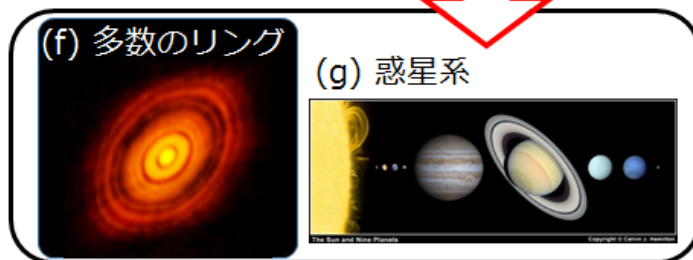
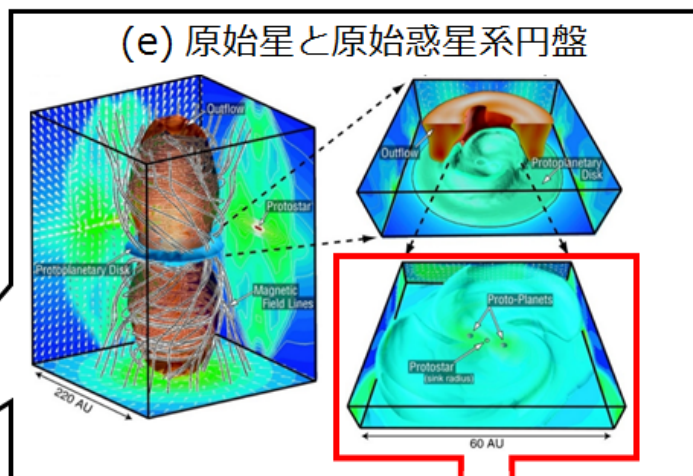
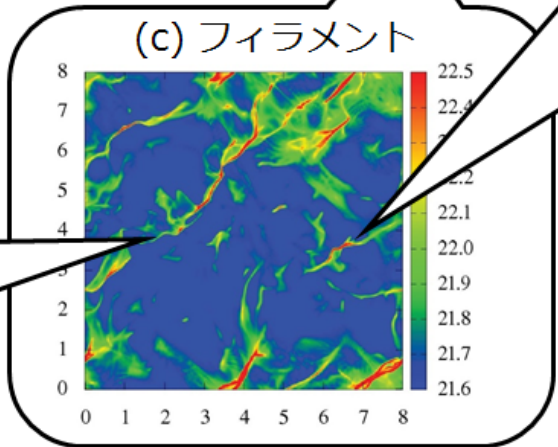
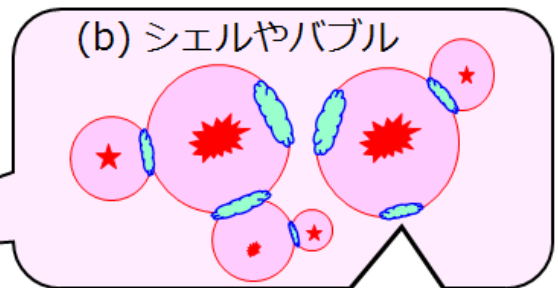
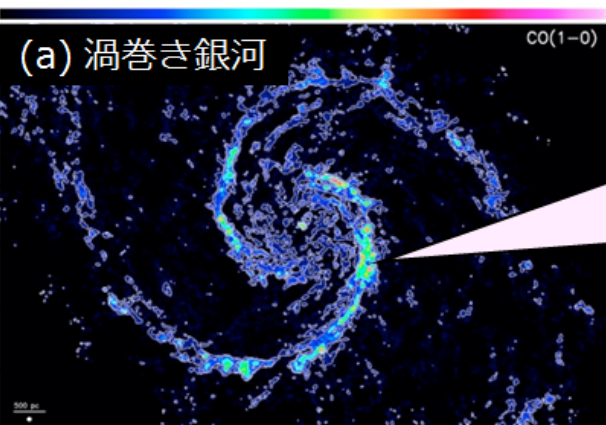
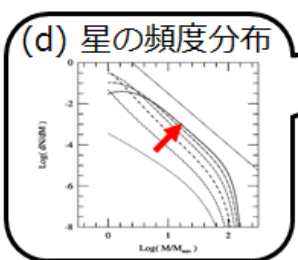


原始惑星系円盤の永年重力不安定性による多重リング形成と微惑星形成過程

犬塚修一郎 (名大・理・物理・TA研)



空間スケール
 10kpc = 3×10^{22} cm
 ↓↑
 1AU = 1.5×10^{13} cm
 ↓↑
 0.1μm = 10^{-5} cm



(約30年前) 阪上さんとのコラボ



この民族音楽大集成は、1992年、キングレコードより100枚+ボーナス4枚の104枚CD全集(ケース・解説本付属)としてリリースされた。価格30万円!

編集は小泉文夫 「偉大な彼の功績は、我々の文化遺産です」

ザ・ワールドドルーツ ミュージックライブラリー

世界最強の民族音楽シリーズ

総タイトル数 150 タイトル

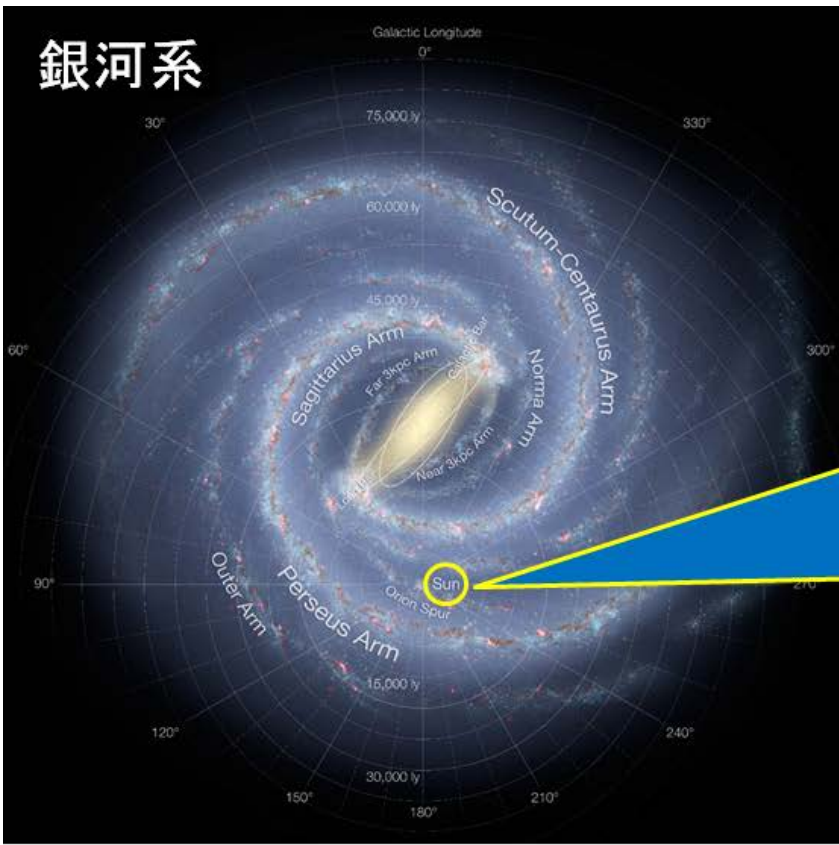
総枚数 191 枚

総金額 288,000円

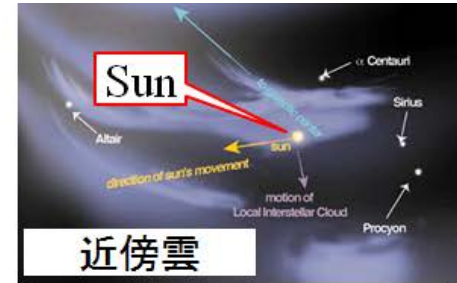
<http://www.heibonotomo.jp/world/index.html>

銀河の中で ~ 星形成から惑星形成へ ~

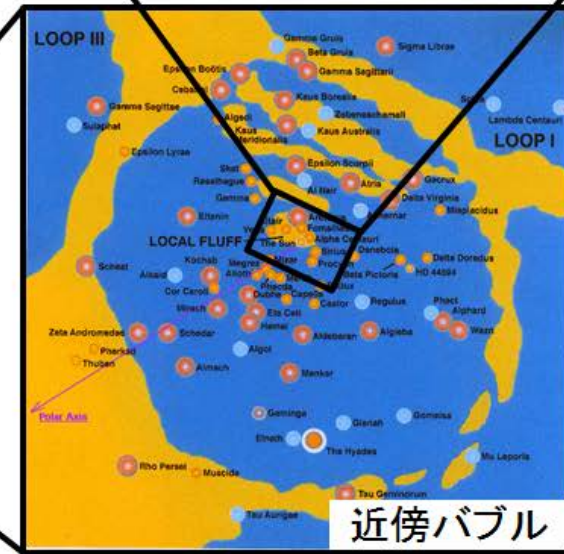
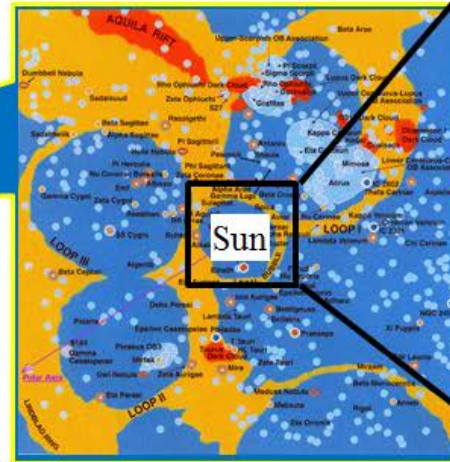
我々とその住処の起源は？ 宇宙の歴史の中で...



太陽系の環境



近傍雲



近傍バブル

惑星形成の標準モデル

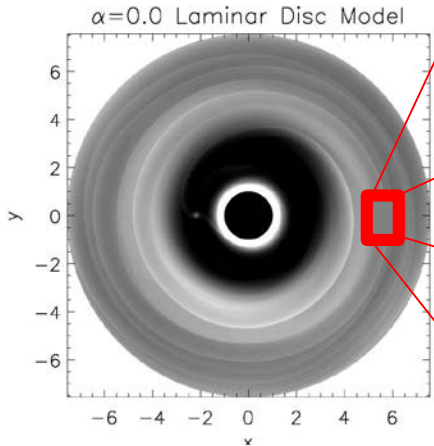
宇宙に存在している
ガスのほとんどは**水素**
と**ヘリウム**！

地球や生物の体を作る
材料(酸素・炭素・
鉄・シリコン等)は**全**
物質の数%程度しか
ない！

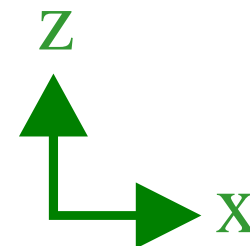
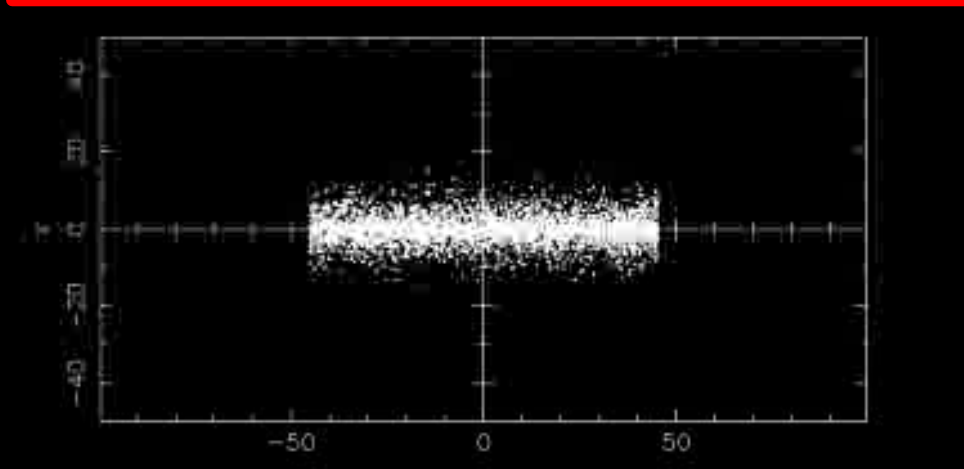
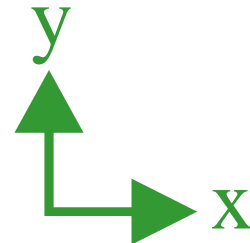
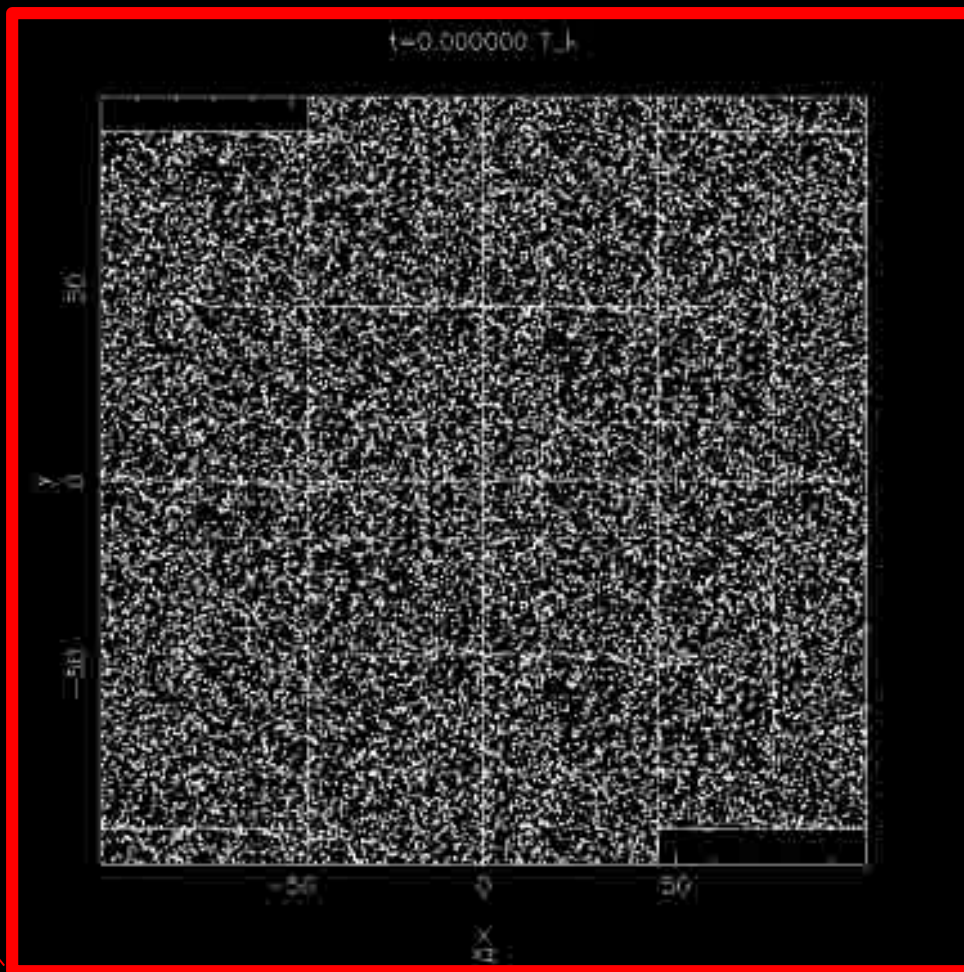
注：京都モデル
とも呼ばれる



