すると
安定化される可能性

(cf. Bai Stone 2013, Gressel et al 2015)

(Sano et al. 2004)

円盤中の角運動量輸送：磁気制動

円盤が磁場を巻き込む⇒角運動量を上空に輸送



上空のガス：降着中の分子雲コア or 磁気駆動円盤風のガス

初期の円盤形成過程

若い円盤の半径、質量
を決める

cf. Li et al. 2011

Machida et al. 2011

円盤形成後の進化過程

MRIが安定化された場合
の角運動量輸送として有望

cf. Suzuki et al. 2010

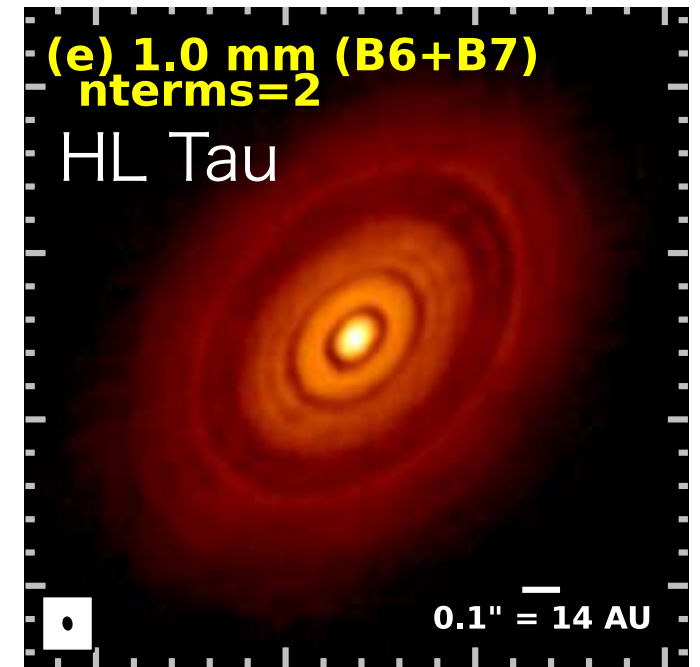
Bai 2013

円盤中のダストの運動

円盤中のダスト役割

- ＊惑星形成の材料

- ＊近年の詳細な観測の放射源
(ダスト熱輻射)



ALMA partnership et al. 2015

ダストの運動はガスとの**摩擦**が重要

小さなダストは摩擦によりガスと共に運動

大きくなるとガスとは別に運動

円盤乱流⇒ダストの衝突合体・破壊

(cf. Takeuchi and Lin 2005, Chiang and Youdin 2010)

ダストの中心星落下

(cf. Nakagawa et al. 1986)

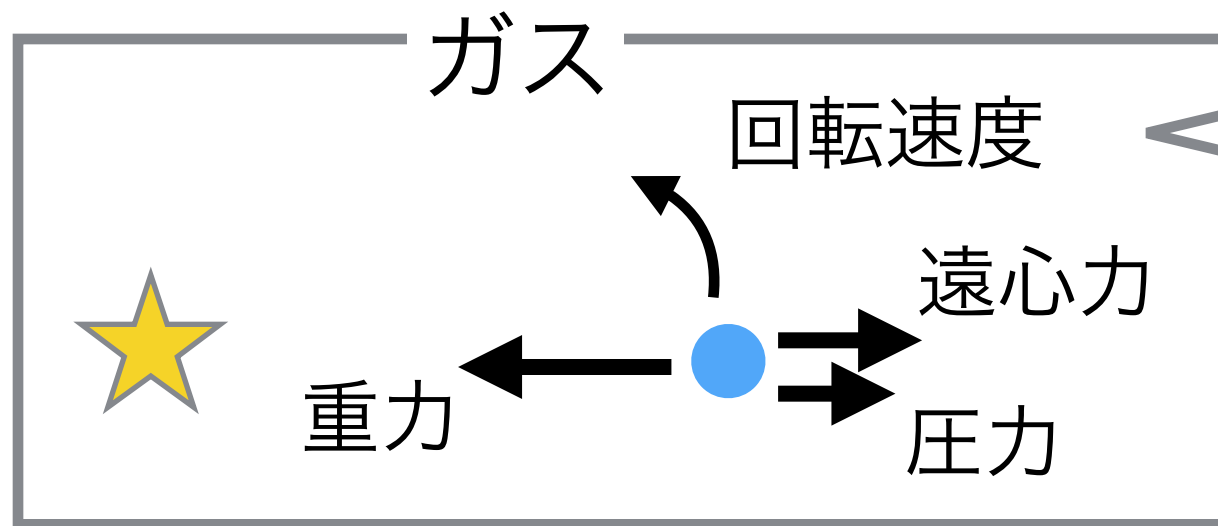
等、惑星形成に影響大

円盤中のダストの落下問題

ガスとダストの回転速度は異なる

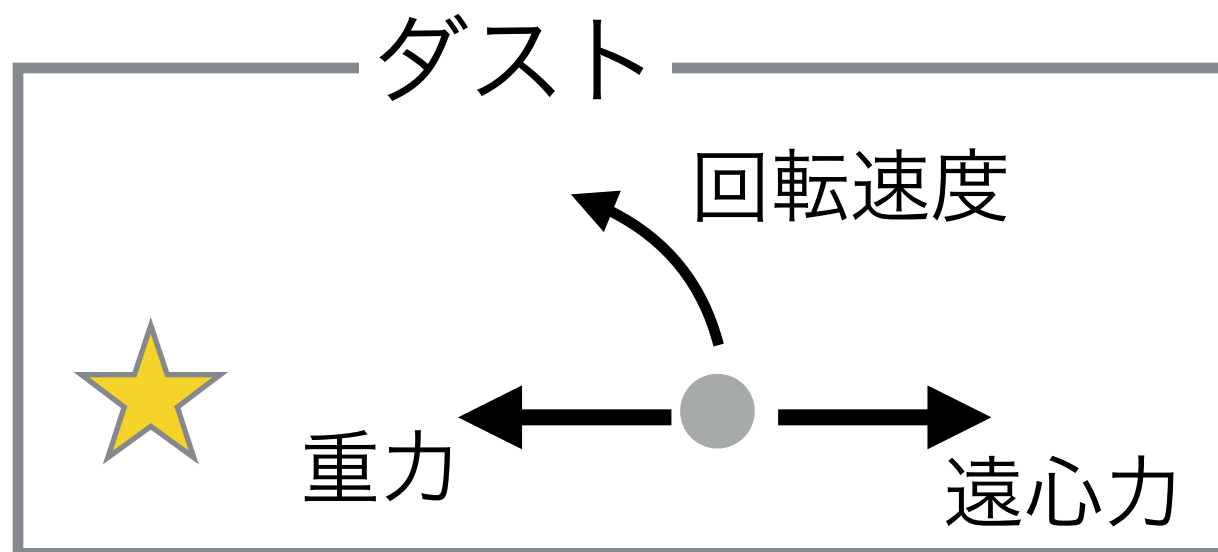
ダスト：(重力) = (遠心力)

ガス：(重力) = (遠心力) + (圧力)



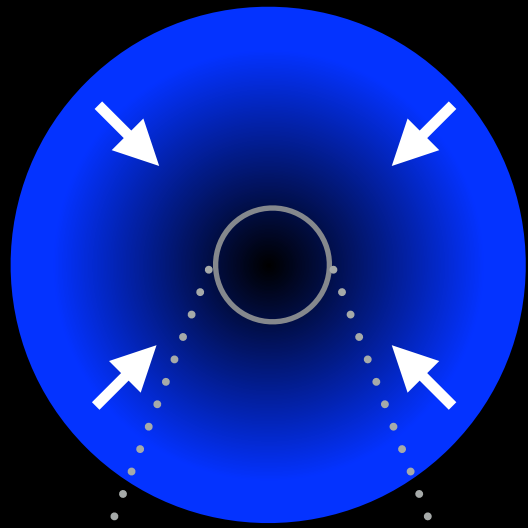
$$V_{\text{rot,gas}} < V_{\text{rot,dust}}$$

ダストは向かい風を受ける
→角運動量を失い内側へ落下



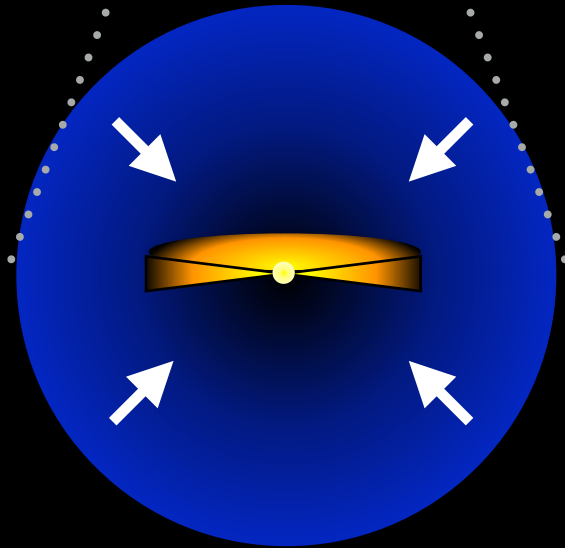
ダストの落下は惑星形成の課題
円盤の圧力構造 (温度・密度構造)
の理解が不可欠

原始惑星系円盤の形成・進化過程



分子雲コアが重力崩壊

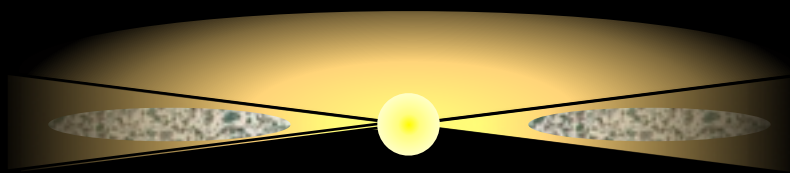
降着率 $\sim c_s^3/G \sim 10^{-6} M_{\text{sun}}/\text{yr}$



