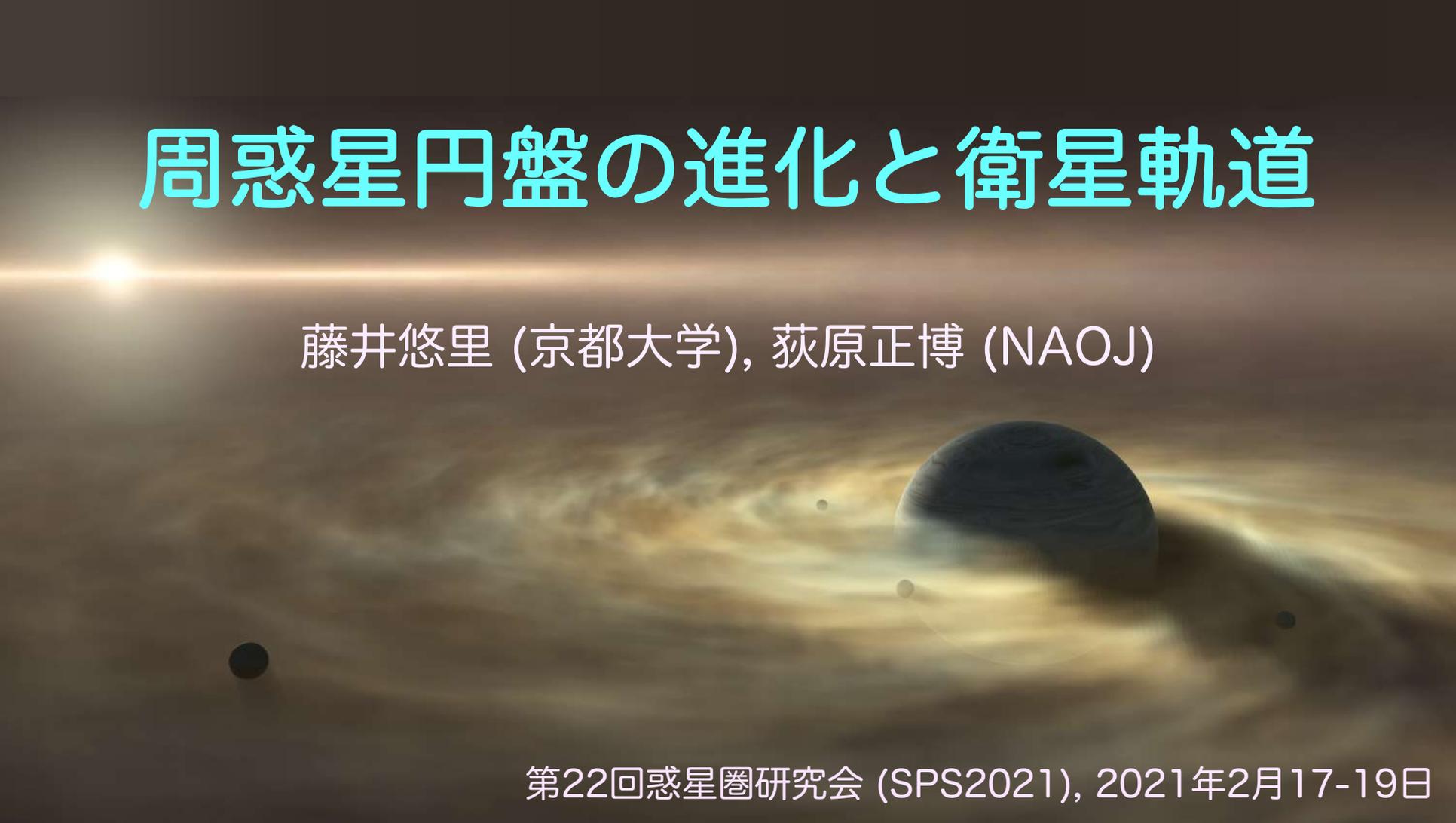


# 周惑星円盤の進化と衛星軌道

藤井悠里 (京都大学), 荻原正博 (NAOJ)