微惑星の形成過程

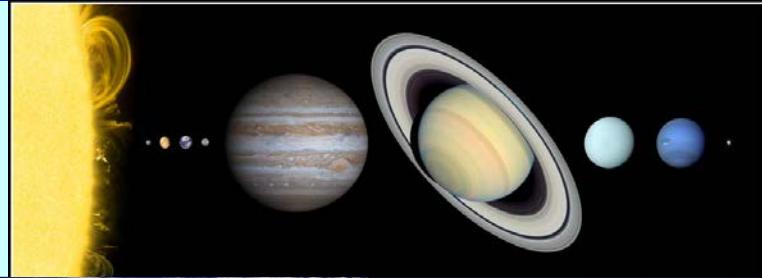


円盤面の一部
の拡大図

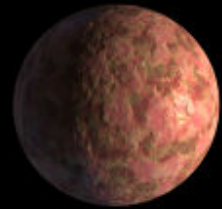


*Michikoshi, Inutsuka, Kokubo
& Furuya 2007; Michikoshi,
Kokubo & Inutsuka 2009*

太陽系



Trans-Neptunian Objects (海王星以遠天体)



Sedna
1180–1800 km
(2003 VB12)



Quaoar
1000-1300 km
(2002 LM60)

“Zenn”

1600 – 2000 km
(2005 FY9)

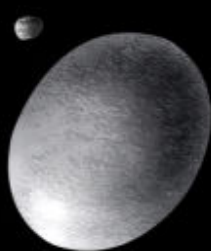


“Gabrielle”



“Xena”
2400 km
(2003 UB313)

Hydra *



2003 EL61
1960×1518×996 km



Pluto
2306 km

Charon



1207 km

Nix *



Moon
3,476.2 km



Earth
12,756.274 km

冥王星：
1930年に発見された海王星以遠天体。2006年8月24日、国際天文学連合総会でdwarf planet (矮惑星) に分類される。

惑星形成シナリオの2つの困難

1. 塵粒子が沈殿できない！

沈殿すると乱流が発生して攪乱

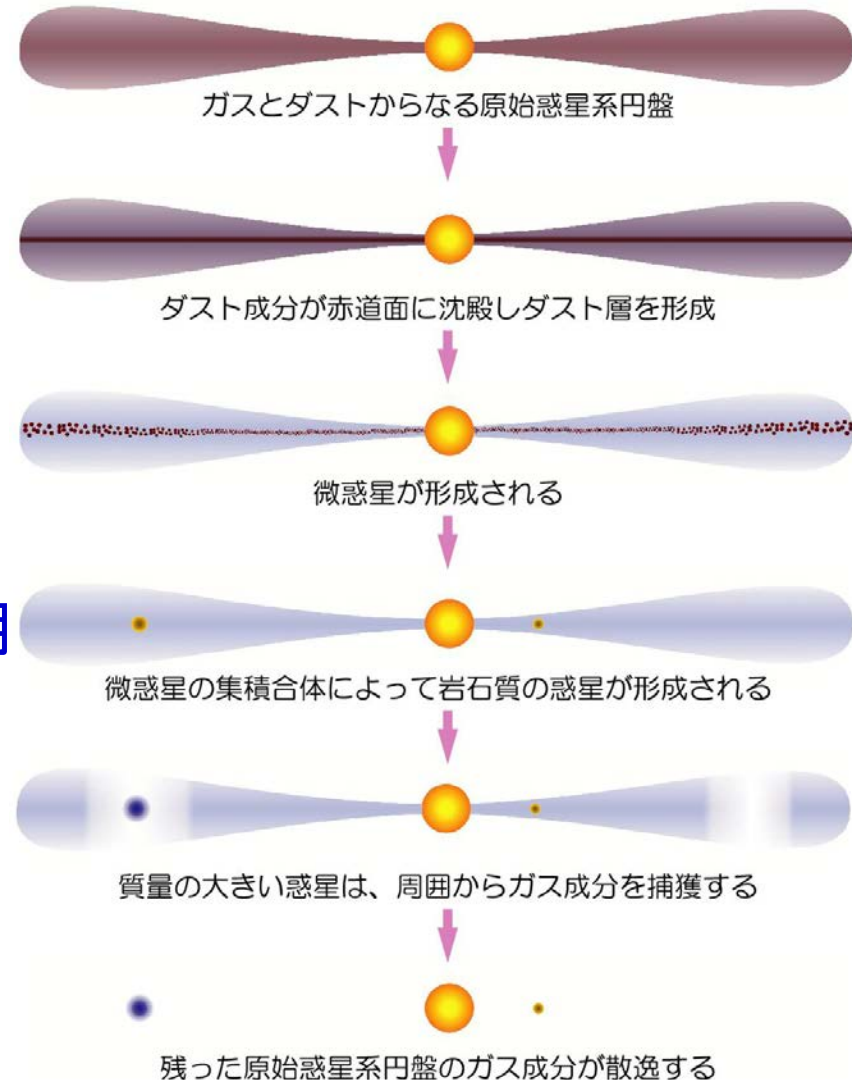
→ 微惑星ができない！

2. もし、原始惑星ができたとしても、時間をかけて中心星に落下する！

質量の大きなガス円盤との相互作用

→ 惑星ができてでも失われる！

惑星系形成の標準的なシナリオ（京都モデル）



これまでの惑星形成理論は正しいのか？

1970年代 標準モデル(京都モデル)が生まれる

1980年代 電波天文学により星形成の現場が
観測される

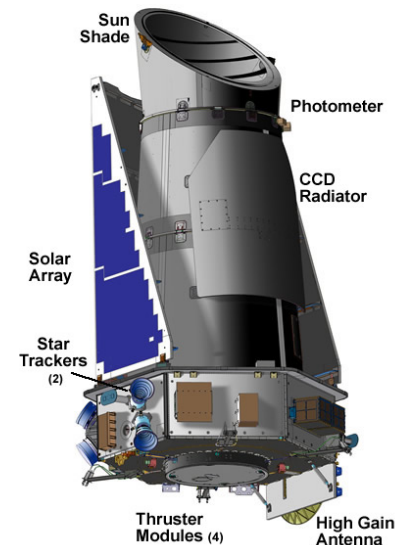
1990年代 **原始惑星系円盤**が直接観測される

1995年 **系外惑星**の発見

2009年 ケプラー宇宙望遠鏡打上げ

現在 発見された系外惑星は**2千個以上!**

**惑星形成論は急速な展開期
を迎えている!**



最近の発見

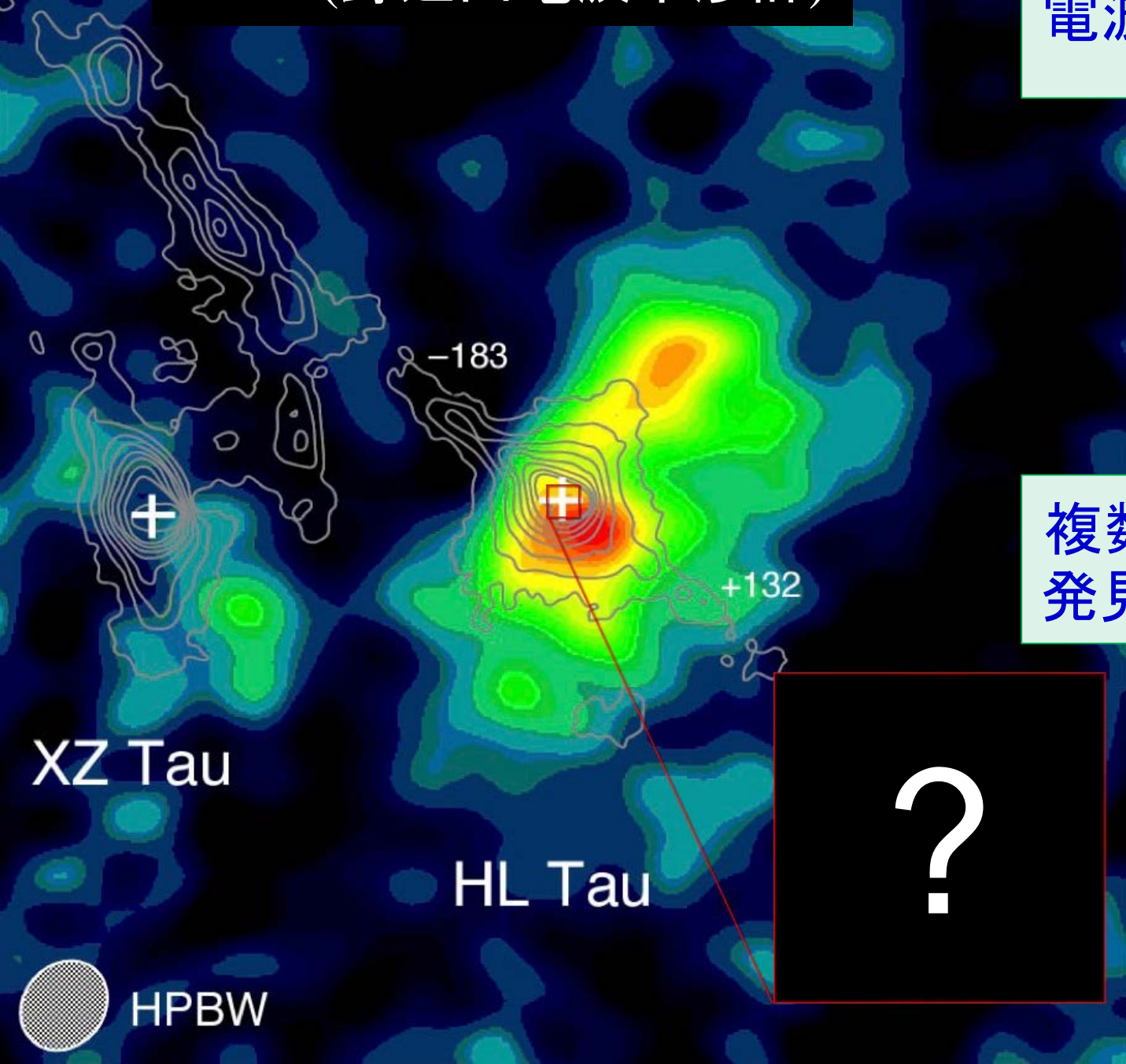
ALMA望遠鏡＝日米欧が南米チリに建設したある電波干渉計



-210

NMA (野辺山電波干渉計)

電波望遠鏡による



複数リング構造の
発見(2014年11月)