中心に星、円盤が形成

磁気制動・自己重力不安定性

で角運動量輸送



分子雲コアの全てのガスが降着

MRI or 円盤風の磁気制動で進化

円盤中のダスト進化→惑星形成



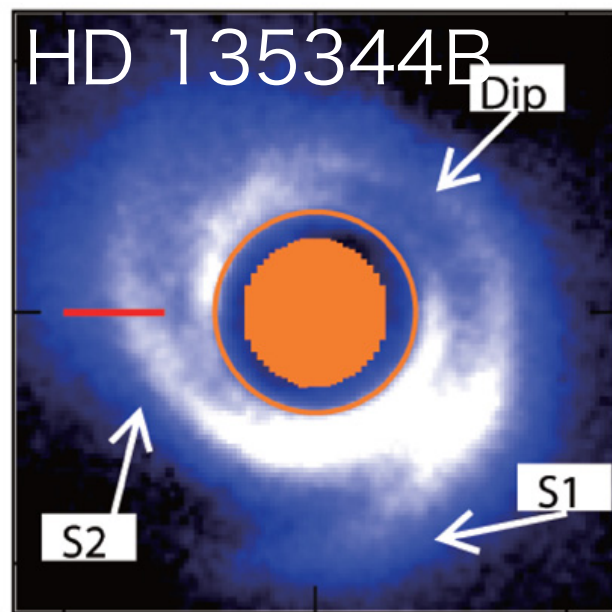
Outline

- イントロ 原始惑星系円盤の形成・進化の概要
- 円盤形成・進化の物理過程
- 現在の課題 円盤の詳細構造形成の理解
- 将来の展望、まとめ

円盤進化理論の課題：詳細構造形成

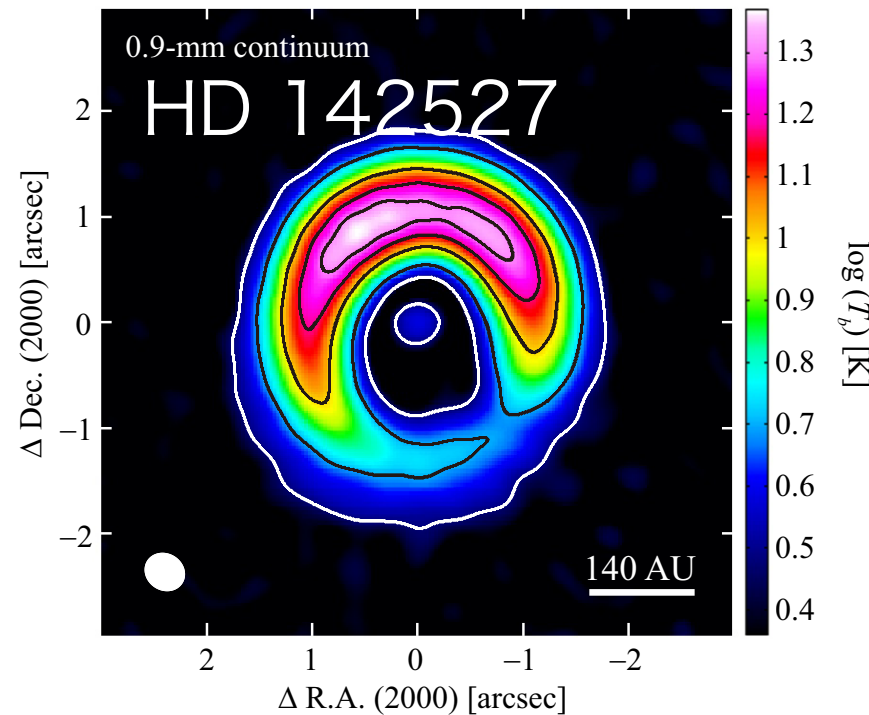
すばる望遠鏡・ALMA等の活躍により多様な円盤構造が発見

渦状腕



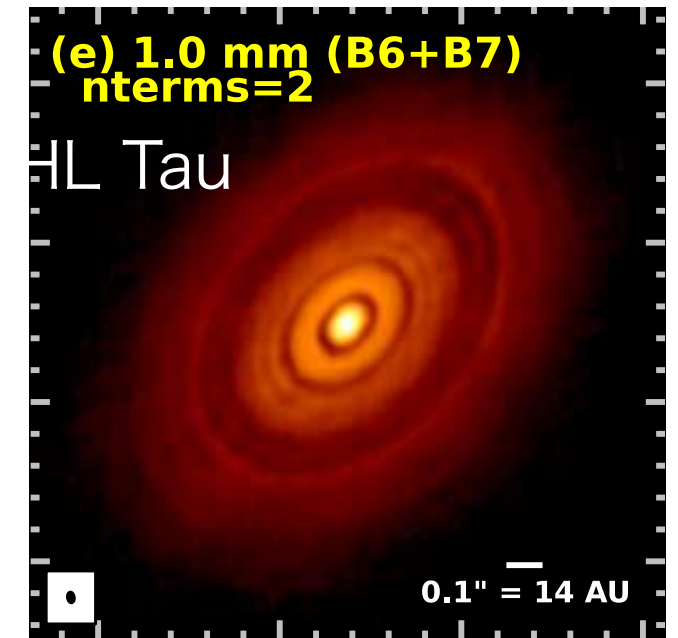
Muto et al. 2012

三日月型



Fukagawa et al. 2013

リング

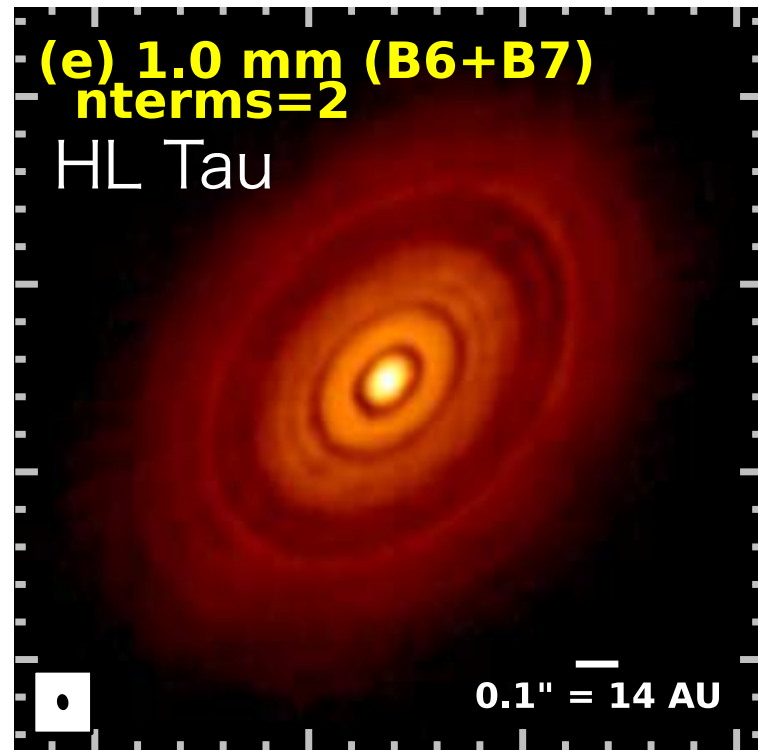


ALMA partnership et al. 2015

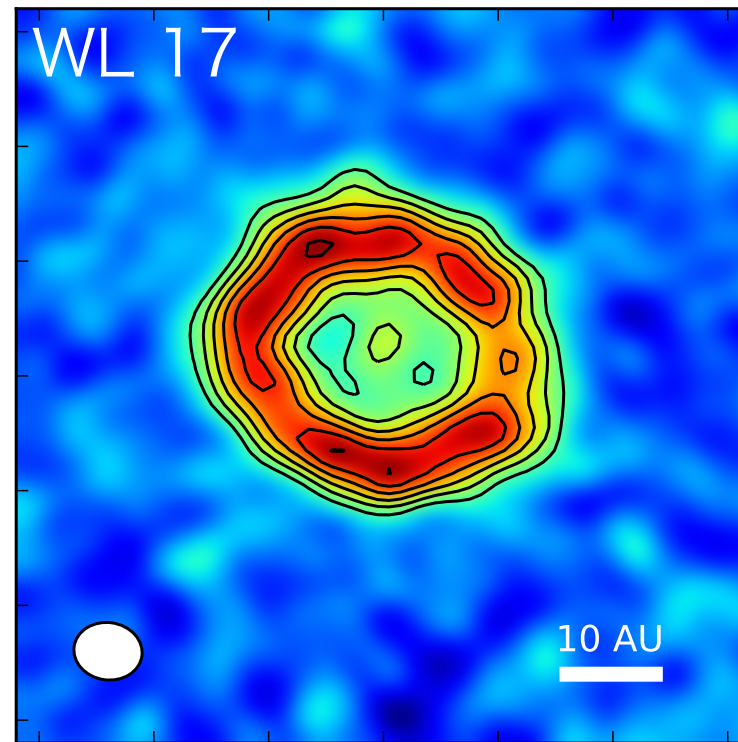
これまでの基本的な円盤進化の理解では、
観測される多様な円盤構造を説明できない

円盤進化の理解を進める（改める）必要がある