太陽系には多種多様な衛星があり、それらの起源や現在の活動などを考える際には、その軌道位置は重要な要素のひとつとなる。本講演では、特に周惑星ガス円盤の中で形成されたと考えられている、土星のタイタンや木星のガリレオ衛星のような巨大衛星の軌道について議論する。衛星の軌道は円盤ガスとの角運動量のやりとりによって変化することが知られているため、我々は散逸中の周惑星円盤をモデル化し、ガスの散逸とともに衛星の軌道移動を計算した。我々の円盤モデルでは、各温度・密度領域ごとの主要なオパシティ源の違いにより、円盤の温度や面密度分布の半径依存性が位置によって異なる。これにより、衛星が惑星に向かって移動することを妨げられる領域が生じることがわかった。このモデルを土星系に適用し、その領域に捕獲された衛星のみが惑星に飲み込まれずに生き残り、タイタンのように大きい衛星が1つしかない系の形成を説明可能であることを示した。一方、木星系の場合には、ガリレオ衛星のうち内側3つは軌道共鳴にあり、一番外側のカリストのみが共鳴から外れているが、この特徴を説明するためには、これまでの研究で指摘されているように、円盤の内縁が惑星表面よりも十分外側にあることが好ましいことが分かった。

# 周惑星円盤の進化と衛星軌道



藤井悠里 (京都大学), 荻原正博 (NAOJ)

第22回惑星圏研究会 (SPS2021), 2021年2月17-19日



# 軌道を大きく変える要素

## Type I Migration

- 円盤と天体との相互作用によって天体の軌道が変化
- 系外惑星のホットジュピターの軌道を説明 (移動が内向きになる事が多い)

衛星が落下してしまう  
(惑星に飲み込まれる)

移動のタイムスケール (e.g., Paardekooper et al. 2011)

$$t_a = \frac{1}{\beta} \left( \frac{M_s}{M_p} \right)^{-1} \left( \frac{\Sigma r^2}{M_p} \right)^{-1} \left( \frac{c_s}{v_K} \right)^2 \Omega^{-1}$$

$\beta$ : 移動の向きを決める係数

$\beta > 0$ : 外向き

$\beta < 0$ : 内向き

面密度や温度構造の  
半径依存性で決まる

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

$$T \propto r^{-q}$$

$M_p$ : 中心惑星の質量

$M_s$ : 衛星の質量

$\Sigma$ : 面密度

$r$ : 円盤半径

$c_s$ : 音速

$v_K$ : ケプラー速度

$\Omega$ : ケプラー角速度

# 衛星が落下しないためには

- 周惑星円盤が散逸する (散逸した時にそこにあったのが今の衛星になった)  
Canup & Ward (2002, 2006)
  - 円盤内縁と惑星の間に隙間がある  
Sasaki+ (2010), Ogihara & Ida (2012), Shibaïke+ (2017, 2019), Batygin (2018)
  - 円盤の構造で衛星移動が止まる  
Fujii+ (2017), Arakawa & Shibaïke (2019), Fujii & Ogihara (2020)
- \*ひとつ止められると、他の衛星も止められることが多い  
移動が十分ゆっくりな場合は後続の衛星を共鳴軌道に捕獲  
→ タイタンの形成には不都合  
Ogihara & Kobayashi (2013)

# 土星の衛星

Saturn  
February 24, 2009 14:25 UT  
HST WFPC2



F675W R  
F555W V  
F439W B

25,000 miles  
40,200 kilometers



$1.1 \times 10^{21} \text{kg}$   
 $2.3 \times 10^{21} \text{kg}$   
 $1.3 \times 10^{23} \text{kg}$   
 $1.8 \times 10^{21} \text{kg}$

全衛星質量の95%以上

N体計算：1つだけ衛星を残すのは困難

Ogihara & Ida (2012) cf. Canup & Ward (2006)

# 軌道を大きく変える要素

## Type I Migration

- 円盤と天体との相互作用によって天体の軌道が変化
- 系外惑星のホットジュピターの軌道を説明 (移動が内向きになる事が多い)

移動のタイムスケール (e.g., Paardekooper et al. 2011)

$$t_a = \frac{1}{\beta} \left( \frac{M_s}{M_p} \right)^{-1} \left( \frac{\Sigma r^2}{M_p} \right)^{-1} \left( \frac{c_s}{v_K} \right)^2 \Omega^{-1}$$