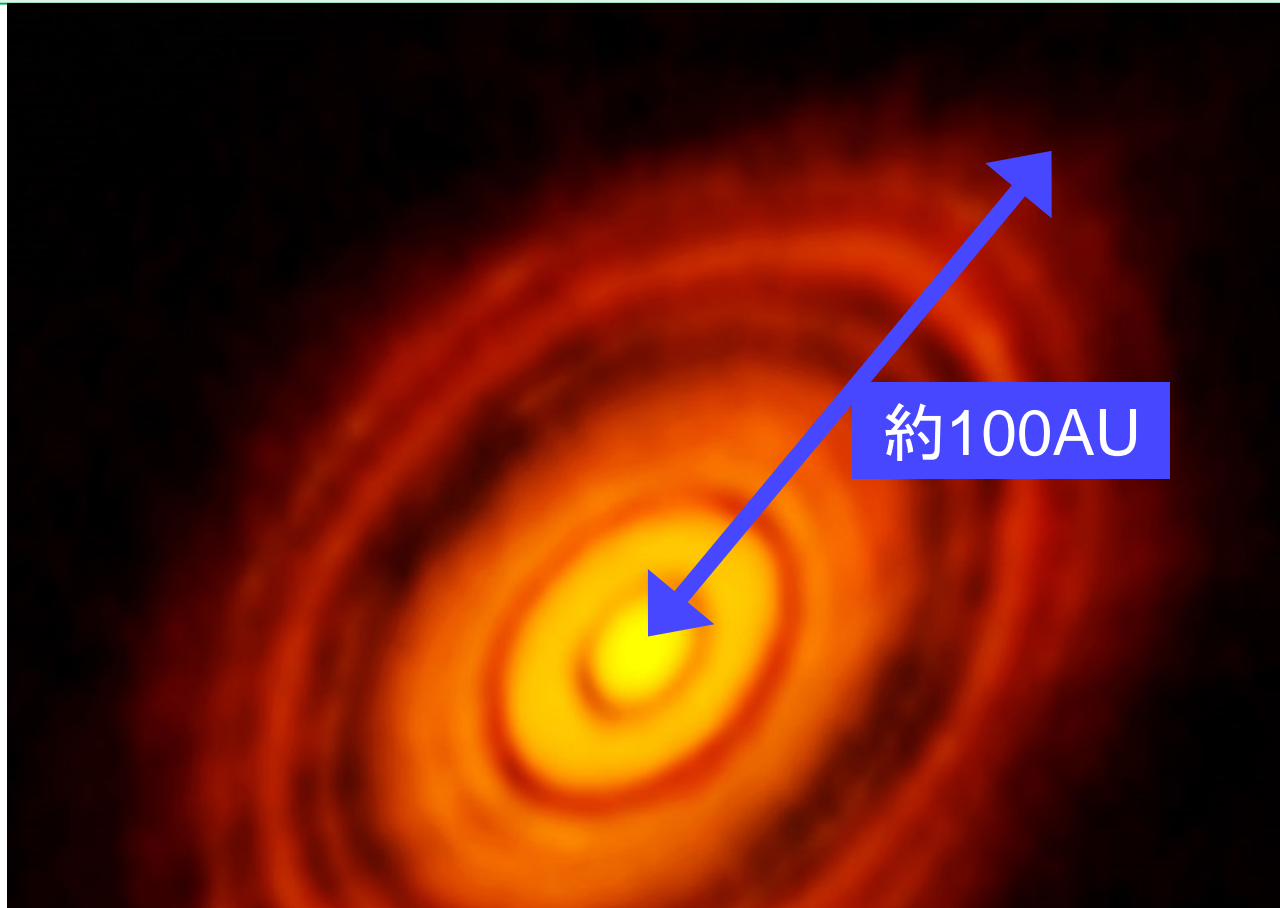
?

XZ Tau

HL Tau

HPBW

複数リング構造の発見(2014年11月)



約100AU

ALMAが発見
した縞々模様
の幅は約10AU

複数リング構造の予言(2014年9月)

The Astrophysical Journal, 794:55 (7pp), 2014 October 10

doi:10.1088/0004-637X/794/1/55

© 2014. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

TWO-COMPONENT SECULAR GRAVITATIONAL INSTABILITY IN A PROTOPLANETARY DISK: A POSSIBLE MECHANISM FOR CREATING RING-LIKE STRUCTURES

Sanemichi Z. Takahashi^{1,2} and Shu-ichiro Inutsuka¹

¹ Department of Physics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602,
Japan; takahashi.sanemichi@a.mbox.nagoya-u.ac.jp, inutsuka@nagoya-u.jp

² Department of Physics, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku,
Kyoto 606-8502, Japan; sanemichi@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

Received 2013 December 25; accepted 2014 July 28; published 2014 September 24

4.3. Ring Structure Formation in Protoplanetary Disks

Observations of protoplanetary disks show that ring structures form at a radius of about **100 AU**. We evaluate the most unstable wavelength and the growth timescale of the instability at a radius of 100 AU for the case of a $1 M_{\odot}$ central star, a temperature of 28 K, and a dust stopping time $t_{\text{stop}} = t_{\text{stop, crit}} = 1.3 \times 10^{-1} \Omega^{-1}$. We assume the case $Q = 3$, corresponding to a marginally gravitationally stable disk, a high dust-to-gas mass ratio, $\epsilon = 0.1$, and $\alpha = 4 \times 10^{-4}$. These parameters correspond to $\eta = 10^{-2}$. Then, the most unstable wavelength is about **13 AU** and the growth timescale is about 2×10^4 yr. These results are consistent with observation because the disk lifetime is about 10^6 yr and the observed ring width is a few tens of AU. The dust radius that corresponds to a stopping time $t_{\text{stop}} = 0.13 \Omega^{-1}$ in this disk is about 4 mm.

永年重力不安定性
ALMAのプレス・リ
リースの1カ月以上
前_前に出版済み
→ デブリ円盤の起
源を説明

Many Theory Papers on HL-Tau!

Takahashi & SI 2014: “Prediction from SGI”

Zhang+2015: “Dust Growth”

Okuzumi+2015: “Dust Growth/Destruction and Migration”

Kanagawa+2015: “Gaps by Planets”

Dipierro+2015: “SPH Simulation of Planets”

Jin+2016: “Gaps by Planets”

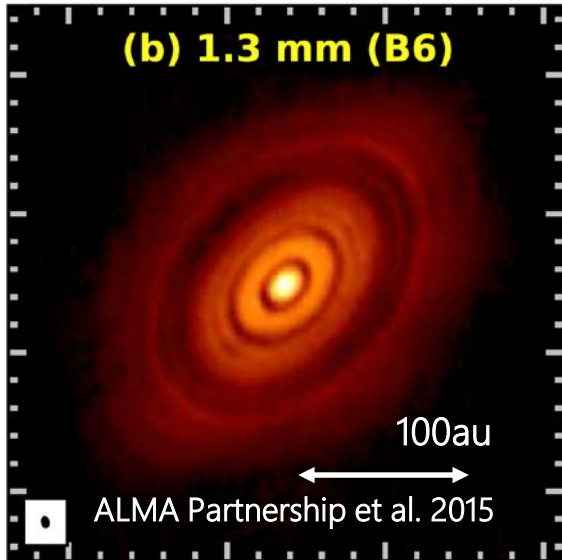
and possibly more!

Focus on SGI in this talk!

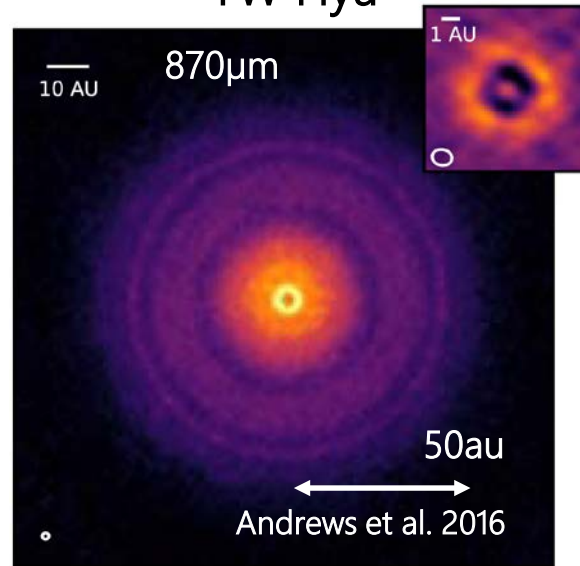
原始惑星系円盤における多重リング構造

ALMA望遠鏡による円盤観測

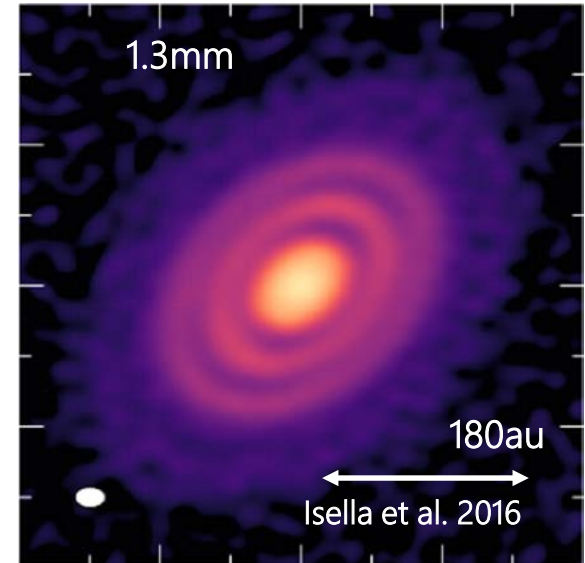
HL Tau



TW Hya

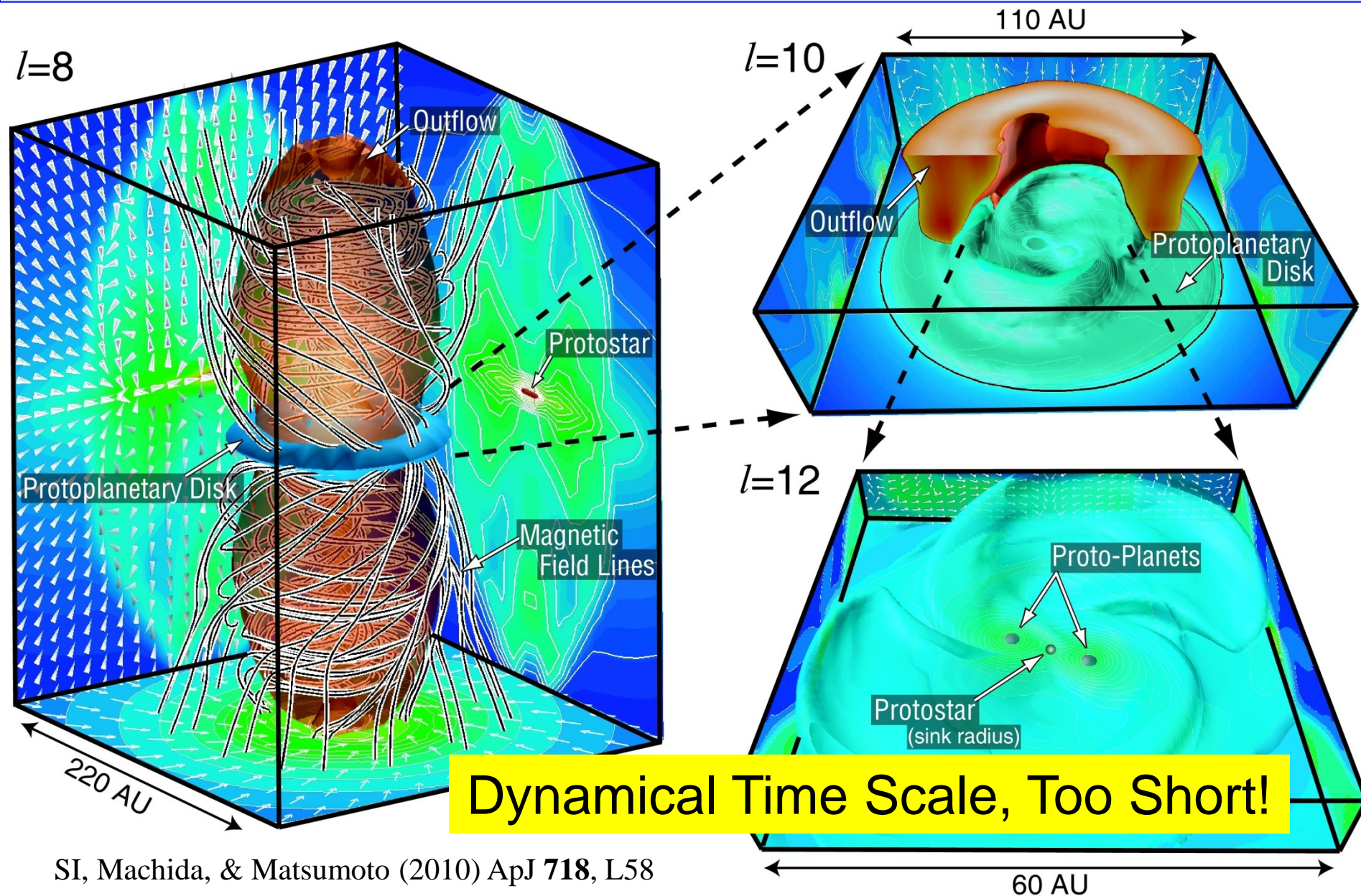


HD 163296



	HL Tau	TW Hya	HD 163296	
Age	< 1 - 2 Myr	~10 Myr	5 Myr	
Mass of Central Star	~ 1.3 M _{sun}	~ 0.8 M _{sun}	~ 2.3 M _{sun}	
# of Rings	7 bright rings	5 gaps	3 gaps	

Resistive MHD Calc. from Mole. Cloud Core



SI, Machida, & Matsumoto (2010) ApJ 718, L58

Many Papers by Machida et al.

What Mechanism for Rings?