原始惑星系円盤のリング構造の観測



ALMA partnership et al. 2015

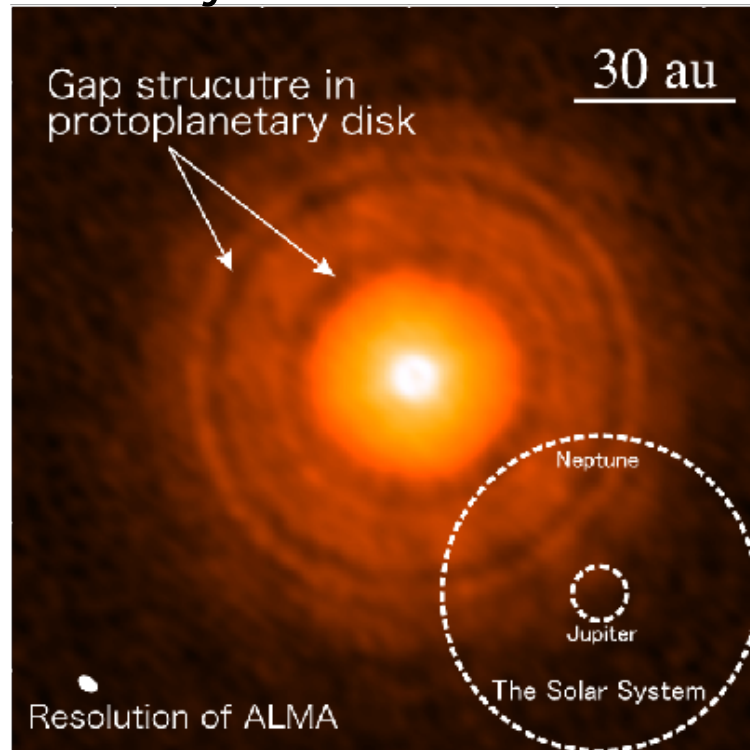


Sheehan et al. 2017

HL Tauを始めとする
数天体でリング構造が
観測

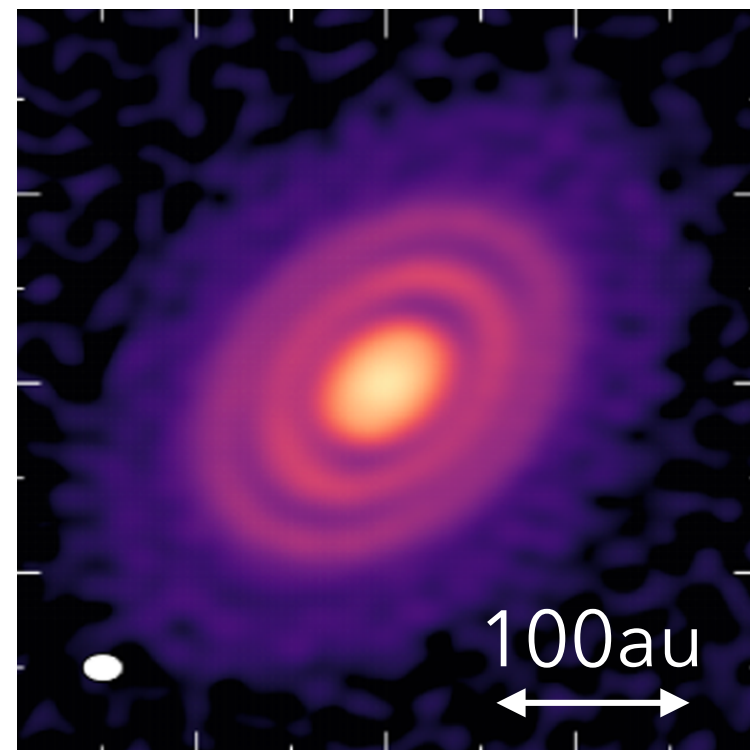
< 1 Myr

TW Hya



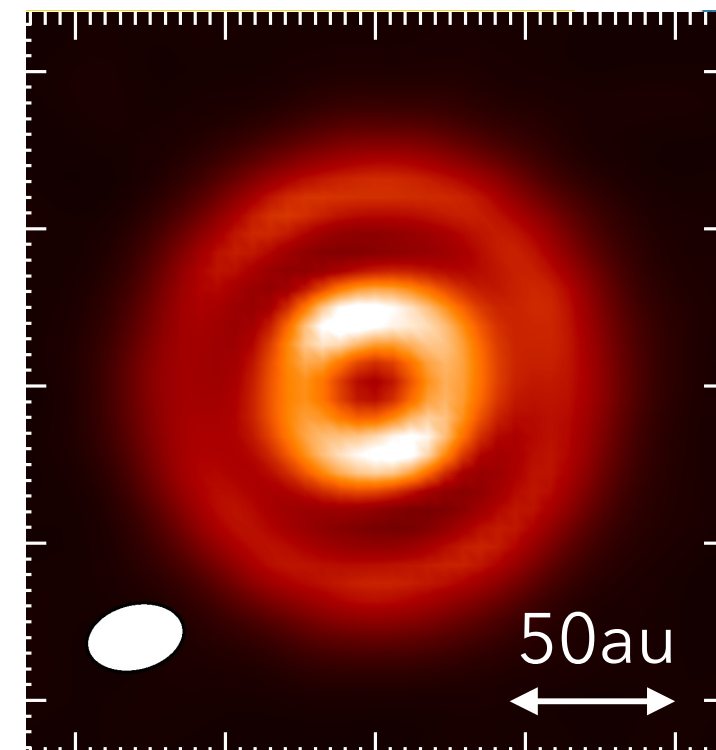
Tsukagoshi +2016

HD 163296



Isella +2016

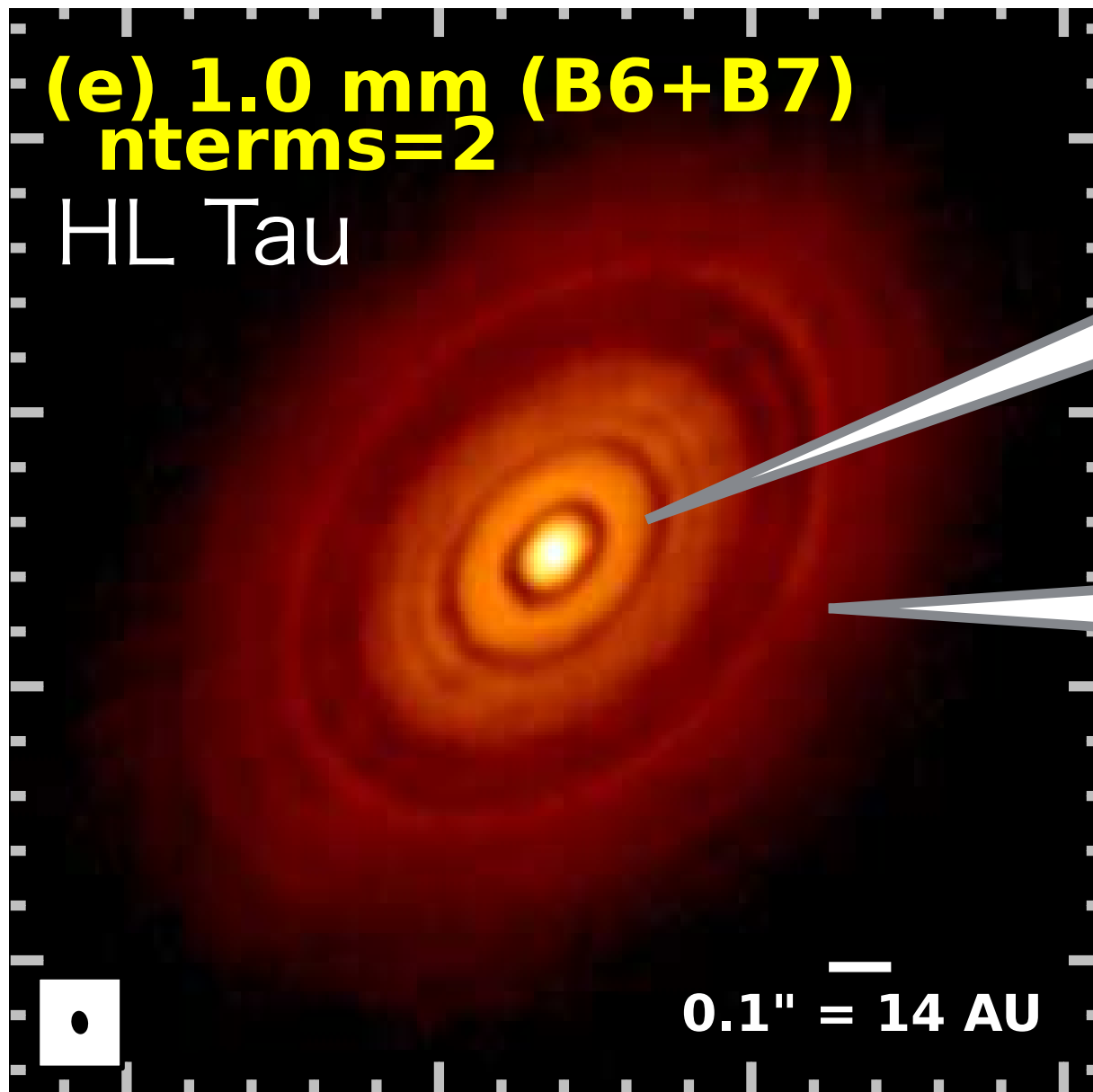
HD 169142



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

円盤散逸 (Photoevaporation, **円盤風**)

ダスト成長 (内側で早い成長)

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)

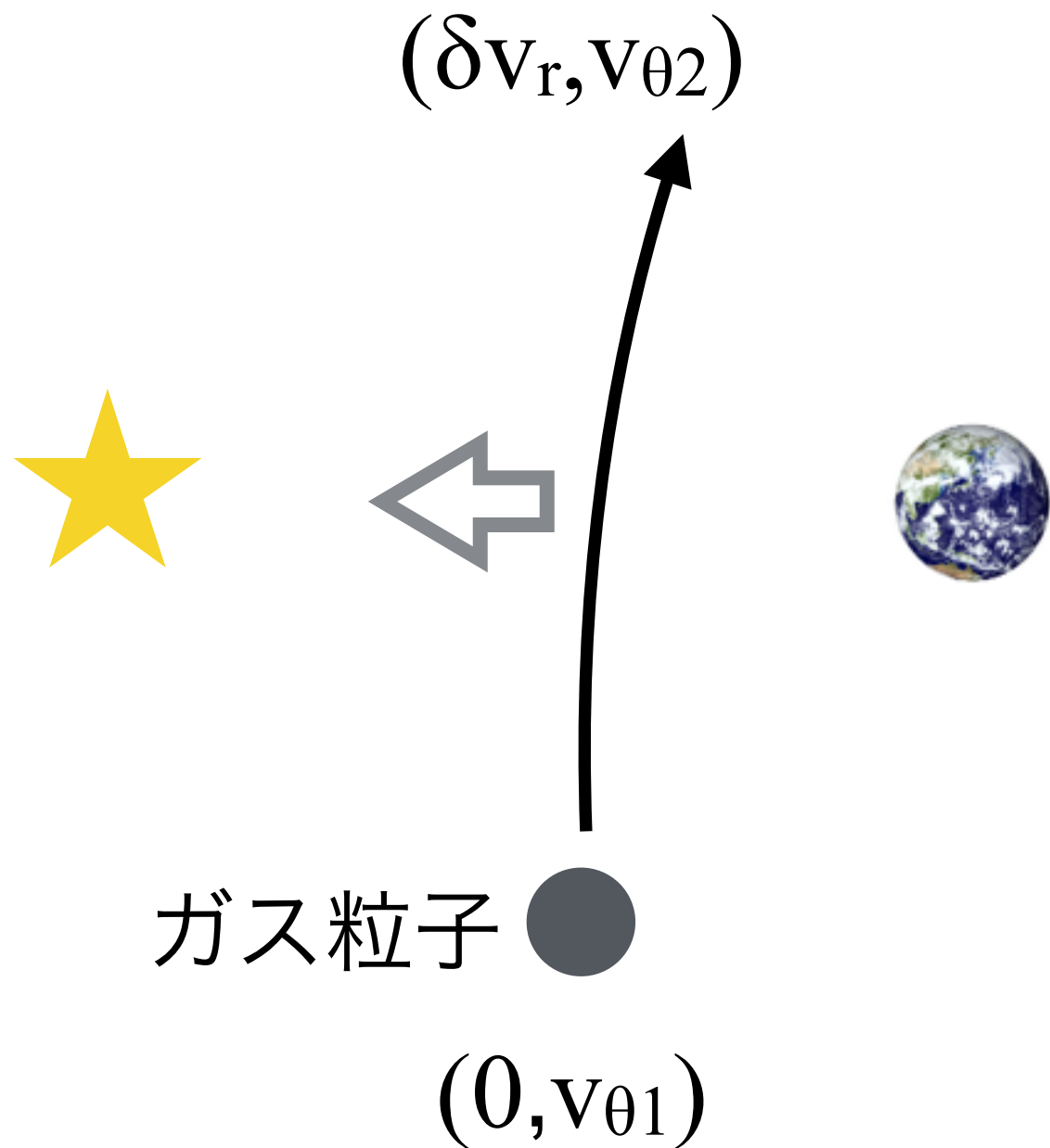
単一リング

円盤散逸 (Photoevaporation, **円盤風**)

ダスト成長 (内側で早い成長)