$\beta$ : 移動の向きを決める係数

$\beta > 0$ : 外向き

$\beta < 0$ : 内向き

面密度や温度構造の  
半径依存性で決まる

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

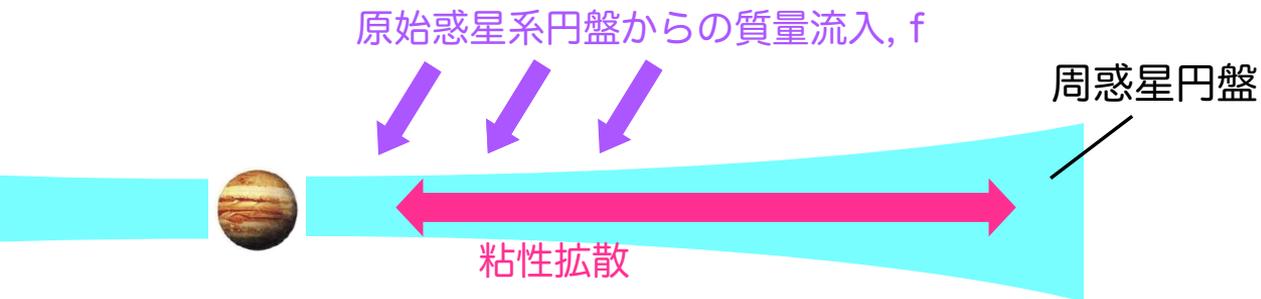
$$T \propto r^{-q}$$

移動の向きや速さを知りたい

→ 円盤の構造を決める

※過去の多くのモデルでは単一ベキを仮定

# 円盤モデルの構築：面密度進化



流入項ありの円盤の拡散方程式

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \underbrace{3r^{\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^{\frac{1}{2}} \nu \Sigma \right)}_{\text{粘性拡散}} \right) + \underbrace{f}_{\text{質量流入}}$$

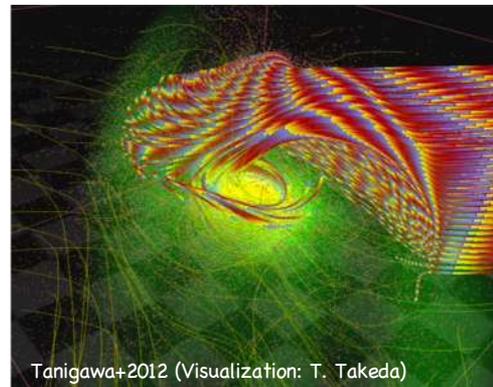
$$f \propto r^{-1} \quad (\text{Based on Tanigawa et al. 2012})$$

$\nu = \alpha c_s H$ : 粘性係数

$\alpha$ : 粘性パラメータ

$c_s$ : 音速

$H$ : スケールハイト



流入がなくなる  $\Rightarrow$  円盤が散逸する  $\Rightarrow$  衛星移動(Type I migration)が終わる

# 温度構造の計算

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{2(Q_+ - Q_-)}{c_p \Sigma} - v_r \frac{\partial T_c}{\partial r}$$

(Cannizzo 1993; Armitage+ 2001)

$T_c$ : midplane temperature

$T_e$ : effective temperature

$C_p$ : specific heat

$v_r$ : radial velocity

$\kappa$ : opacity (Bell & Lin 1994)

粘性加熱

$$Q_+ = \frac{9}{8} \nu \Sigma \Omega^2$$

放射冷却

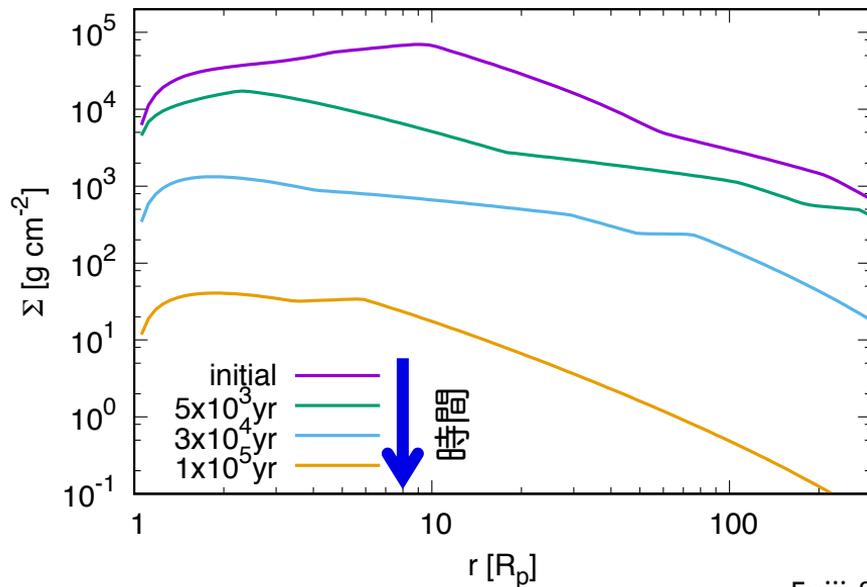
$$Q_- = \frac{16\sigma}{3\Sigma\kappa} T_c^4$$