Possible Mechanism

- Variety of Secular (Grav.) Instabilities (SGIs)

– *Ward 2000, Youdin 2011, Michikoshi, Kokubo, & SI 2012*

Timescale should be $>10^{4\sim5}\text{yr}$! $\leftrightarrow T_{\text{disk}}=1\text{Myr}$

← Various Types of Dissipation

1) Turbulent Viscosity (α)

2) Friction between Gas and Dust

SGI for 2-Component System

Takahashi & SI (2014) ApJ 794, 55

Takahashi & SI (2016) AJ 152, 184

SGI for 2-Component System

Gas

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma \mathbf{u}) = 0,$$

$$\Sigma \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) = -c_s^2 \frac{\partial \Sigma}{\partial x_i} - \Sigma \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Phi - \frac{GM_*}{r} \right) + \frac{\Sigma_d (v_i - u_i)}{t_{\text{stop}}} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\Sigma v \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right].$$

Σ : surface density

\mathbf{u} : velocity

Φ : gravitational potential

c_s : sound speed

Interaction between gas and dust

Dust

$$\frac{\partial \Sigma_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_d \mathbf{v}) = D \nabla^2 \Sigma,$$

$$\Sigma_d \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -c_d^2 \nabla \Sigma_d - \Sigma_d \nabla \left(\Phi - \frac{GM_*}{r} \right) + \frac{\Sigma_d (\mathbf{u} - \mathbf{v})}{t_{\text{stop}}}$$

Poisson eq.

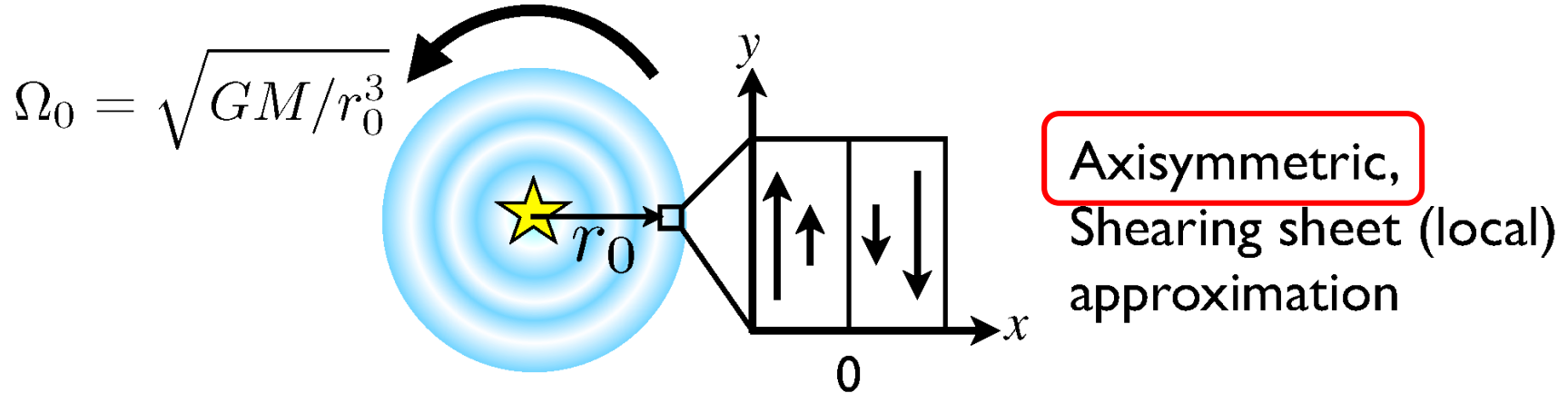
$$\nabla^2 \Phi_{\text{self}} = 4\pi G (\Sigma + \Sigma_d) \delta(z),$$

Σ_d : surface density

\mathbf{v} : velocity

D : dust diffusivity

SGI for 2-Component System



Background : $\Sigma_0, \Sigma_{d0} = \text{const},$

$$u_{x0} = v_{x0} = 0,$$

Kepler rotation

$$\begin{aligned} u_{y0} = v_{y0} &= \sqrt{GM/(r_0 + x)} - \Omega_0(r_0 + x) \\ &= (-3/2)\Omega_0 x \quad (r_0 \gg x) \end{aligned}$$

Perturbations : $\propto \exp[nt + ikx]$

$$n = -i\omega : \text{growth rate}$$

SGI for 2-Component System

$$-i\omega\delta\Sigma + ik\Sigma_0\delta u_x = 0,$$

$$-i\omega\delta u_x - 2\Omega\delta u_y = -c_s^2 \frac{ik\delta\Sigma}{\Sigma_0} - ik\delta\Phi_{\text{self}} + \frac{\epsilon(\delta v_x - \delta u_x)}{t_{\text{stop}}},$$

$$-i\omega\delta u_y + \frac{\Omega}{2}\delta u_x = \frac{\epsilon(\delta v_y - \delta u_y)}{t_{\text{stop}}},$$

$$-i\omega\delta\Sigma_d + ik\epsilon\Sigma_0\delta v_x = 0,$$

$$-i\omega\delta v_x - 2\Omega\delta v_y = -c_d^2 \frac{ik\delta\Sigma_d}{\epsilon\Sigma_0} - ik\delta\Phi_{\text{self}} + \frac{\delta u_x - \delta v_x}{t_{\text{stop}}},$$

$$-i\omega\delta v_y + \frac{\Omega}{2}\delta v_x = \frac{\delta u_y - \delta v_y}{t_{\text{stop}}},$$

$$\delta\Phi_{\text{self}} = -\frac{2\pi G}{|k|}(\delta\Sigma + \delta\Sigma_d)$$

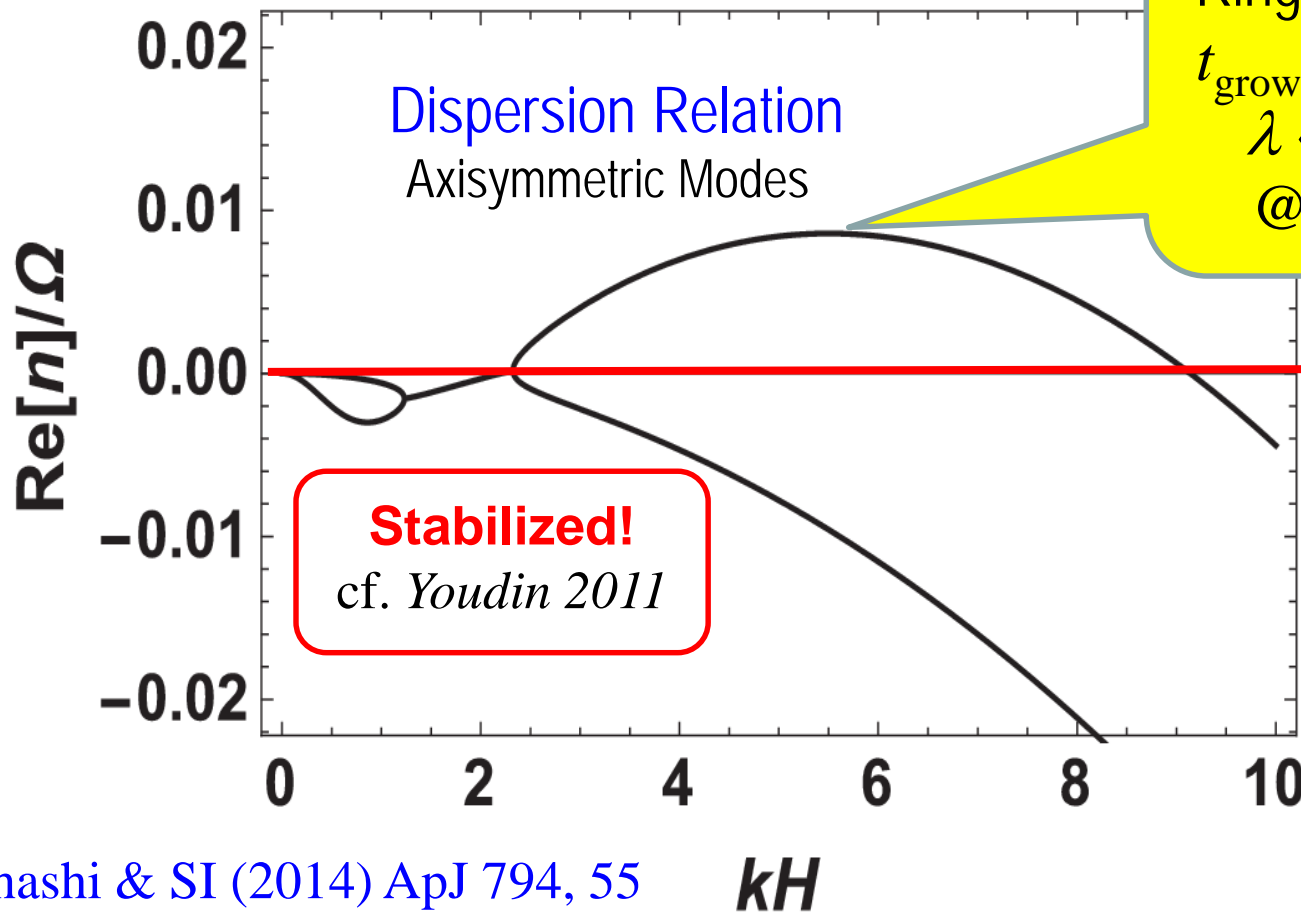
1 Unstable Mode
among 6 different
dynamical modes

SIGI for 2-Component System ($\alpha=10^{-4}$)

+ Effects of Turbulent Diffusion and Finite Disk Thickness

$$t_{\text{stop}}\Omega = 10^{-2}, \quad \alpha=10^{-4}, \quad Q=\Omega c_s/(\pi G \Sigma)=3, \quad \varepsilon=0.1$$

a few mm



Takahashi & SI (2014) ApJ 794, 55

kH

Origin for $\alpha=10^{-4}$ (Okuzumi & SI 2015, ApJ 800, 47; Mori & Okuzumi 2016)

Recommended Parameters in 2014

The Astrophysical Journal, 794:55 (7pp), 2014 October 10

doi:10.1088/0004-637X/794/1/55

© 2014. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

TWO-COMPONENT SECULAR GRAVITATIONAL INSTABILITY IN A PROTOPLANETARY DISK: A POSSIBLE MECHANISM FOR CREATING RING-LIKE STRUCTURES

Sanemichi Z. Takahashi^{1,2} and Shu-ichiro Inutsuka¹

¹ Department of Physics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602, Japan; takahashi.sanemichi@a.mbox.nagoya-u.ac.jp, inutsuka@nagoya-u.jp

² Department of Physics, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan; sanemichi@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

Received 2013 December 25; accepted 2014 July 28; published 2014 September 24

4.3. Ring Structure Formation in Protoplanetary Disks

Observations of protoplanetary disks show that ring structures form at a radius of about 100 AU. We evaluate the most unstable wavelength and the growth timescale of the instability at a radius of 100 AU for the case of a $1 M_{\odot}$ central star, a temperature of 28 K, and a dust stopping time $t_{\text{stop}} = t_{\text{stop, crit}} = 1.3 \times 10^{-1} \Omega^{-1}$. We assume the case $Q = 3$, corresponding to a marginally gravitationally stable disk, a high dust-to-gas mass ratio, $\epsilon = 0.1$, and $\alpha = 4 \times 10^{-4}$. These parameters correspond to $\eta = 10^{-2}$. Then, the most unstable wavelength is about 13 AU and the growth timescale is about 2×10^4 yr. These results are consistent with observation because the disk lifetime is about 10^6 yr and the observed ring width is a few tens of AU. The dust radius that corresponds to a stopping time $t_{\text{stop}} = 0.13 \Omega^{-1}$ in this disk is about 4 mm.

Growth Timescale
 $= 2 \times 10^4 \text{ yr}$

$$t_{\text{grow}} < t_{\text{migrat}}$$

Ideal for HL-Tau?