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

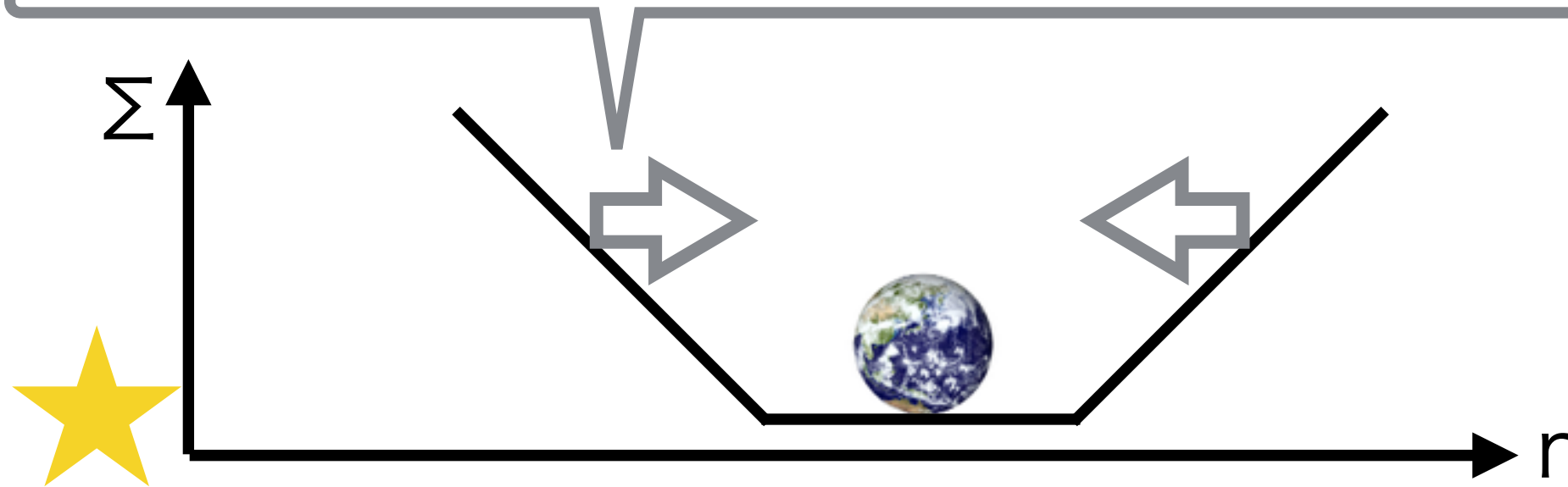


ギャップの構造

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

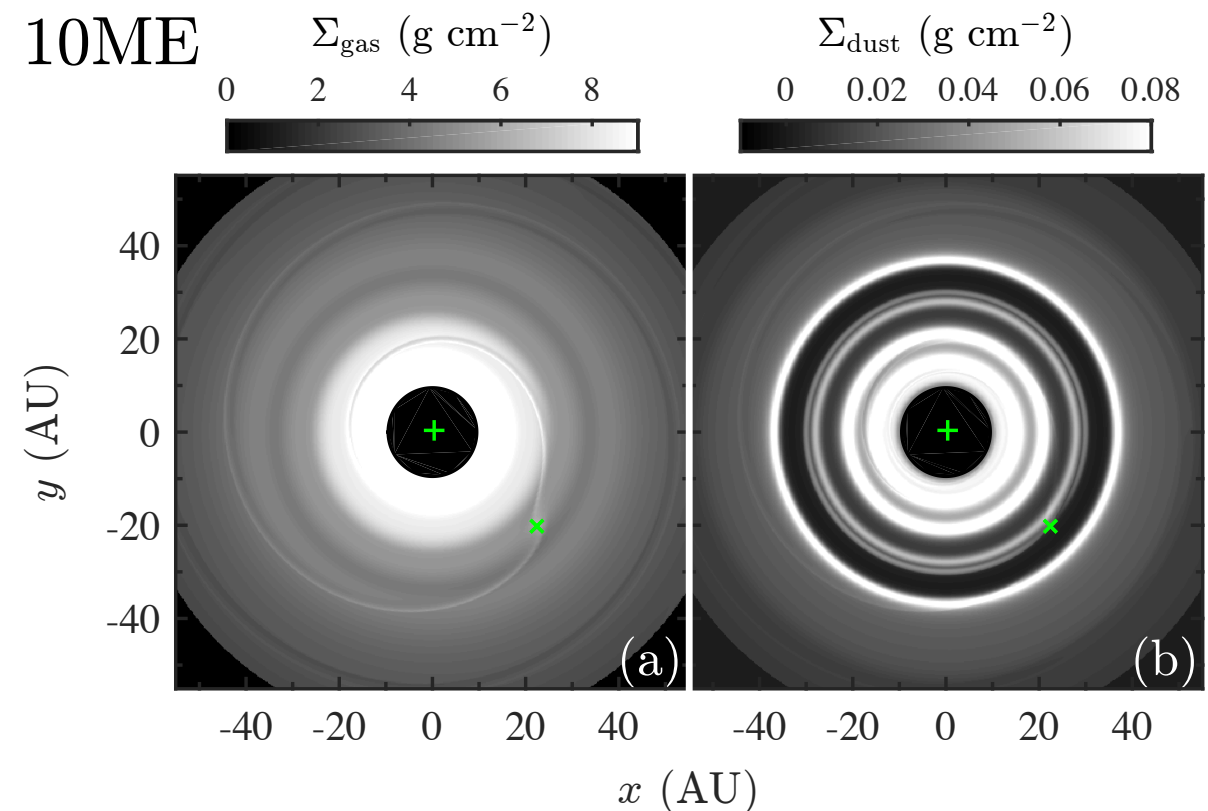
惑星の観測/惑星最大質量の制限からモデルを検証可能

どうやって惑星を形成？

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)



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

円盤散逸 (Photoevaporation, **円盤風**)

ダスト成長 (内側で早い成長)