# 周惑星円盤の散逸

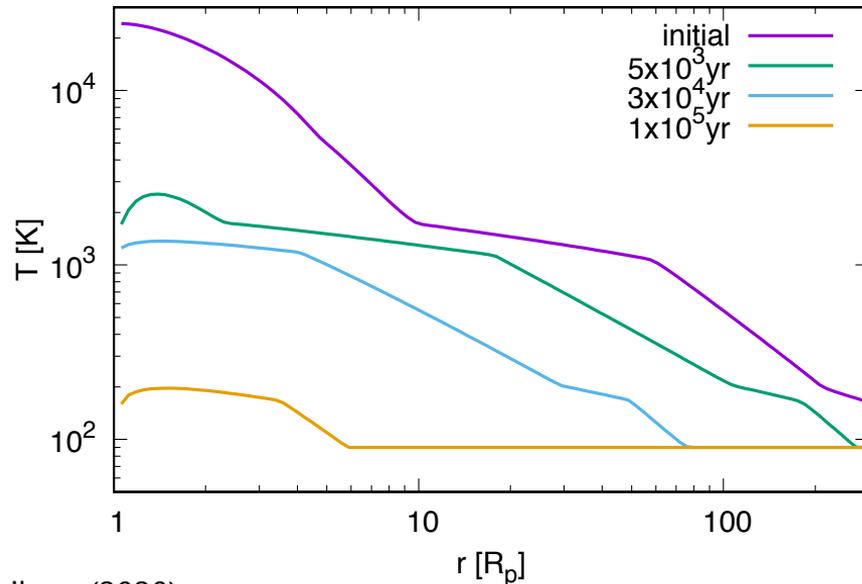
原始惑星系円盤からの流入がなくなってからの周惑星円盤の進化

( $\alpha=10^{-4}$ のとき)