From Observation of HL-Tau

Exponentially Cut-Off Disk (Kwon+2015)

$$T(r) = 30 \left(\frac{r}{20 \text{ [AU]}} \right)^{-0.65} \text{ [K]}$$

$$\Sigma_d(r) = 0.51 \left(\frac{r}{80 \text{ AU}} \right)^{0.2} \exp \left[- \left(\frac{r}{80 \text{ AU}} \right)^{1.8} \right] \text{ g cm}^{-2}$$

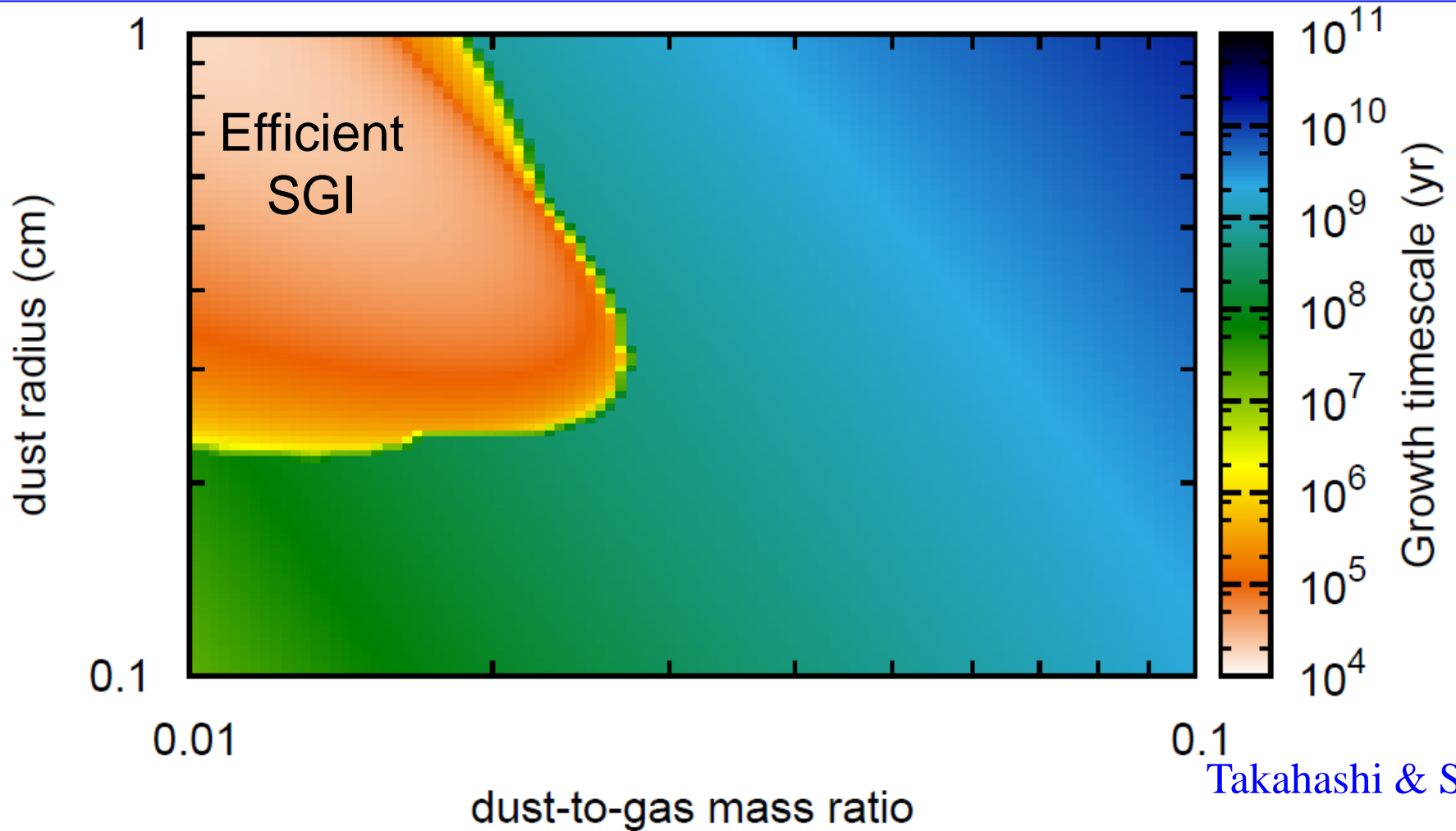
Power-Law Disk (Kataoka+2015)

$$T = 280 \left(\frac{r}{1 \text{ [AU]}} \right)^{-0.3} \text{ [K]}$$

$$\Sigma_d(r) = 4.15 \left(\frac{r}{1 \text{ AU}} \right)^{-0.3} \text{ g cm}^{-2}$$

$$\alpha \lesssim 3 \times 10^{-4} \text{ (e.g., Pinte+2015)}$$

Case for HL-Tau with $\alpha = 3 \times 10^{-4}$



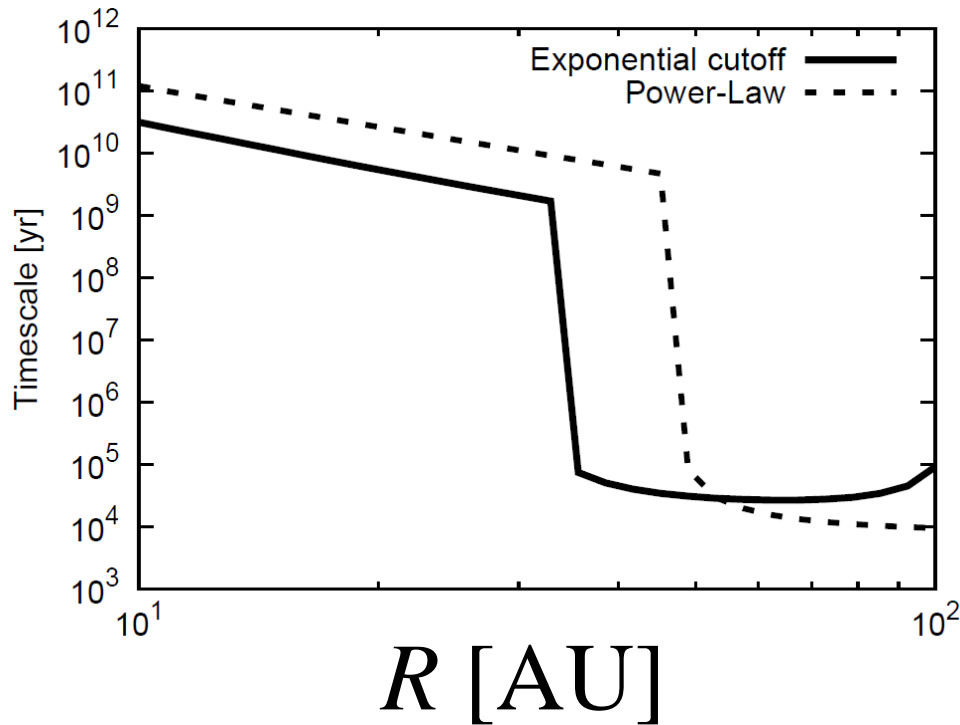
Takahashi & SI

(arXiv:1604.05450)

SGI for Dust Size, $a \gtrsim 2$ mm &
Dust-to-Gas Ratio, $\epsilon \lesssim 0.03$

SGI: Dependence on Turbulent Mixing

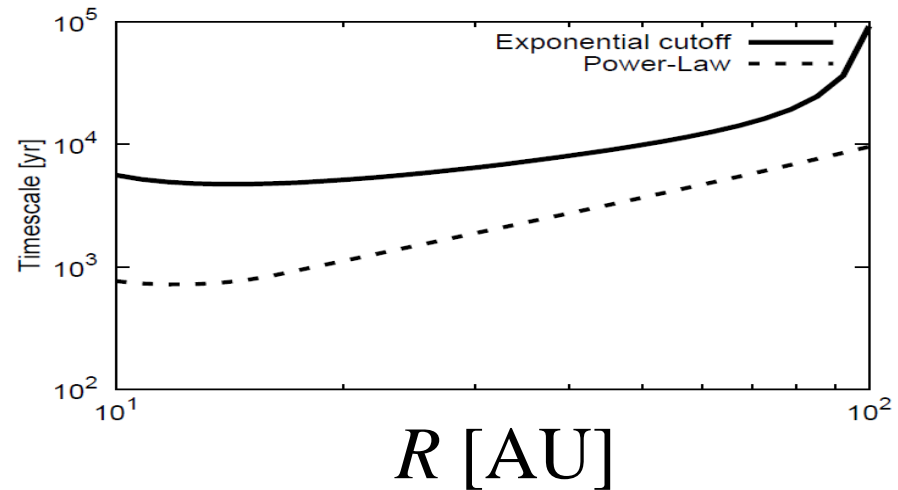
$$\alpha = 3 \times 10^{-4} (r/100 \text{AU})^2$$



**SGI only in
Outer Region!**

Lower Turbulent Mixing

$$\alpha = 3 \times 10^{-4} (r/100 \text{AU})^3$$

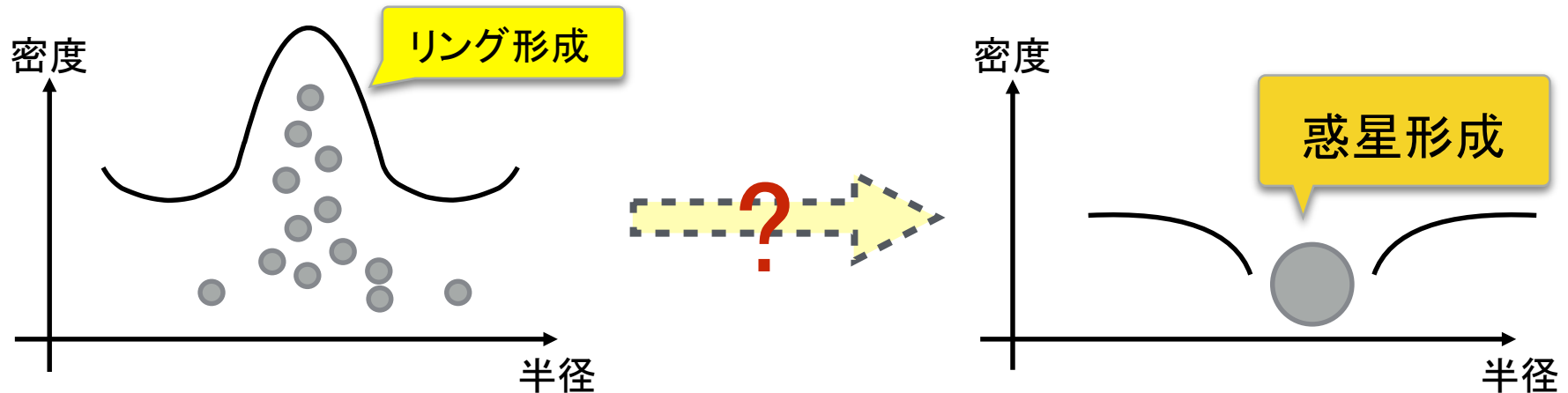


SGI in whole disk!

永年重力不安定性 (Secular GI) の非線形段階は？

Takahashi & Inutsuka (2016)

- 線形解析の結果, Secular GIによるリング形成がHL Tauで起きうる
- リング形成から起こる惑星形成を示唆
- より詳細な解析には数値計算が必要



非線形計算の目的

数値計算によってSecular GIの
非線形成長とリング形成機構を解明する

数値計算法

Secular GIの数値計算の困難

- 成長時間が円盤の回転周期よりかなり長い
- 摩擦 = 散逸 によって成長



数値誤差の蓄積によってSecular GIがかき消される

本研究

長時間流体計算法

- ✓ Lagrange mesh法
空間差分による数値散逸を回避
- ✓ Symplectic法
時間積分による数値散逸を回避

散逸系への応用

- ✓ 区分厳密解法を用いた摩擦の計算

Symplectic method for fluid dynamics

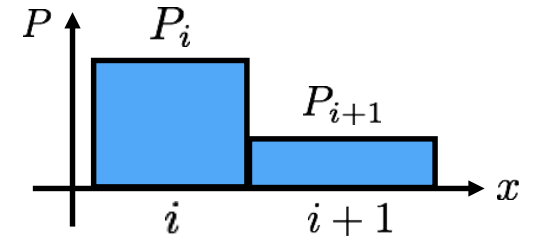
Formulation based on the action principle

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad \longrightarrow \quad \text{Eq. of Motion}$$

$$L = \int dV \left[\rho \left(\frac{\dot{\mathbf{x}}^2}{2} - u \right) \right] \quad \begin{array}{l} \rho : \text{Density} \\ u : \text{Specific internal density} \end{array}$$

$$L = \sum_{i=1}^{N-1} \left(m_{i+1/2} \frac{\dot{x}_{i+1/2}^2}{2} \right) - \sum_{i=1}^N m_i u_i$$