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

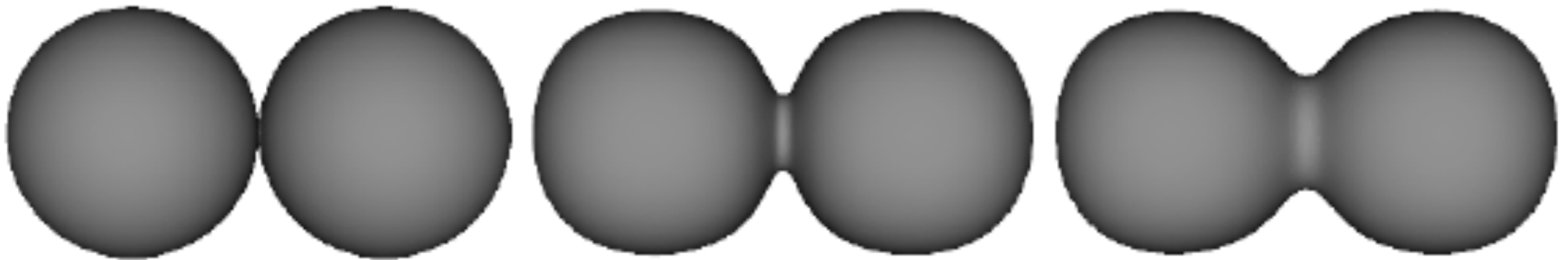
⇒ガスが滑らかな分布でも、ダスト放射に構造があれば良い

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

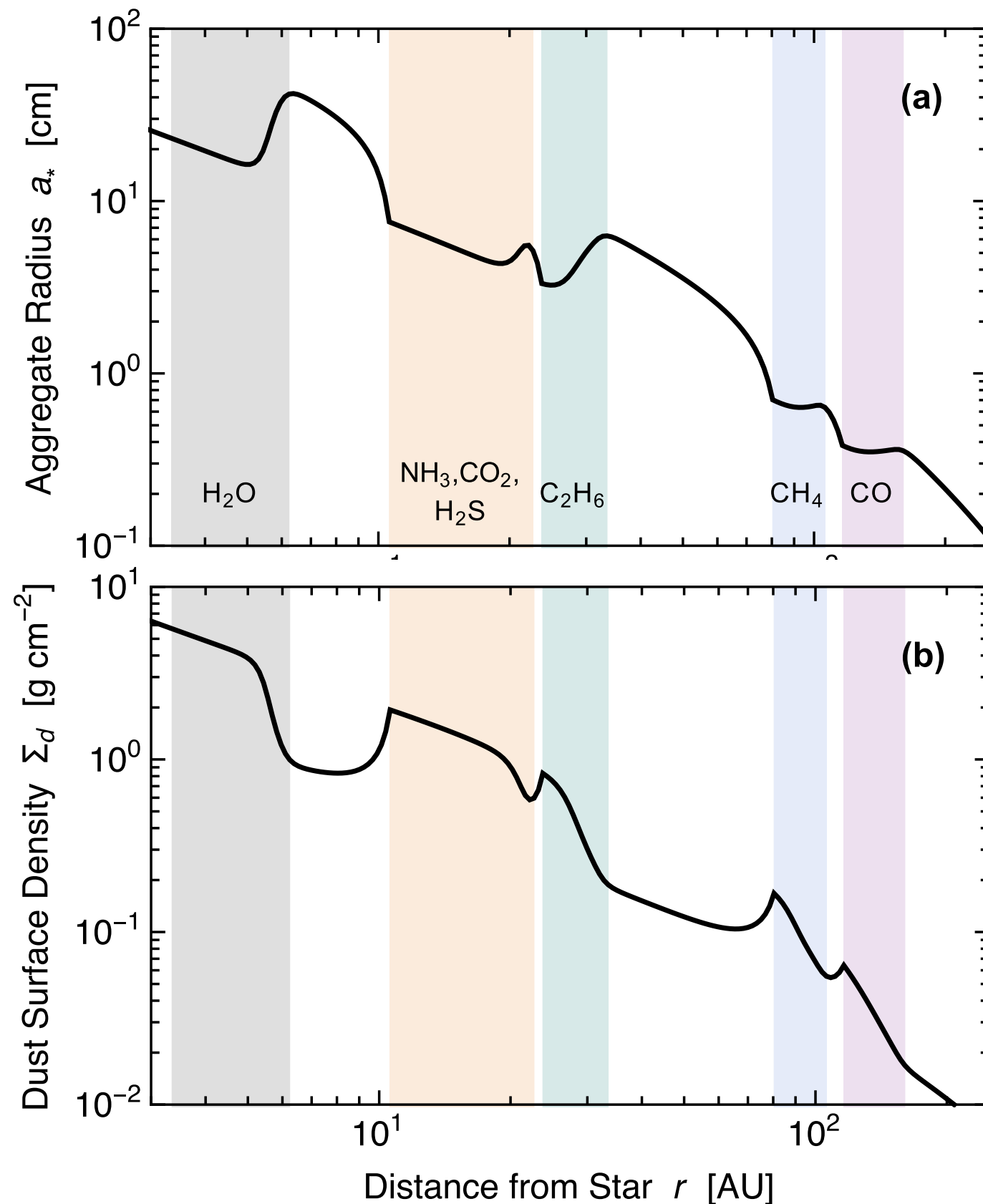
⇒モノマーの結合部部が太くなる

⇒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**



Pino et al. 2014

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
⇒ 落下速度減少
⇒ 面密度上昇
⇒ リング構造

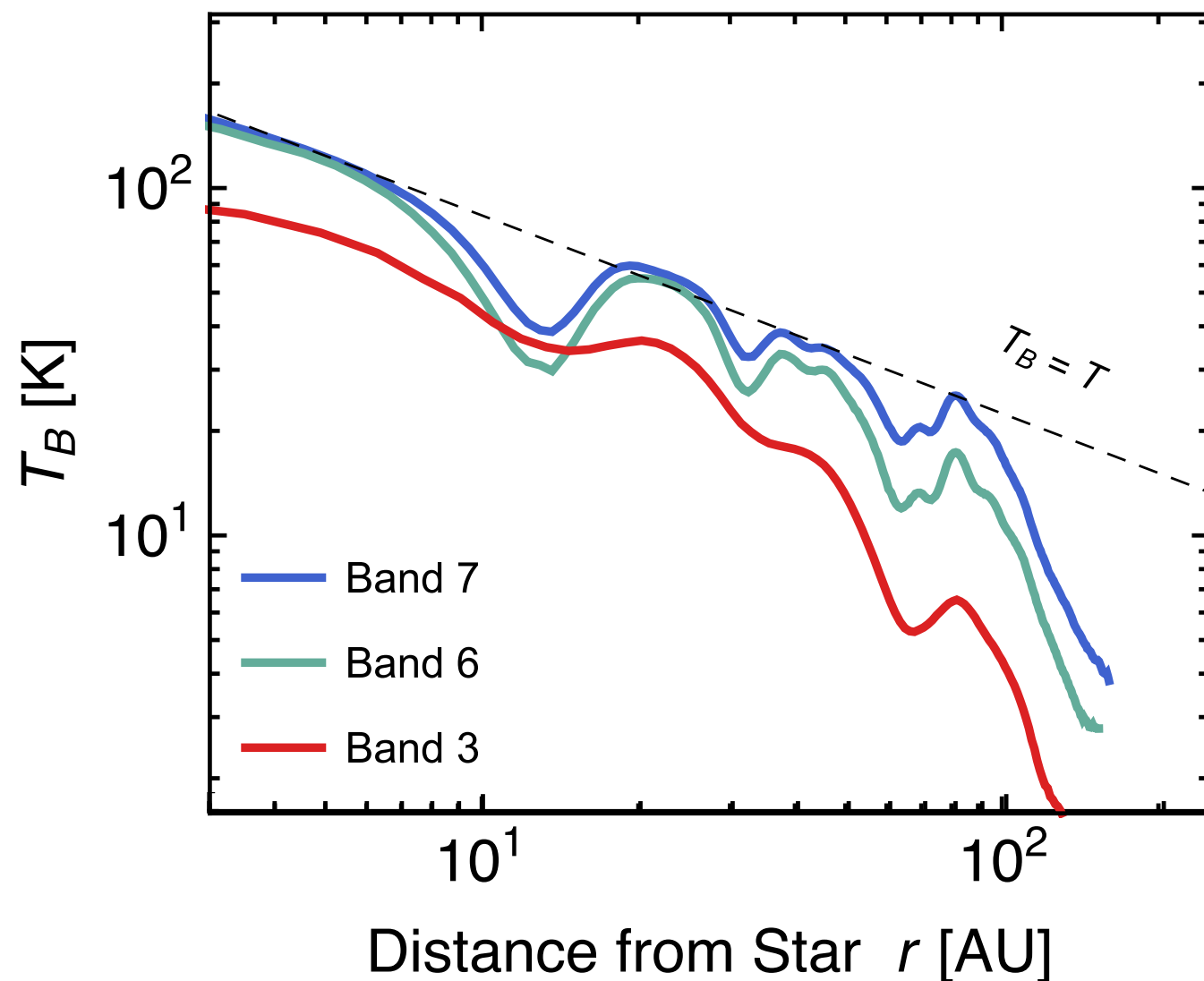
焼結する分子の種類で
多重リング構造を形成

温度構造によって
リングの位置・幅が決定

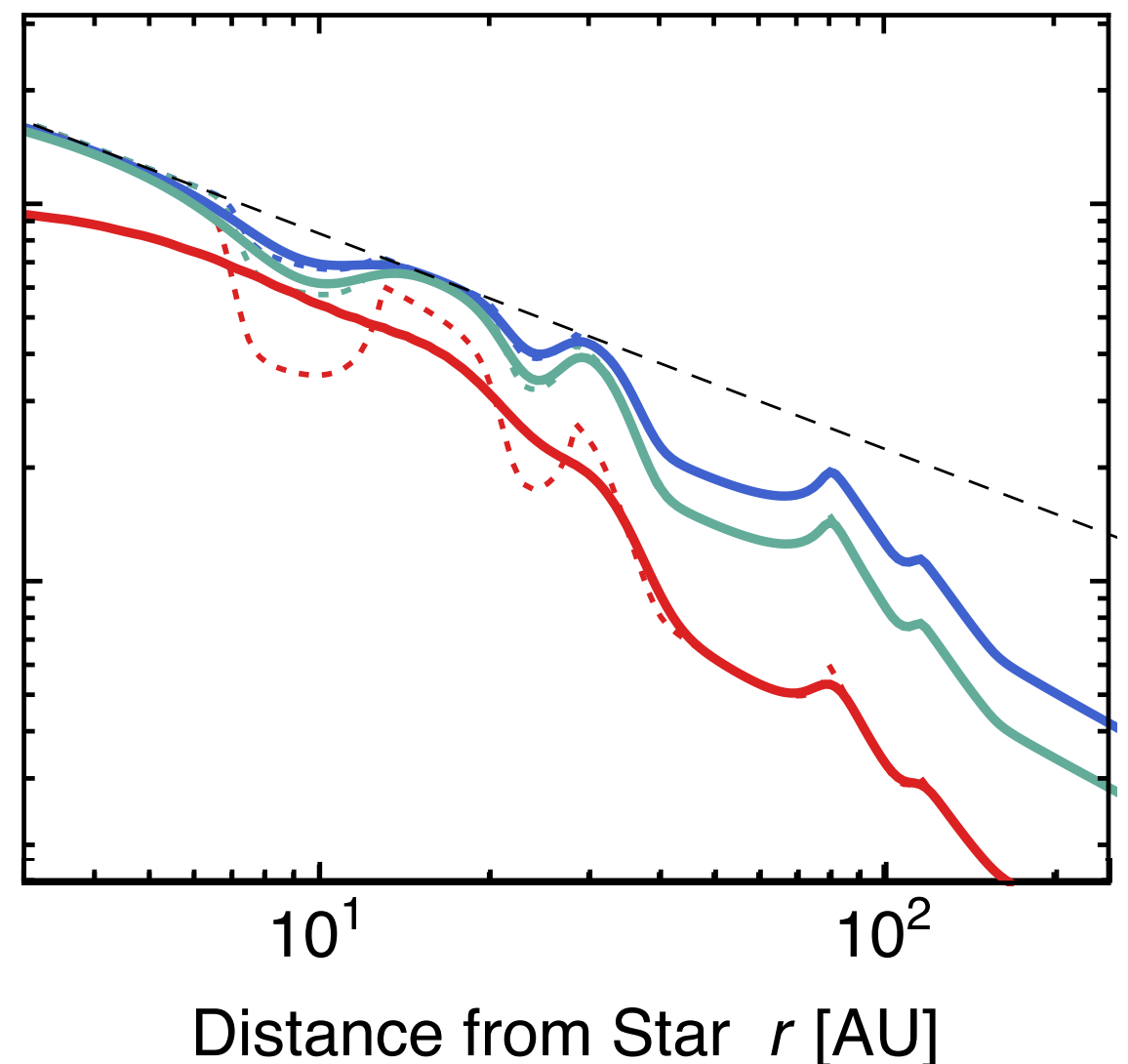
観測との比較

$t \sim 0.26 \text{ Myr}$ 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
 $\Rightarrow$ リング構造は若い円盤の特徴

ALMA Observation



Sa0- tuned



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)

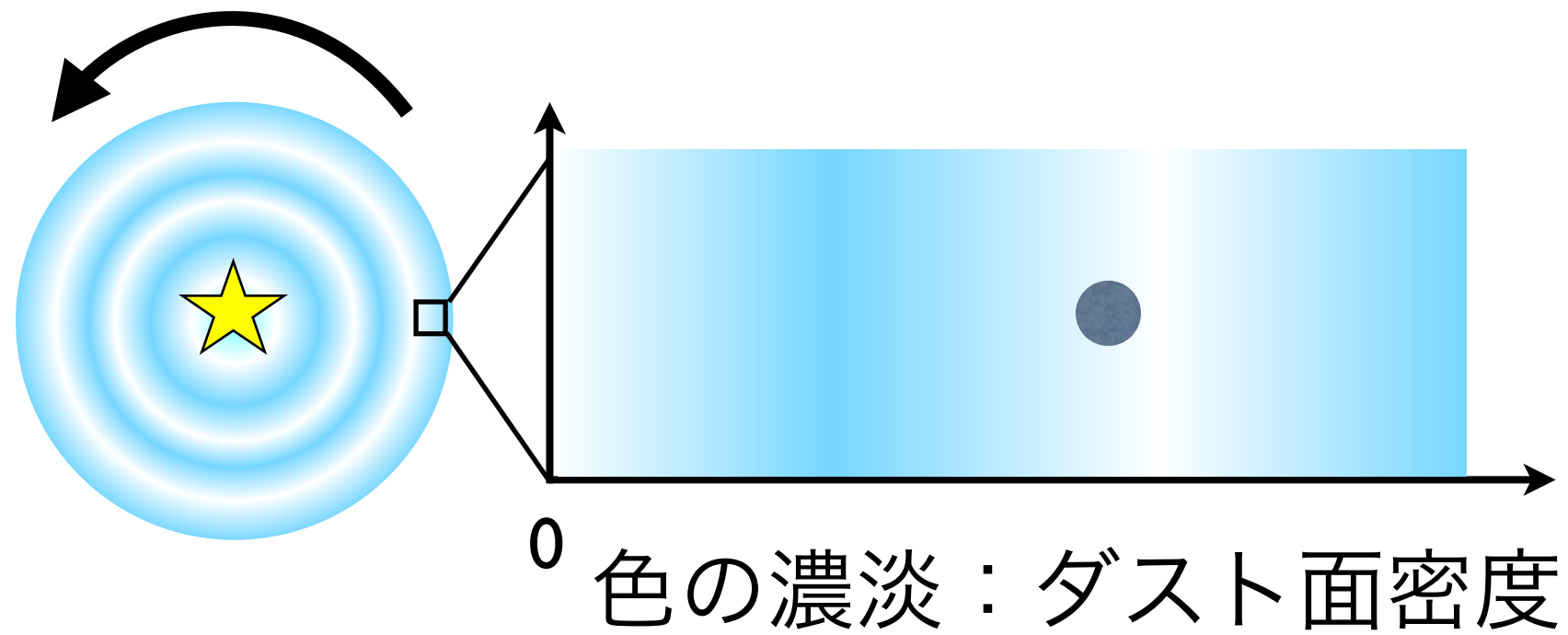
MRI (dead zone, zonal flow) (cf. Uribe et al. 2011, Flock et al. 2014)

単一リング

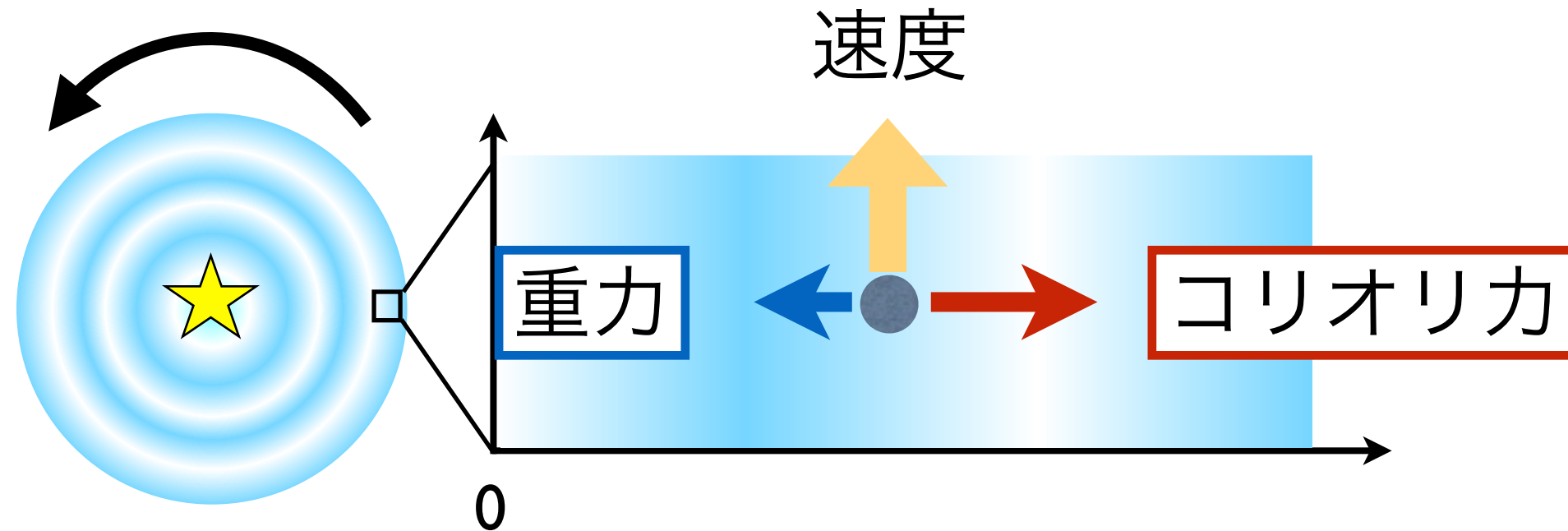
円盤散逸 (Photoevaporation, **円盤風**)

ダスト成長 (内側で早い成長)

Secular GIのメカニズム



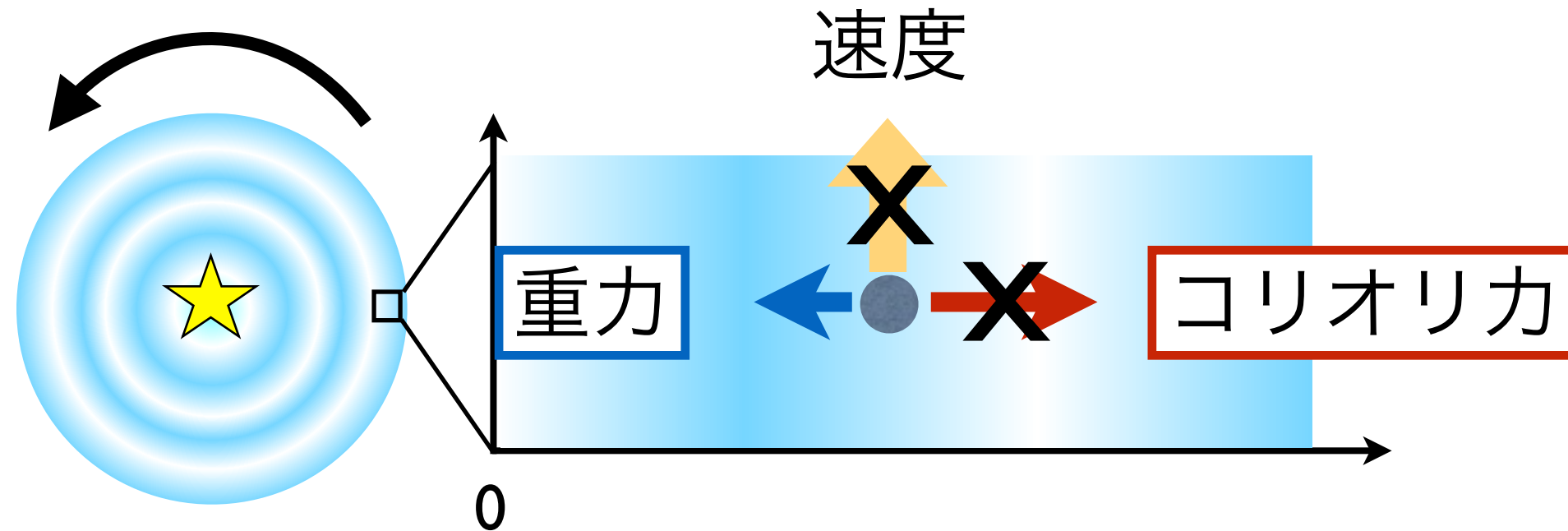
Secular GIのメカニズム



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 $\Rightarrow$ 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

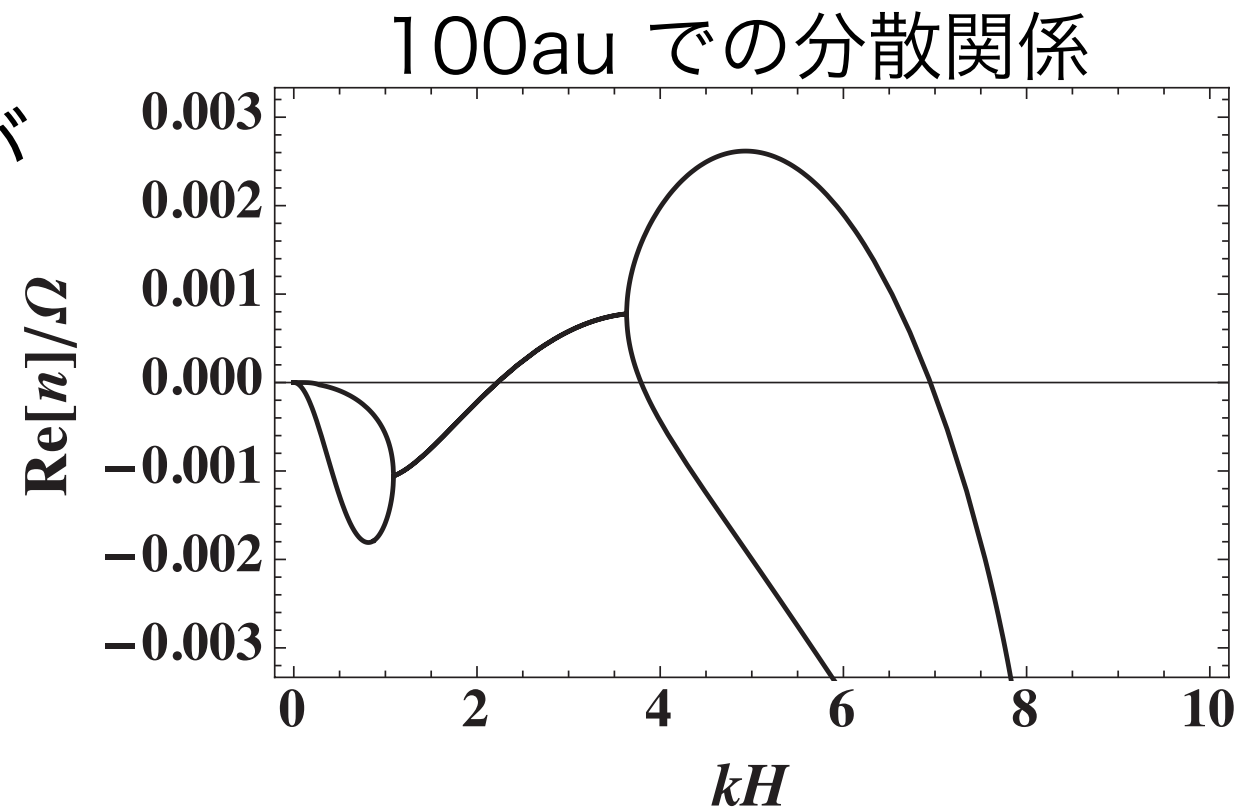
Secular GI によるリング構造形成シナリオと整合的
実際に HL Tau は Secular GI に対して不安定か？

HL Tau でのSecular GI

「**ダスト 多**」と「**乱流 弱**」が
観測から示唆

(Kwon et al. 2015, Pinte et al. 2015)

⇒Secular GI が不安定



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

リングにダストが濃集→その後の惑星形成につながる可能性

大局的非線形計算が必要

Tominaga, Takahashi, Inutsuka 2017

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
ダストサイズ	リングで大	リングで小	リングで大
リング間隔	惑星の軌道	温度分布 分子種	不安定波長
年齢との関係	若いと困難	古いと困難	古いと困難
惑星形成	結果	—	原因

モデルの検証/複数天体を説明可能か？

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)

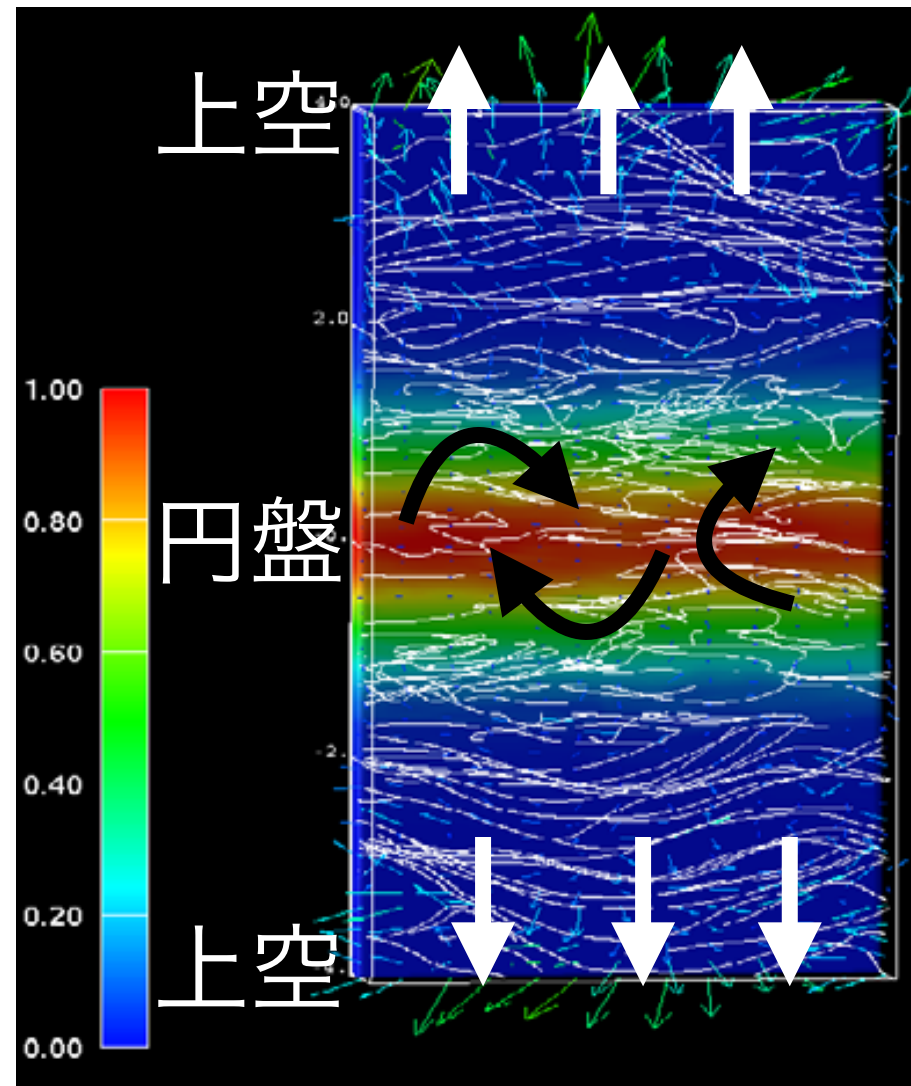
MRI (dead zone, zonal flow) (cf. Uribe et al. 2011, Flock et al. 2014)

単一リング

円盤散逸 (Photoevaporation, **円盤風**)

ダスト成長 (内側で早い成長)

磁気駆動円盤風によるリング形成



磁気流体シミュレーション

円盤から上下方向にガスが流出

Suzuki et al. 2010

磁気回転不安定性による乱流

磁場を曲げエネルギーを上空へ

ガスの上下方向の速度に転換

Mass loss rate $\dot{\Sigma}_{\text{wind}} = C_w \Sigma \Omega$ $C_w \sim 10^{-5} - 10^{-3}$