$$m_{i+1/2} = (m_i + m_{i+1})/2$$

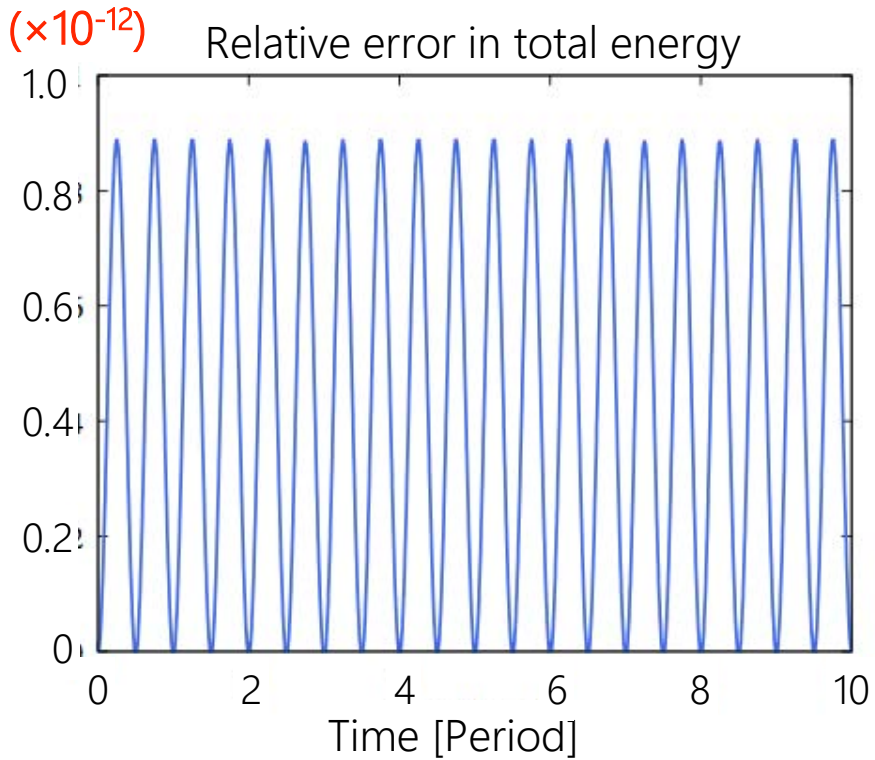


m_i : Mass defined at i -th cell

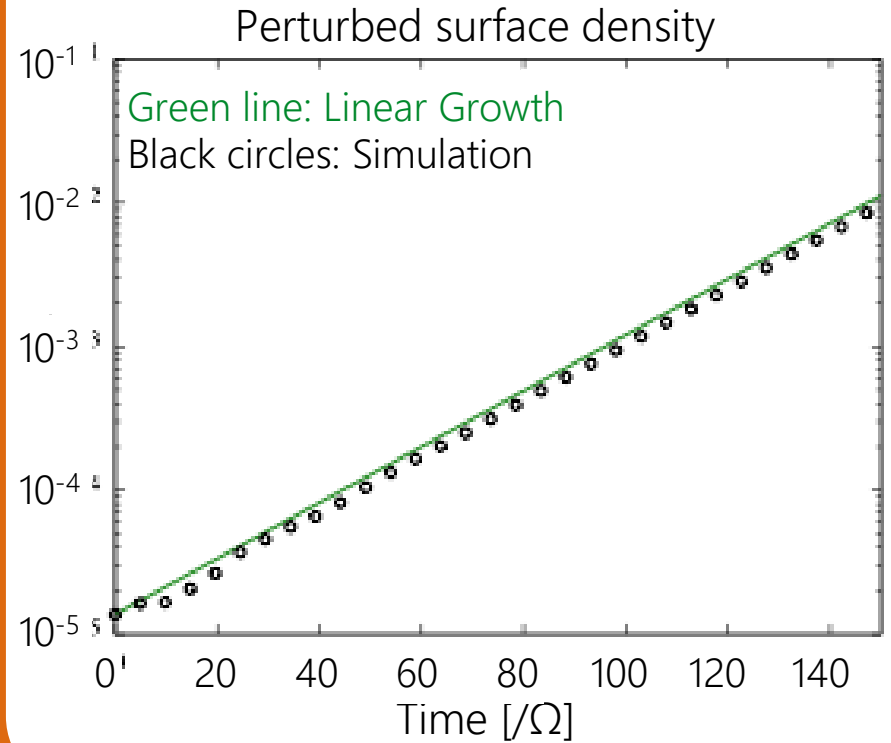
$$m_{i+1/2} \ddot{x}_{i+1/2} = -(P_{i+1} - P_i) \quad : \text{Eq. of motion of Cell}$$

Test of new symplectic scheme

Propagation of plane wave



Slightly unstable GI mode ($Q=0.999$)



The amplitude keeps constant in much longer calculation.

Basic equations

Gas

Σ_g, Σ_d : 面密度

\mathbf{u}, \mathbf{v} : 速度

t_{stop} : ダストのstopping time

$$\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_g \mathbf{u}) = 0$$

$$\Sigma_g \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -c_s^2 \nabla \Sigma_g - \Sigma_g \nabla \left(\Phi - \frac{GM_*}{r} \right) + \frac{\Sigma_d (\mathbf{v} - \mathbf{u})}{t_{\text{stop}}}$$

Dust

$$\frac{\partial \Sigma_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_d \mathbf{v}) = 0$$

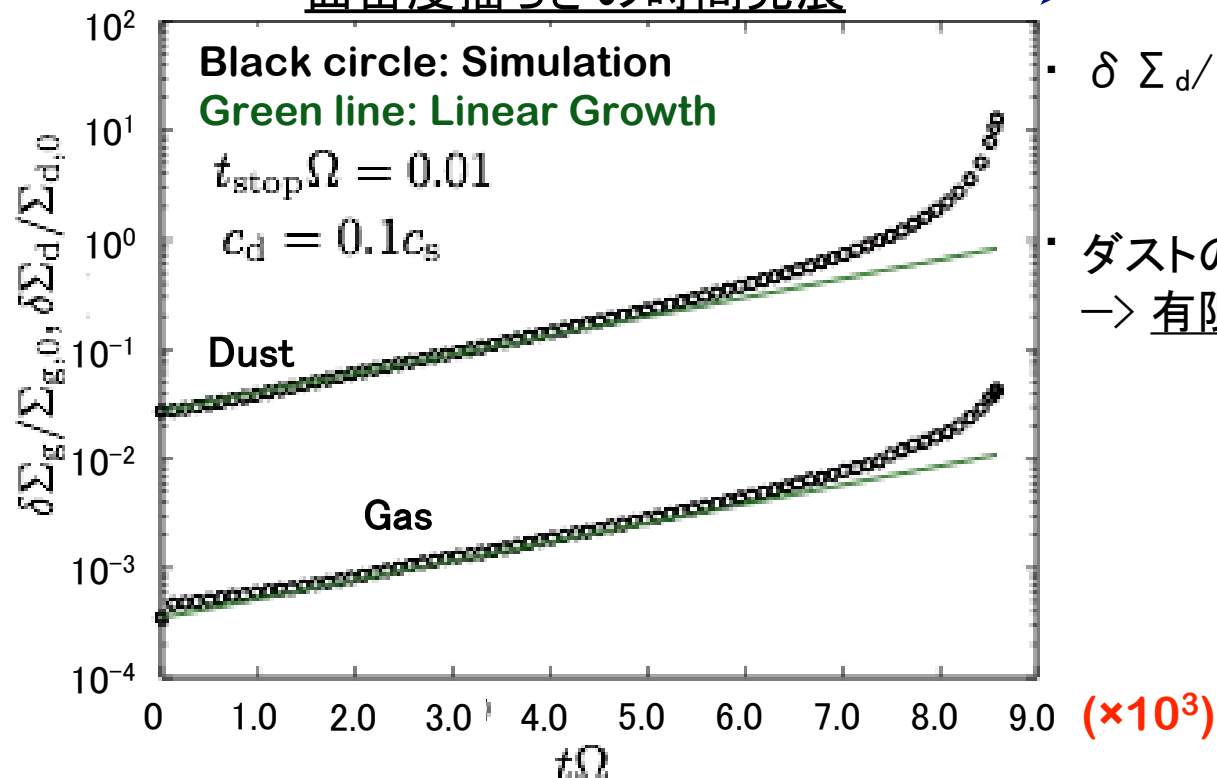
$$\Sigma_d \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -c_d^2 \nabla \Sigma_d - \Sigma_d \nabla \left(\Phi - \frac{GM_*}{r} \right) + \frac{\Sigma_d (\mathbf{u} - \mathbf{v})}{t_{\text{stop}}}$$

Poisson eq. $\nabla^2 \Phi = 4\pi G (\Sigma_g + \Sigma_d) \delta(z)$

- 非線形計算(1): 線形解析との比較
 - 非線形計算(2): 大局的な進化
-

非線形計算と線形解析の比較

面密度揺らぎの時間発展



成長率 $\sim 10^{-4} \Omega$

- $\delta \Sigma_d / \Sigma_d = 0.3$ くらいから非線形成長
- ダストの面密度は発散する傾向
→ 有限の時間でダストリング崩壊

リングの崩壊時刻？

崩壊の速さ？

非線形計算と線形解析の比較

非線形成長が引き起こすリング崩壊

以下の関数を用いてダストの面密度進化をフィッティング:

$$f(\bar{t}) = a(\bar{t}_c - \bar{t})^{-q}, \quad \bar{t} \equiv t n_{\text{SGI}}$$

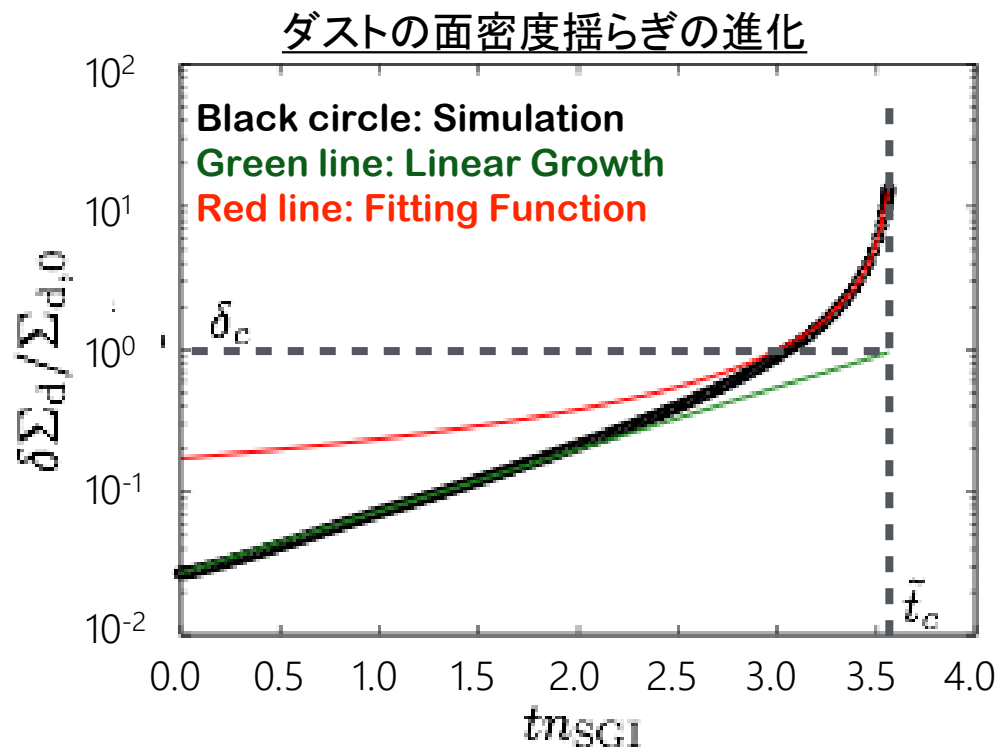
n_{SGI} : 成長率

$\bar{t}_c = t_c n_{\text{SGI}}$: 崩壊時刻

冪 q は崩壊の速さを表す

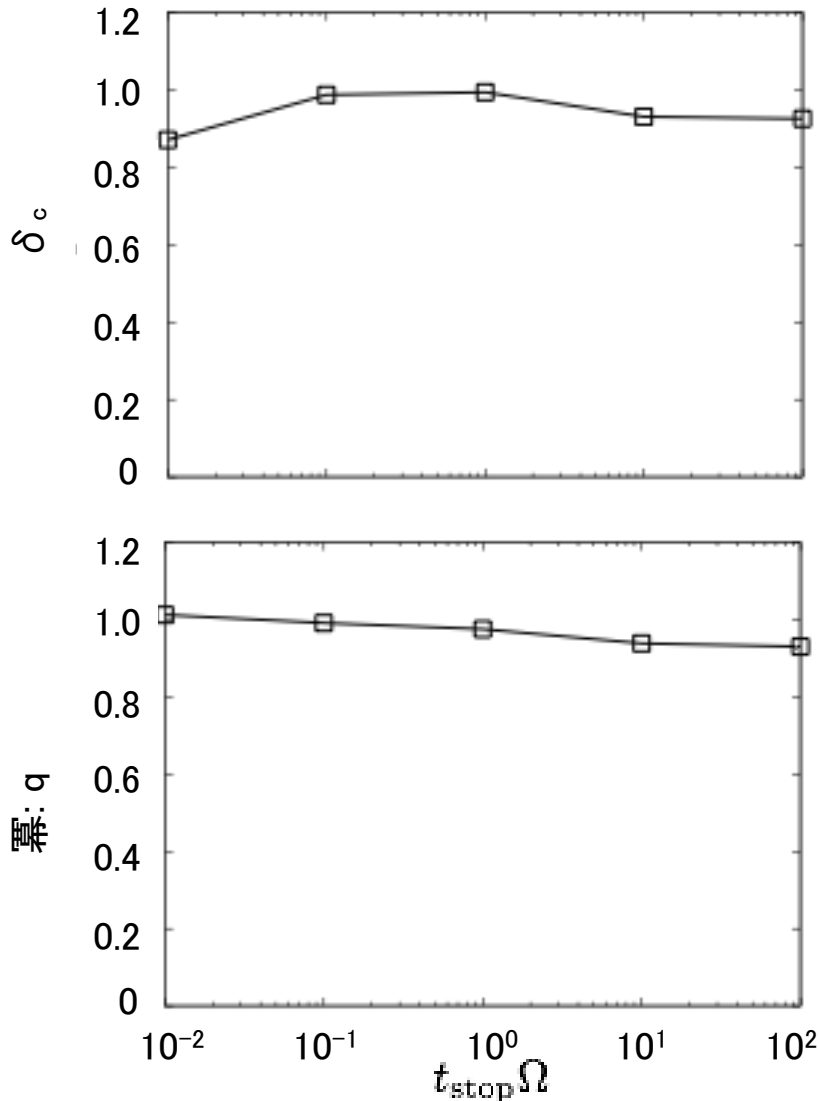
$t=t_c$ まで線形成長したと仮定し、 δ_c を用いて“崩壊時刻”を定義する:

$$\delta_c \equiv \delta \Sigma_d(t = t_c) / \Sigma_{d,0}$$



非線形計算と線形解析の比較

非線形成長が引き起こすリング崩壊



$$f(\bar{t}) = a(\bar{t}_c - \bar{t})^{-q}$$

δ_c とqのstopping timeに対する依存性

→ ほとんどない

$$\delta_c \doteq 1, q \doteq 1$$

冪qが1となった結果の解釈・理解

自由落下時間: $t_{\text{ff}} \sim 1/\sqrt{G\rho_d}$

ジーンズ長: $\lambda_J \sim c_d/\sqrt{G\rho_d}$

ダストの面密度:

$$\Sigma_d \sim \rho_d \lambda_J \sim c_d \sqrt{\rho_d/G}$$

$$\longrightarrow \Sigma_d \propto t_{\text{ff}}^{-1}$$

Note: 現実では円盤の厚みによって自己重力が弱められる → 非線形成長の飽和

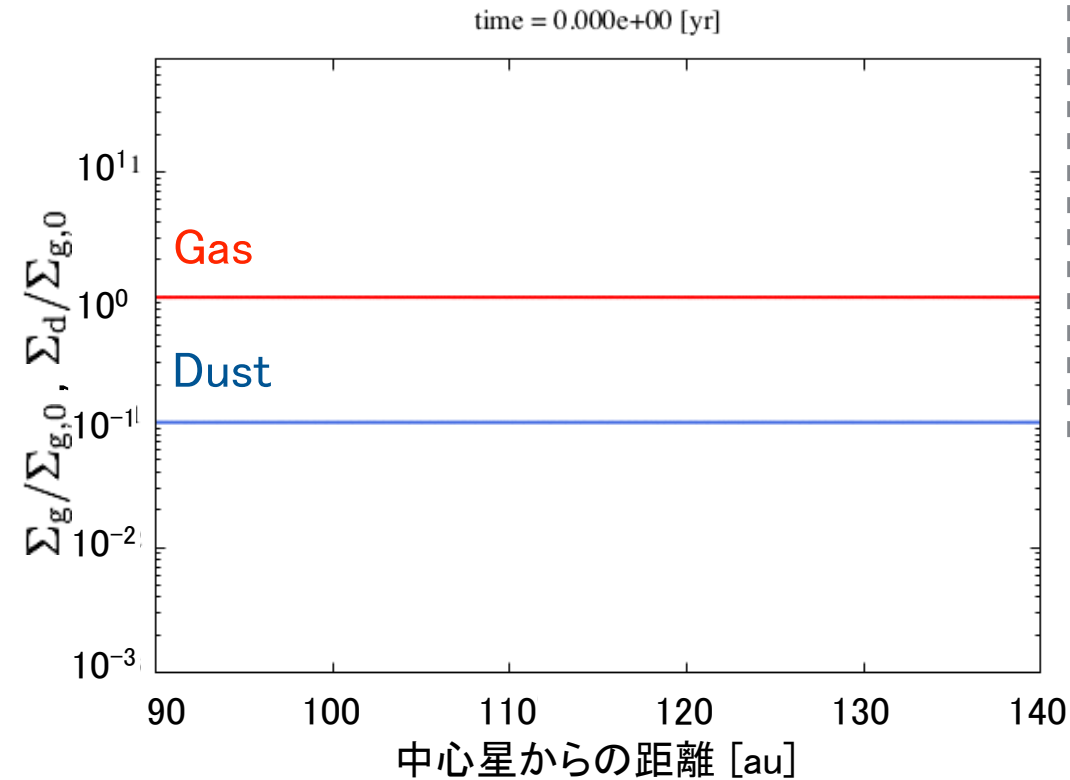
永年重力不安定性の非線形計算

- 非線形計算(1): 線形解析との比較
- 非線形計算(2): 大局的な進化

自己重力のソフトニングで成長が飽和した後に起こるダストリングの進化

永年重力不安定性の大局的な進化

リング形成 & リング落下



計算の設定

中心星質量: $M_* = 1M_\odot$

$\Sigma_{d,0}/\Sigma_{g,0} = 0.1, c_d/c_s = 0.1$

自己重力安定な円盤

($Q=3$ @ $r = 100$ au)

ダストサイズ: 3mm

$\rightarrow t_{\text{stop}} \Omega \doteq 0.23$

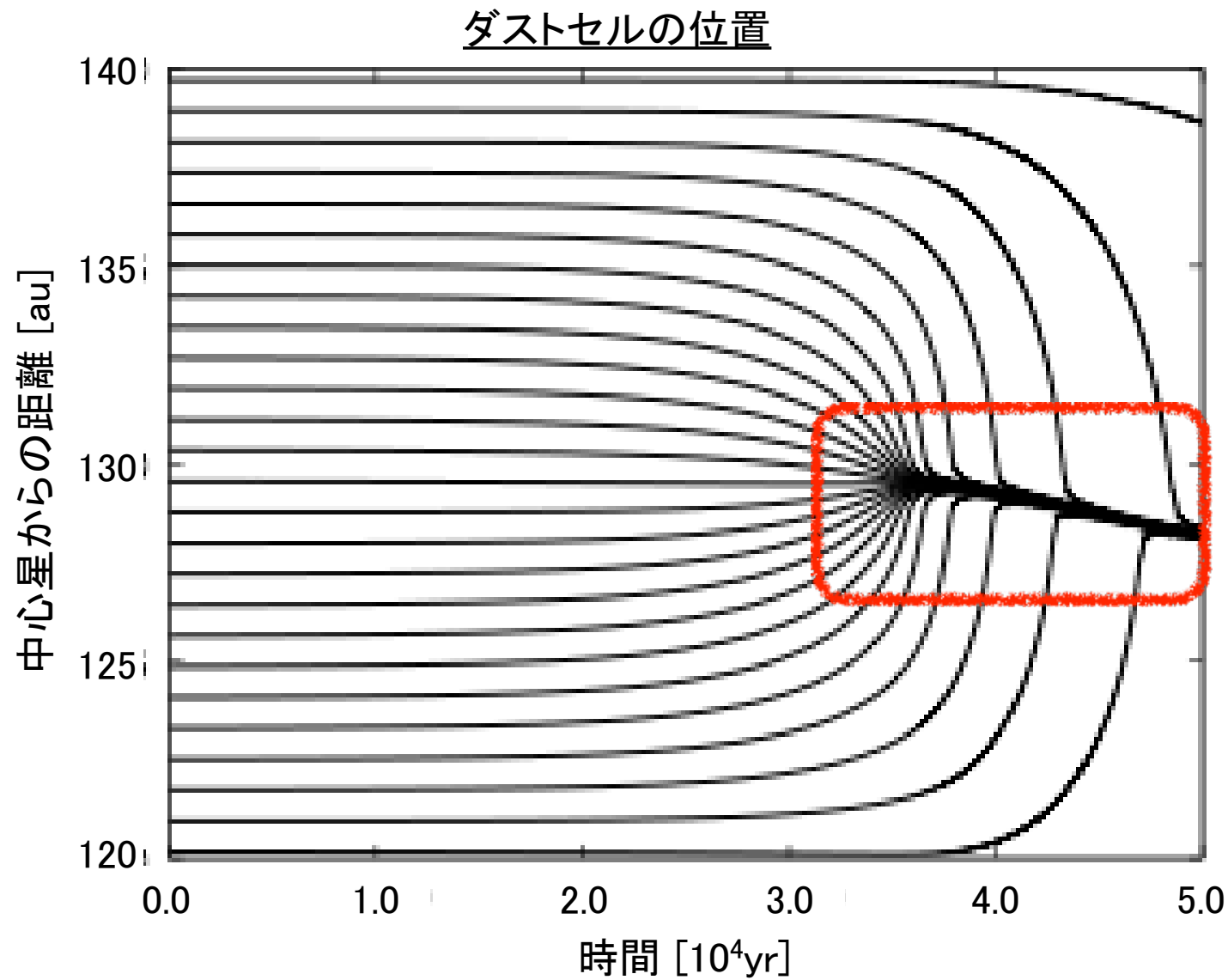
$\Sigma_d/\Sigma_{d,0} \sim 100$ まで成長

($\delta\Sigma_g/\Sigma_{g,0} \sim 0.1$)