C_w 一定なら円盤内側ほど効率的

円盤風で内側に穴をあけるとリング構造が説明できるか？

観測との比較

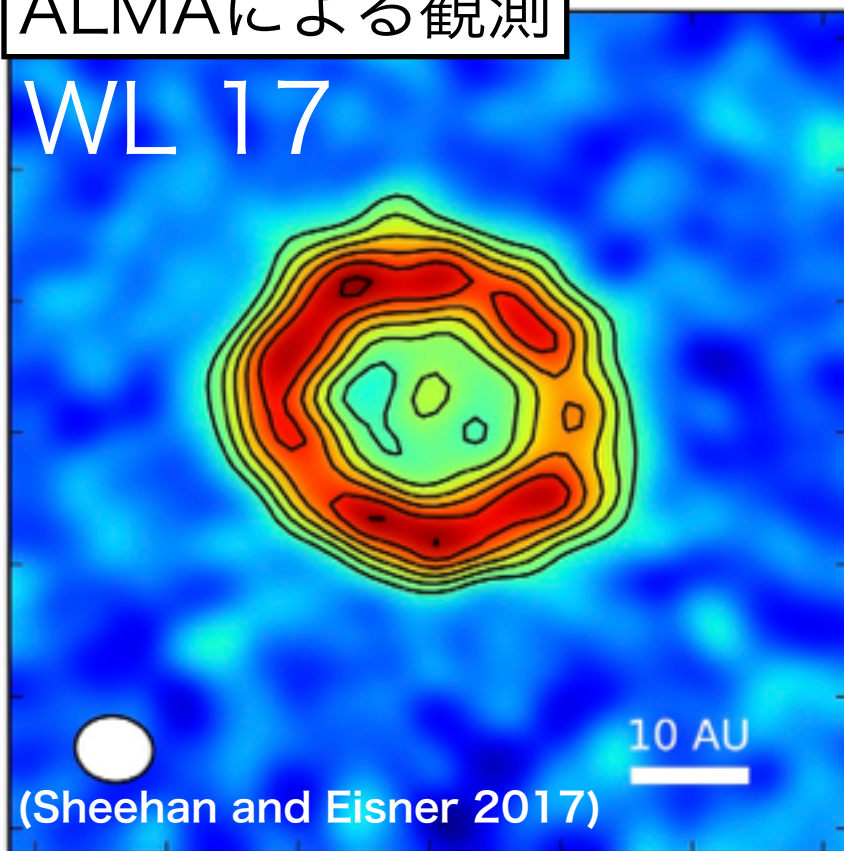
原始惑星系円盤の形成・進化モデルで

円盤風の強さ等をパラメータとして多数のモデル計算

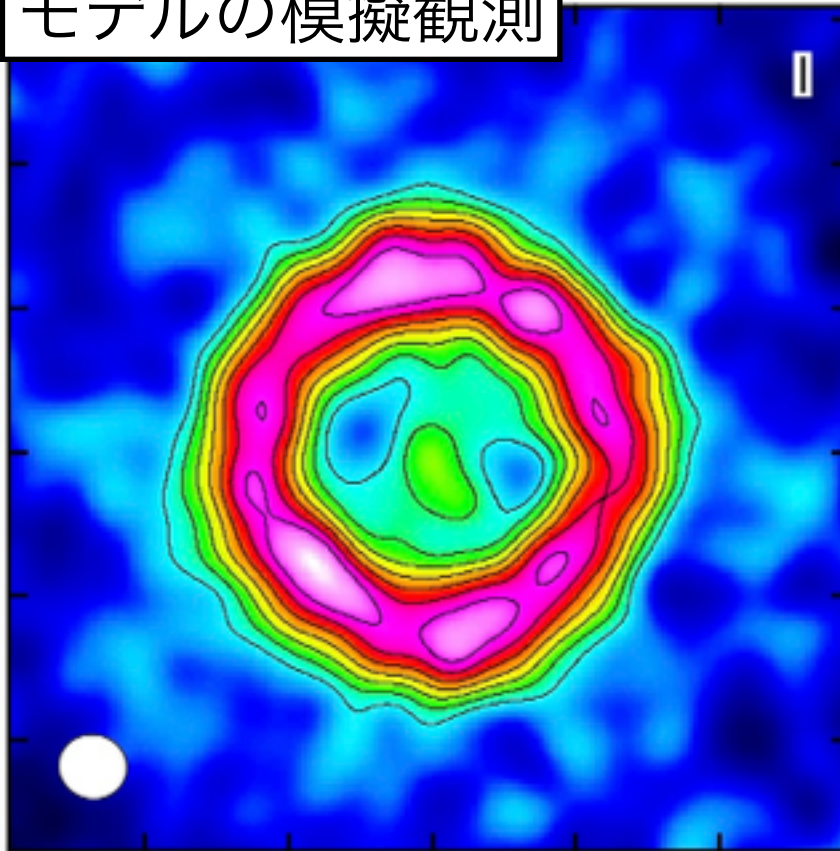
(Takahashi and Muto submitted)

ALMAによる観測

WL 17



モデルの模擬観測

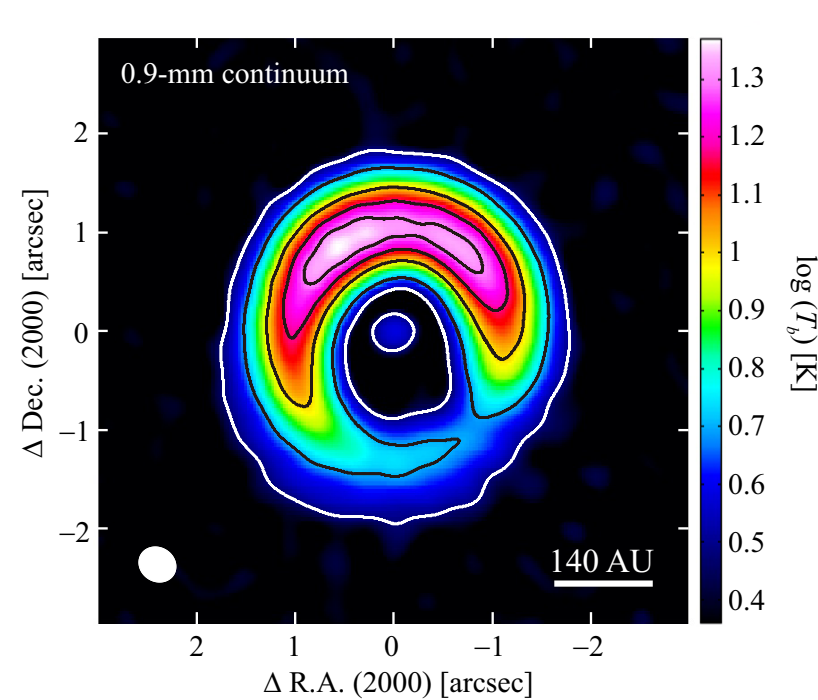


計算結果を使って模擬観測
ダスト放射の輝度分布
コントアは同じ輝度に対応

磁気駆動円盤風によるリング構造形成シナリオで
WL 17 の観測結果を整合的に説明可能

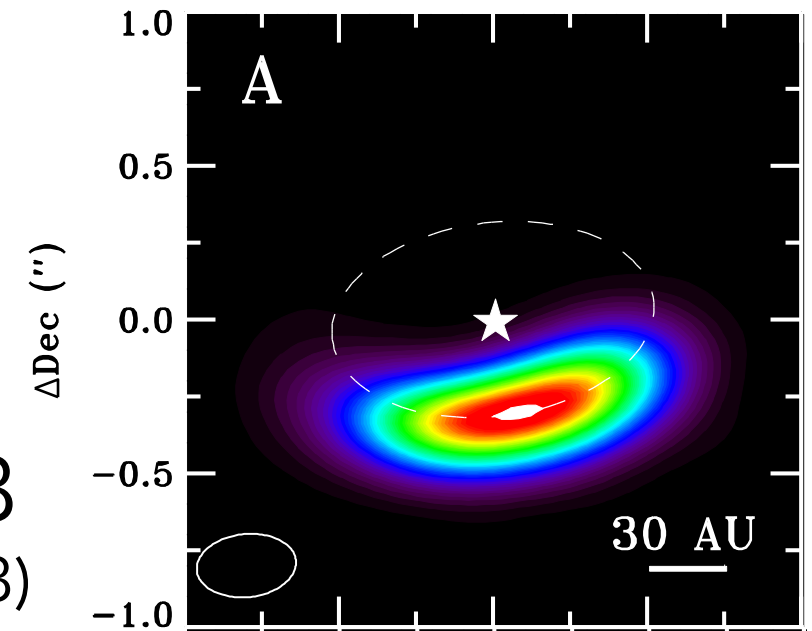
その他の構造：三日月型構造

非軸対称にダストが集中した構造も発見

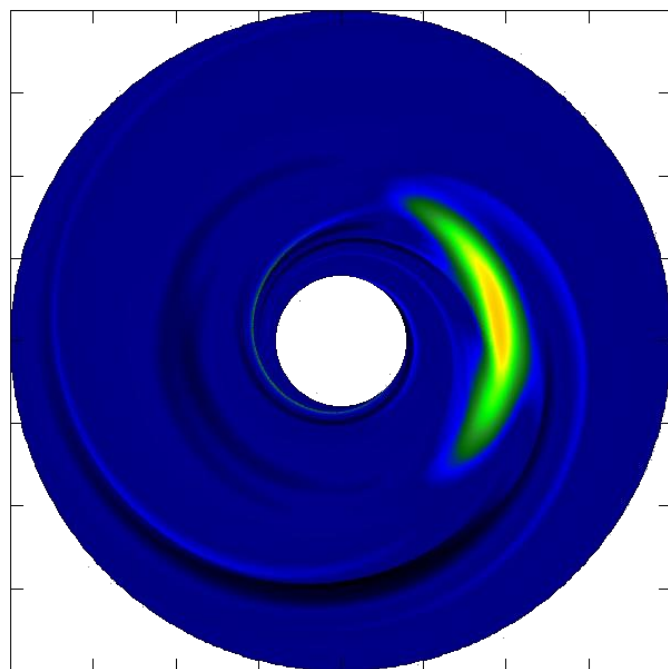


HD 142527
(Fukagawa et al. 2013)

Oph IRS 48
(van der Maler et al. 2013)