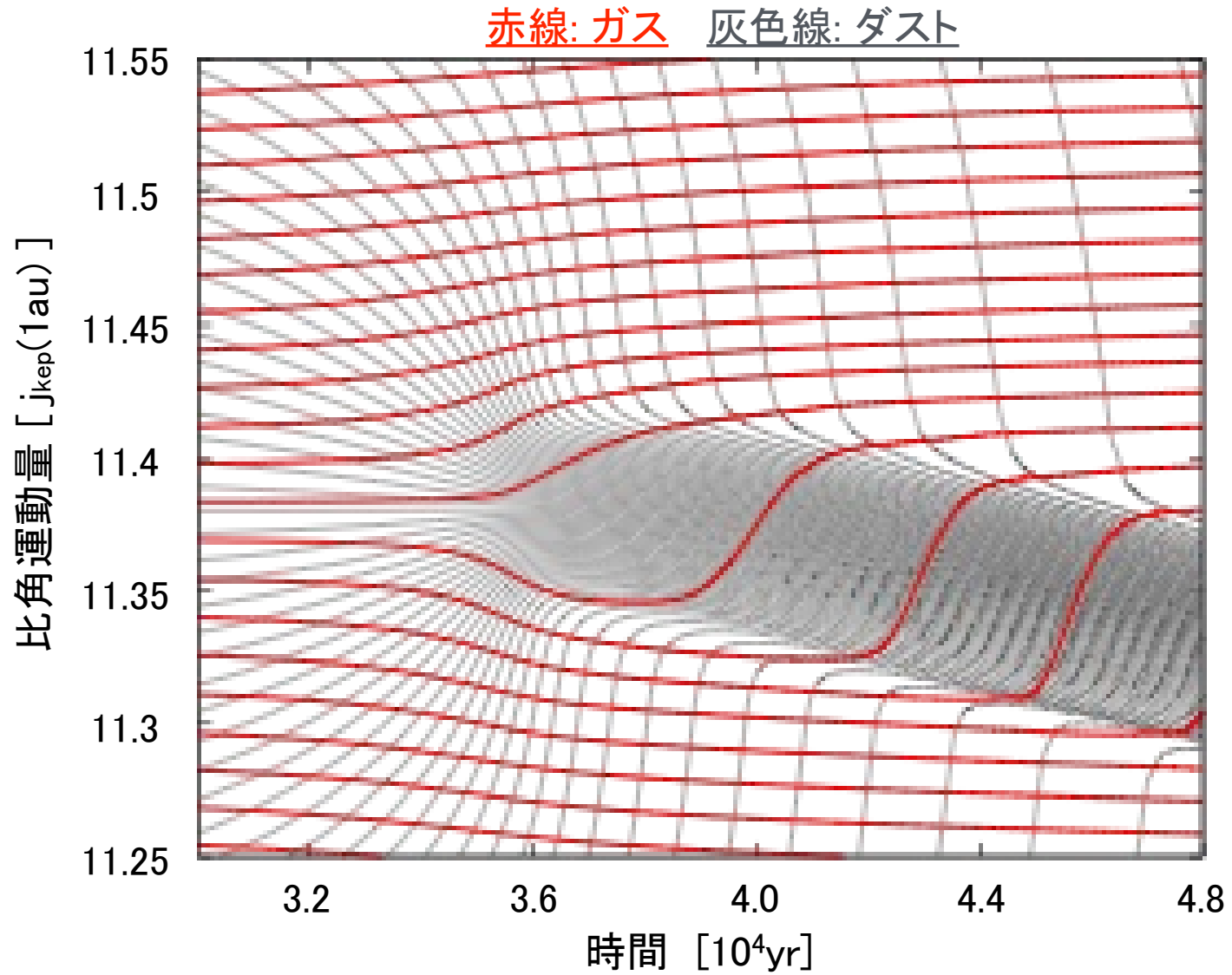
ダストガス比 ~ 10 の
ダストリングを形成

ダスト優勢なリングの形成 \rightarrow 自己重力的分裂による微惑星形成

永年重力不安定性の非線形成長:リング落下

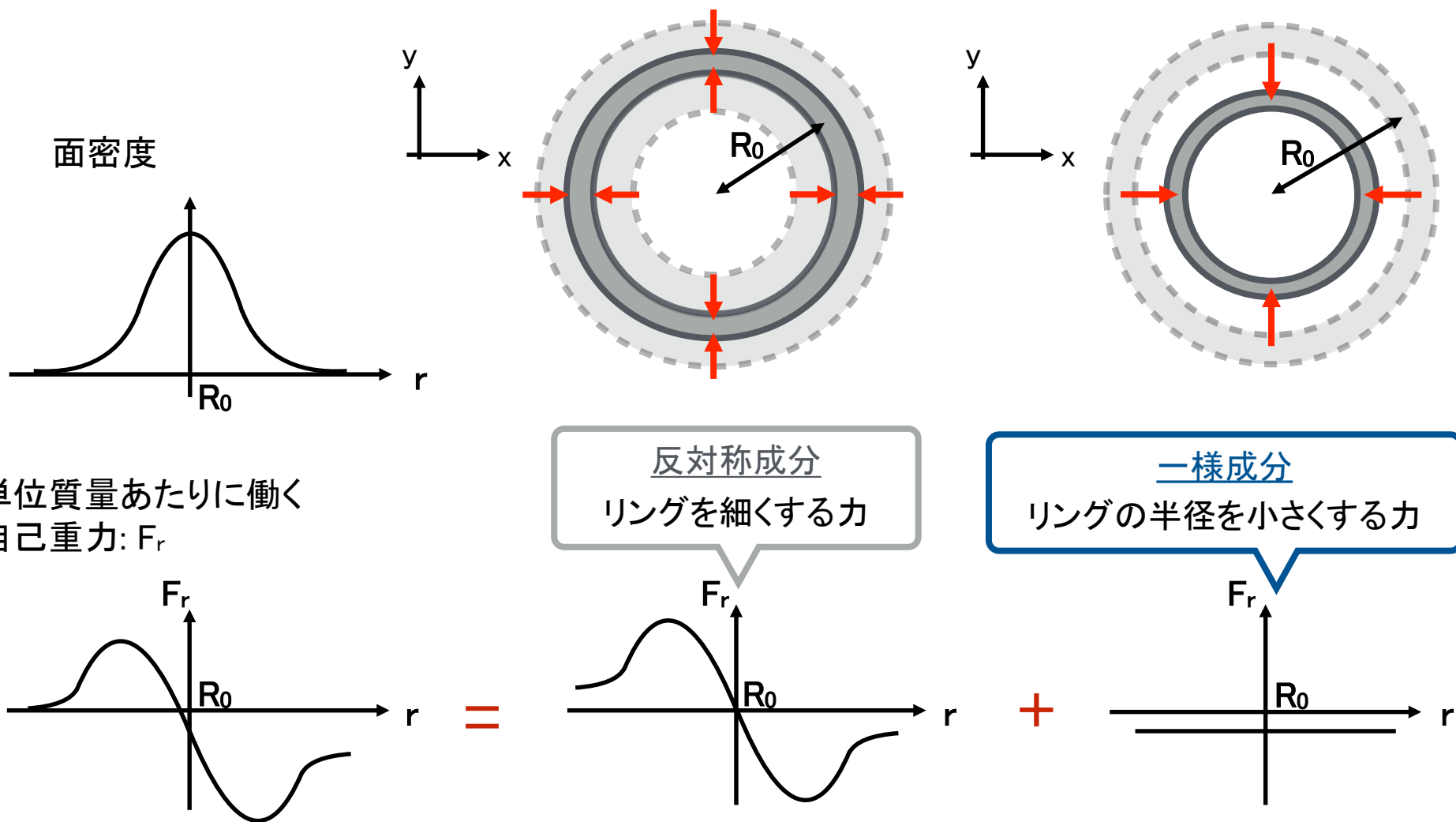


永年重力不安定性の非線形成長: リング落下



リング落下のメカニズム

リング自身の自己重力によって促進される落下



リング落下のメカニズム

仮定1: ガスの動径方向の速度は0

仮定2: ダストは終端速度

$$\frac{v_r}{t_{\text{stop}}} = 2\delta v_{\theta} \Omega_K \dots \dots \dots - \frac{c_d^2}{\Sigma_d} \frac{\partial \Sigma_d}{\partial r} - \frac{\partial \Phi}{\partial r}$$

↓
コリオリ力

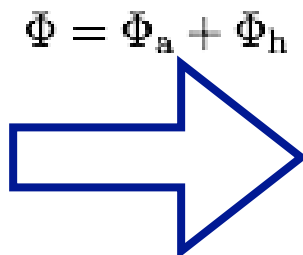
コリオリ力は落下を少し減速するだけ → 落下は次の式で大雑把に理解出来る

$$\frac{v_r}{t_{\text{stop}}} \simeq - \frac{c_d^2}{\Sigma_d} \frac{\partial \Sigma_d}{\partial r} - \frac{\partial \Phi}{\partial r}$$

非線形成長の飽和:

$$- \frac{c_d^2}{\Sigma_d} \frac{\partial \Sigma_d}{\partial r} - \frac{\partial \Phi_a}{\partial r} = 0$$

リング重力の反対称成分

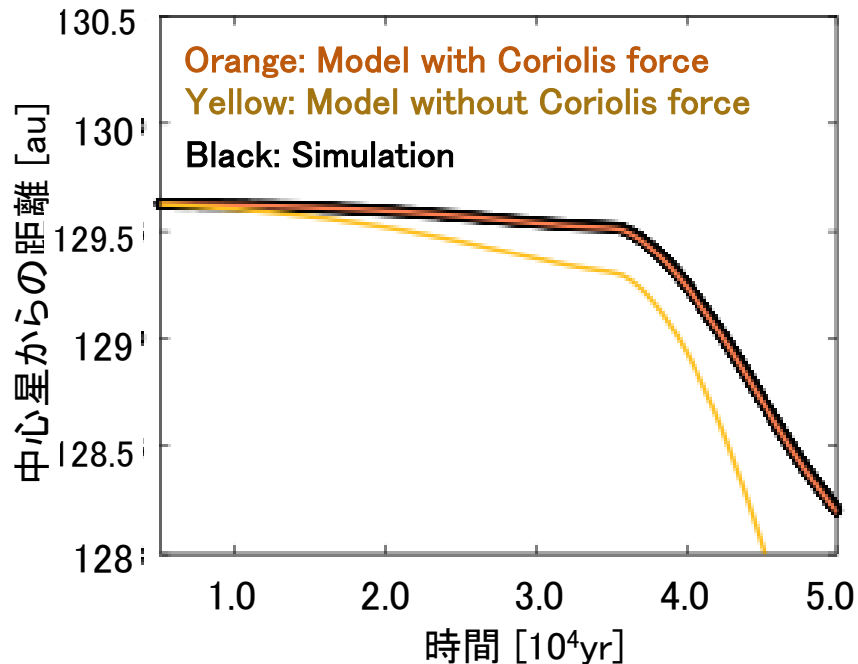


$$\frac{v_r}{t_{\text{stop}}} \simeq - \frac{\partial \Phi_h}{\partial r}$$

リング重力の一様成分

リング落下のメカニズム

リング自身の自己重力によって促進される落下



□ 半解析モデル

- ガスの動径方向の速度 = 0
- ダストの動径方向の速度 v_r : 終端速度
- ダストとガスの回転速度と Kepler速度の差 δv_ϕ δu_ϕ は微小

✓ リングの自己重力の一様成分 + ダストが受ける動径方向の摩擦 $\doteq 0$

$$v_r \simeq -t_{\text{stop}} \frac{\partial \Phi_h}{\partial r} \quad \left(-\frac{\partial \Phi_h}{\partial r} : \text{リングの自己重力の一様成分} \right)$$

リングの自己重力で円盤内側に引っ張られることで落下

ダストリング内での微惑星形成

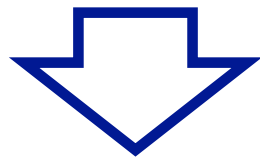
(1) リングの落下速度はおおよそ $10^{-5} - 10^{-4}$ au/yr

(2) 非線形成長の結果ダストガス比が高い(~ 10)リングが形成された

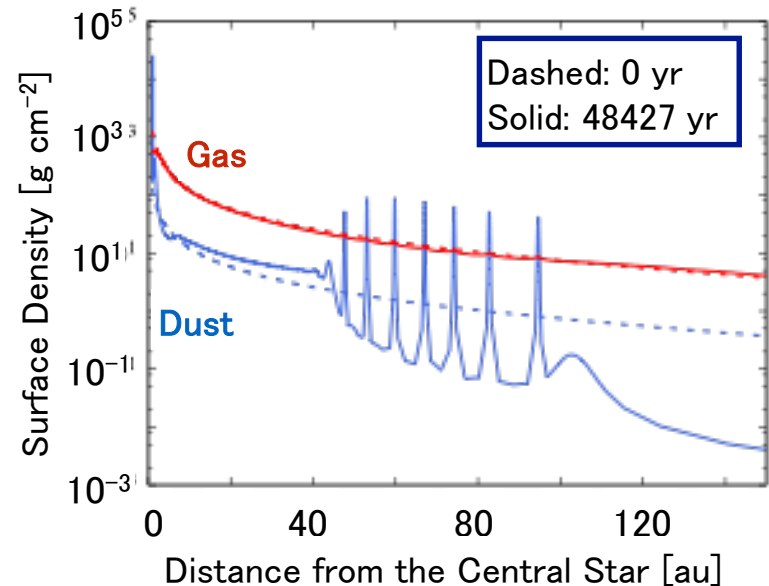
ダストガス比が高いとダストのドリフト速度も低下する

(Nakagawa et al. 1986)

最小質量円盤でダストリングが形成されると
ドリフト速度 \sim リング落下速度
@ダストリング

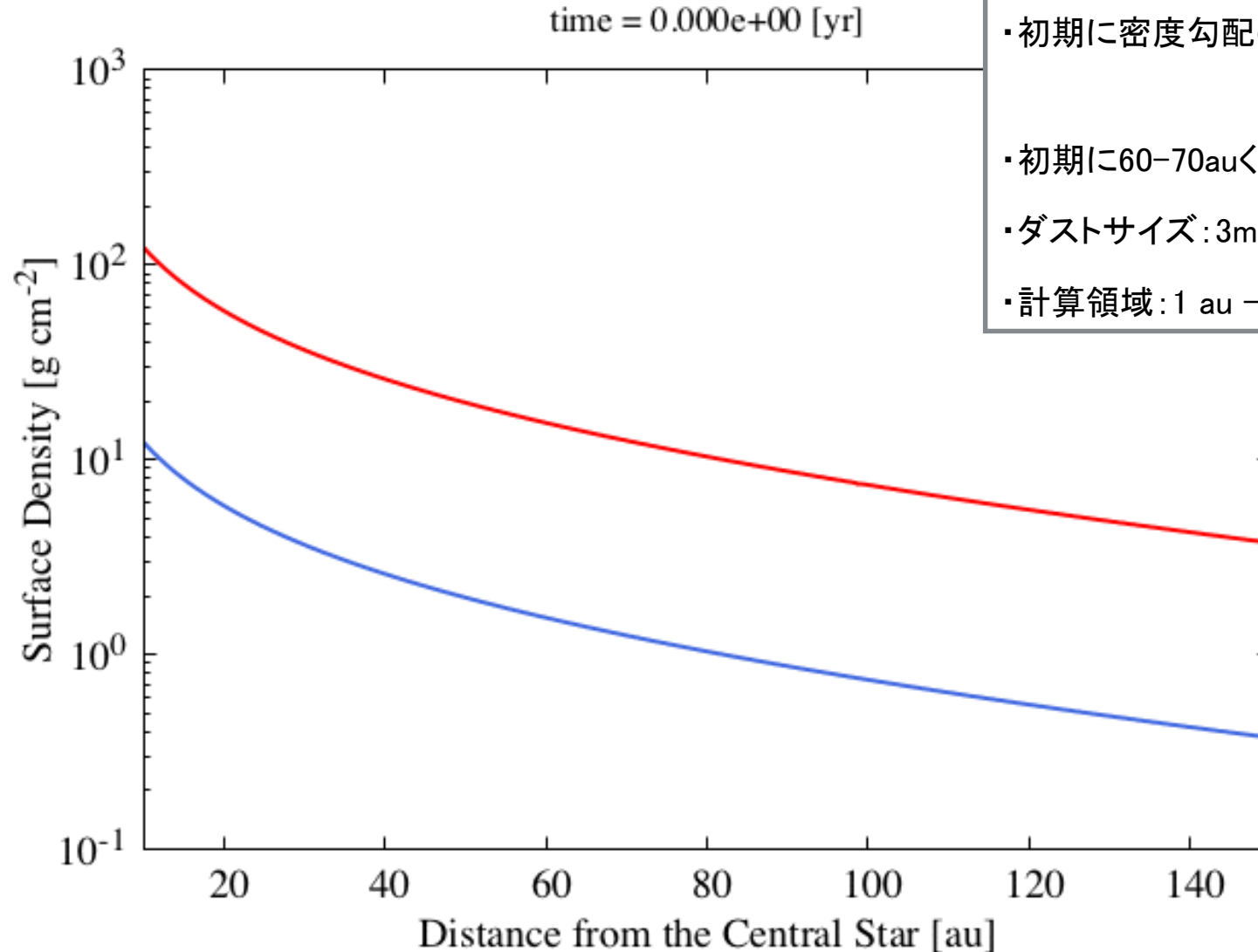


円盤内で永年重力不安定性が成長すれば
非線形成長から微惑星形成に発展する



Preliminary result

初期にダストがドリフトしている円盤でも永年重力不安定性が成長！



・初期に密度勾配のある円盤:

$$\Sigma \propto r^{-1}$$

・初期に60-70auくらいで $Q=3$

・ダストサイズ: 3mm

・計算領域: 1 au - 240 au

非線形解析のまとめと今後の課題

□ まとめ

永年重力不安定性の非線形計算

- ダストが先行して非線形成長: 密度は時間に反比例して進化

$$\Sigma_d \propto t_{\text{ff}}^{-1}$$

- ダスト優勢なリングの形成: ダストガス比が10程度まで成長

→ 自己重力的分裂による微惑星形成に繋がる

- リング自身の重力によってダストリングは落下

$$v_r \simeq -t_{\text{stop}} \frac{\partial \Phi_h}{\partial r}$$

リング落下速度 (~ドリフト速度@ダストリング)は十分遅い

→ ダストの中心星への落下を回避して微惑星形成に繋がる可能性あり

- 初期に大局的な圧力勾配のある円盤での非線形成長

□ 今後の課題

- ガス乱流によるダストの拡散
- ダストのサイズ進化、分布

まとめ

- 標準惑星形成理論の破綻
- 観測の発展
- 星形成論の発展
 - ガスとダストの原始惑星系円盤の形成
 - その中での惑星形成
- SGIによる新しいシナリオの台頭

すばるやALMA望遠鏡による発見のラッシュ