ロスビー波不安定性で説明可能か？



二次元計算、高密度の渦が形成

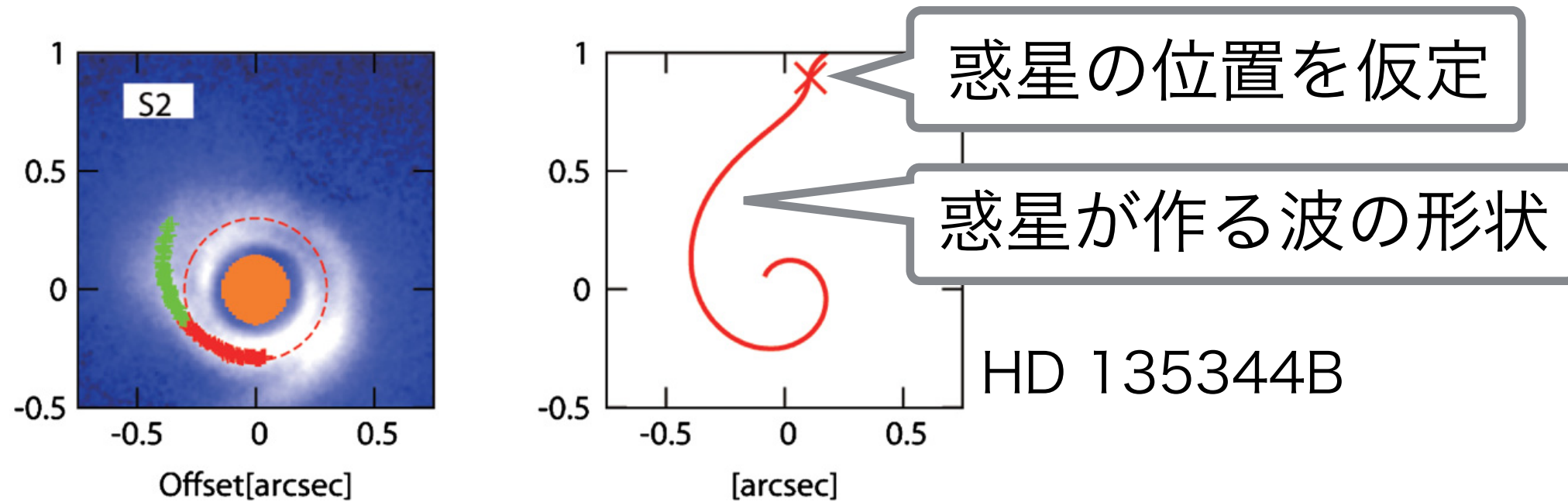
渦にダストを集められると観測を説明
惑星形成にもつながる

小野さんのスライドより

その他の構造：渦状腕構造

惑星か重力不安定か？

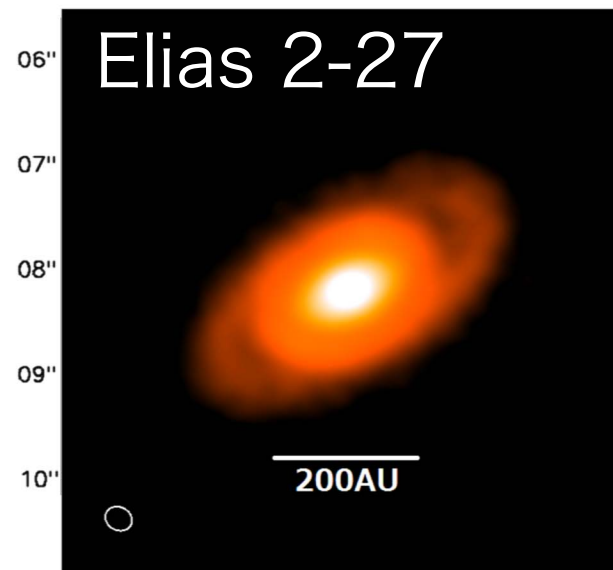
惑星が円盤に立てた波による腕構造 Muto et al. 2012



重力不安定による腕構造と観測の比較 Tomida et al. 2017

シミュレーション

観測(Perez et al 2016)



回転対称な2本の腕構造は重力不安定性で説明しやすい

Outline

- イントロ 原始惑星系円盤の形成・進化の概要
- 円盤形成・進化の物理過程
- 現在の課題 円盤の詳細構造形成の理解
- 将来の展望、まとめ

今後の展望 1 : 観測との関係

ALMAによる詳細な円盤観測が続く

⇒新たな構造の発見、統計的な特徴

観測が理論をリードする時代が続く

- ◆新しい観測を説明する円盤構造形成モデル
- ◆構造形成の統計的特徴の研究
- ◆乱立する理論モデルの淘汰（だと良いな。。。）

円盤観測を惑星形成シナリオの解明につなげる

- ◆ダストの光学特性の理解
- ◆構造形成から惑星形成への応用（ダスト進化計算の組込）

観測的にもガス分布の理解は今後の課題

- ◆化学進化計算により、line観測から重要な情報を引き出す

今後の展望2：星形成理論との関係

星・円盤形成過程は主にシミュレーションで研究が進展

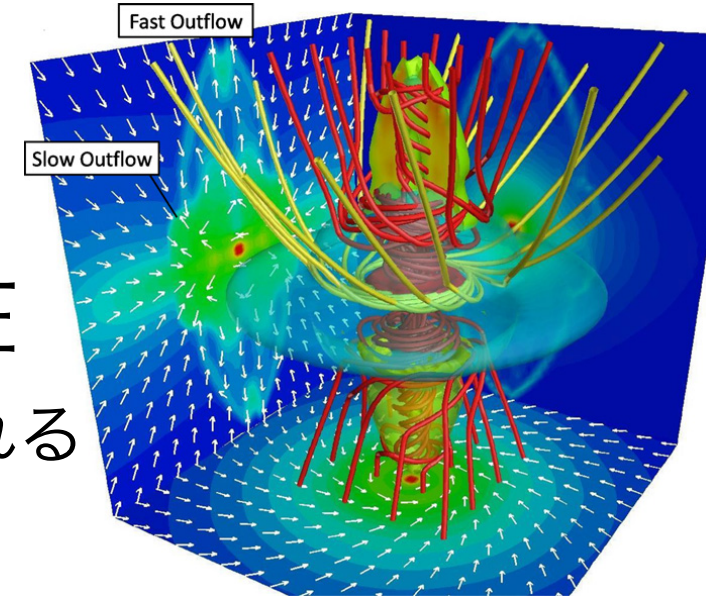
3次元で磁場、輻射が実装されている。

新規参入で最先端の計算コードを作ることが困難に

Athena ++ など高性能な公開コードが存在

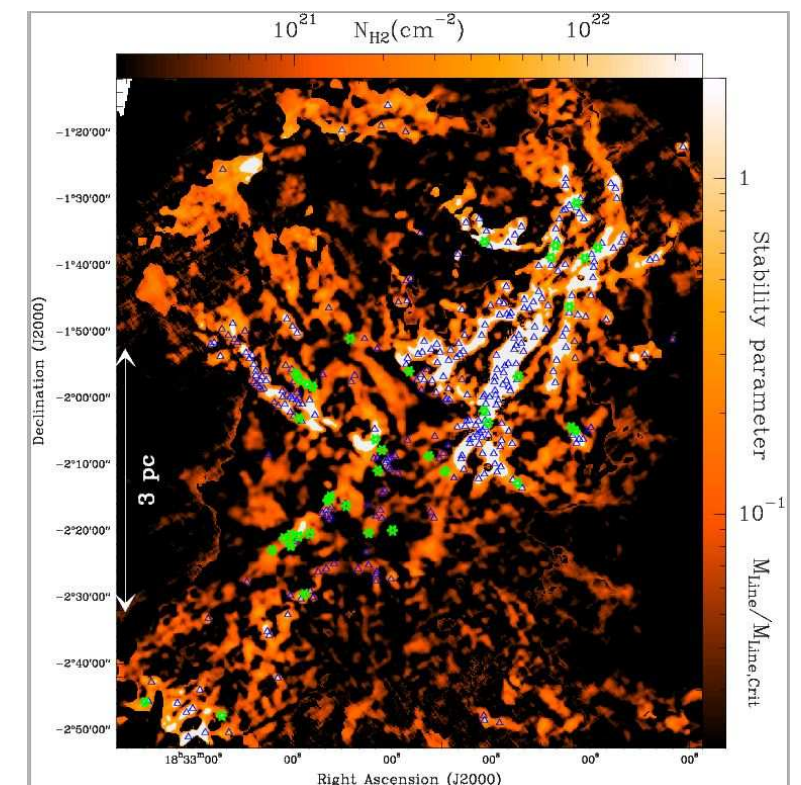
No. 1 より Only 1 のシミュレーション、新たな発想が求められる

Tomida et al. 2010



より small scale に行くか
(高分解能、惑星形成との関係)

large scale に行くか
(分子雲コア、フィラメントとの関係)



(Andre et al. 2010)

今後の展望3：惑星形成理論との関係

観測の情報をフル活用（展望1）

赤道面の乱流等これまで分からなかった物理量が

定量的に分かるようになってきた (Pinte et al. 2015)

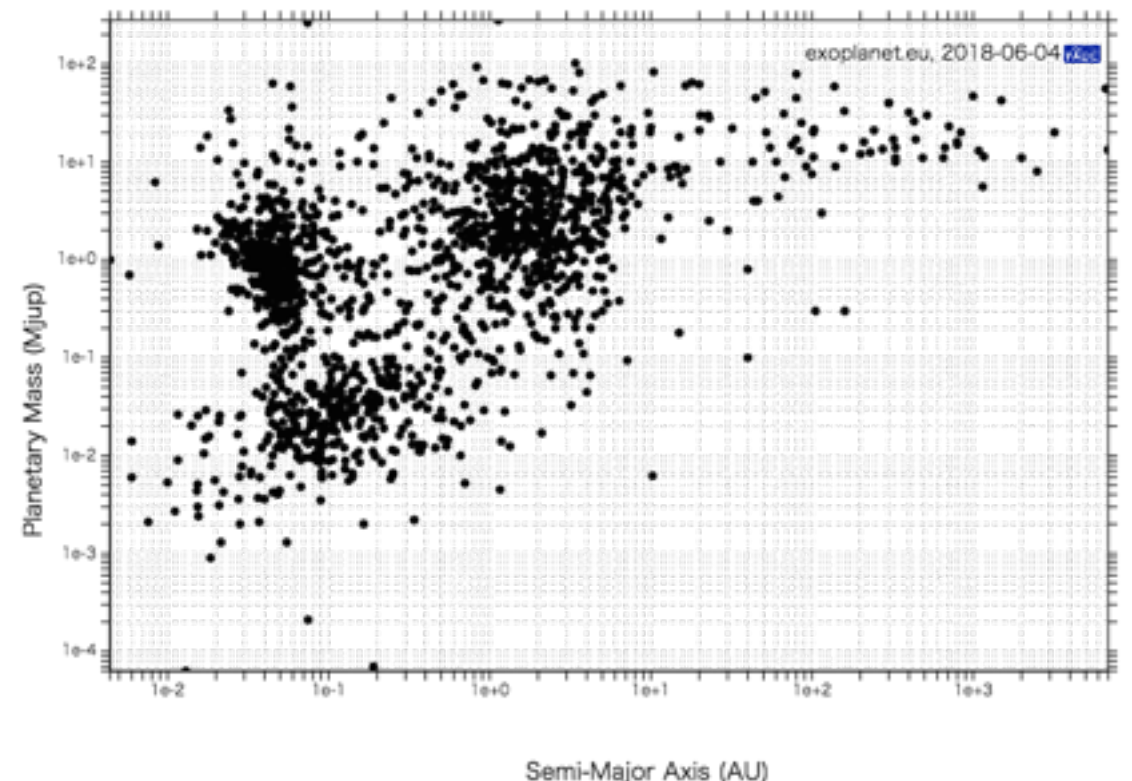
個別と全体

個別

- ◆惑星形成理論ではファクターの違いでも結果に大きく影響
- ◆各素過程の詳細なシミュレーションは今後も必要
(ダストの進化、MRIなど。。。)

全体

- ◆増え続ける惑星系の観測結果
- ◆惑星の多様性の起源を探る
- ◆円盤の多様性との関係



まとめ

- ・ 原始惑星系円盤は原始星の周囲に形成
- ・ ガスは円盤を通して星に降着し、惑星は円盤中で形成されるため、星・惑星形成の理解のために重要
- ・ 分子雲コアの重力崩壊によって形成され、重力不安定性やMRIなどの角運動量輸送により進化していく
- ・ 近年円盤に多様な構造が観測されている。リング構造形成に関して、惑星や焼結、永年重力不安定性など複数の理論モデルが提唱されるが起源は未だに解明されていない。
- ・ 今後も詳細な観測・統計的観測が進むため、観測にリードされる形で円盤の研究が進んでいくと思われる