面密度

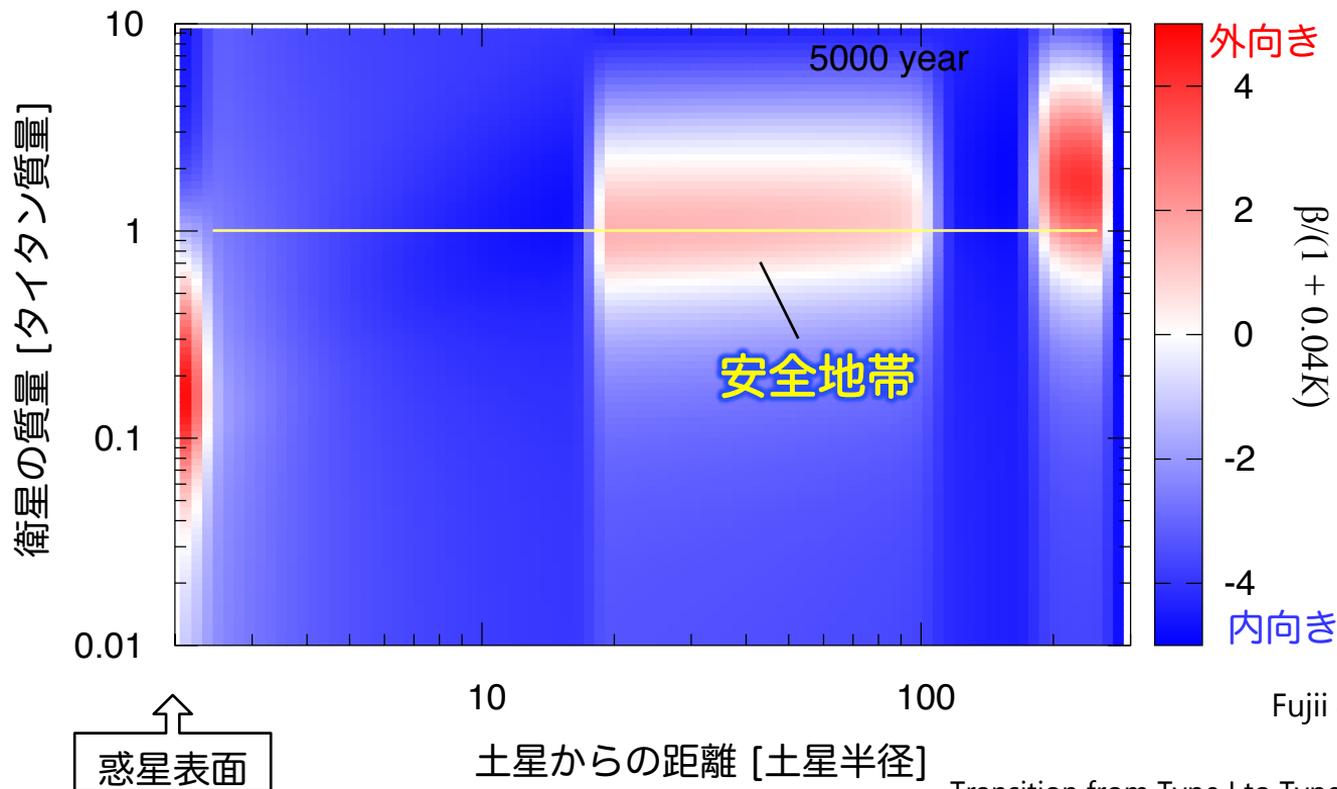


温度



あるスナップショットの

# 衛星移動の向き： $\beta$



Fujii & Ogihara (2020)

Transition from Type I to Type II is considered

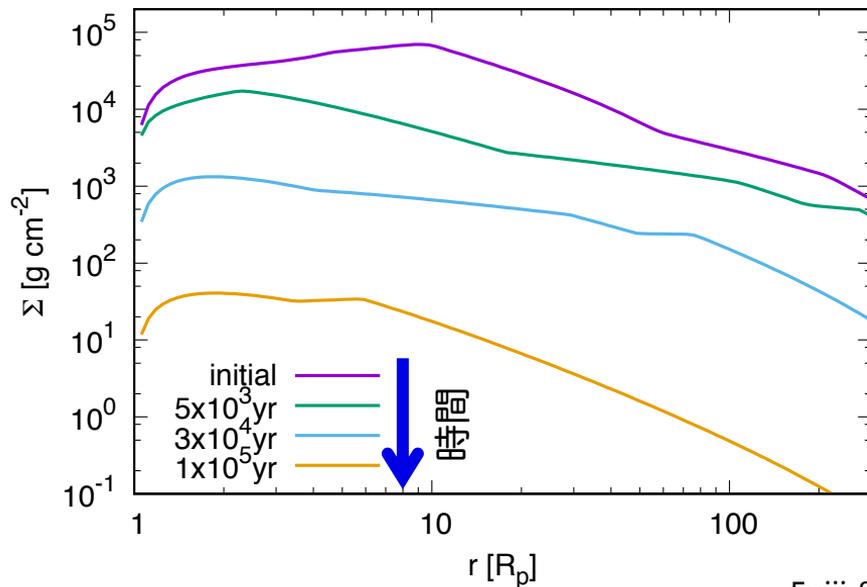
$$K = (M_m/M_p)^2 (h/r)^{-5} \alpha^{-1} \text{ (Kanagawa et al. 2015, 2018)}$$

# 周惑星円盤の散逸

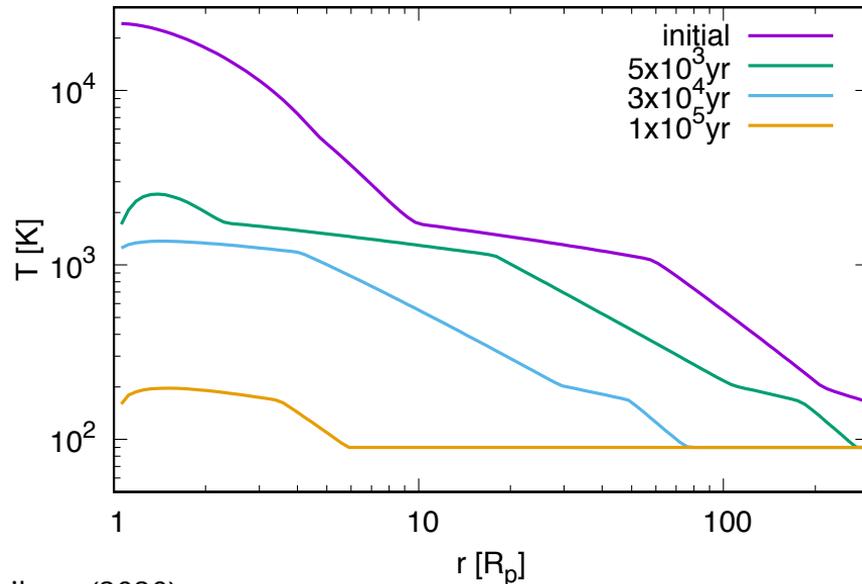
原始惑星系円盤からの流入がなくなっから周惑星円盤の進化

( $\alpha=10^{-4}$ のとき)

面密度

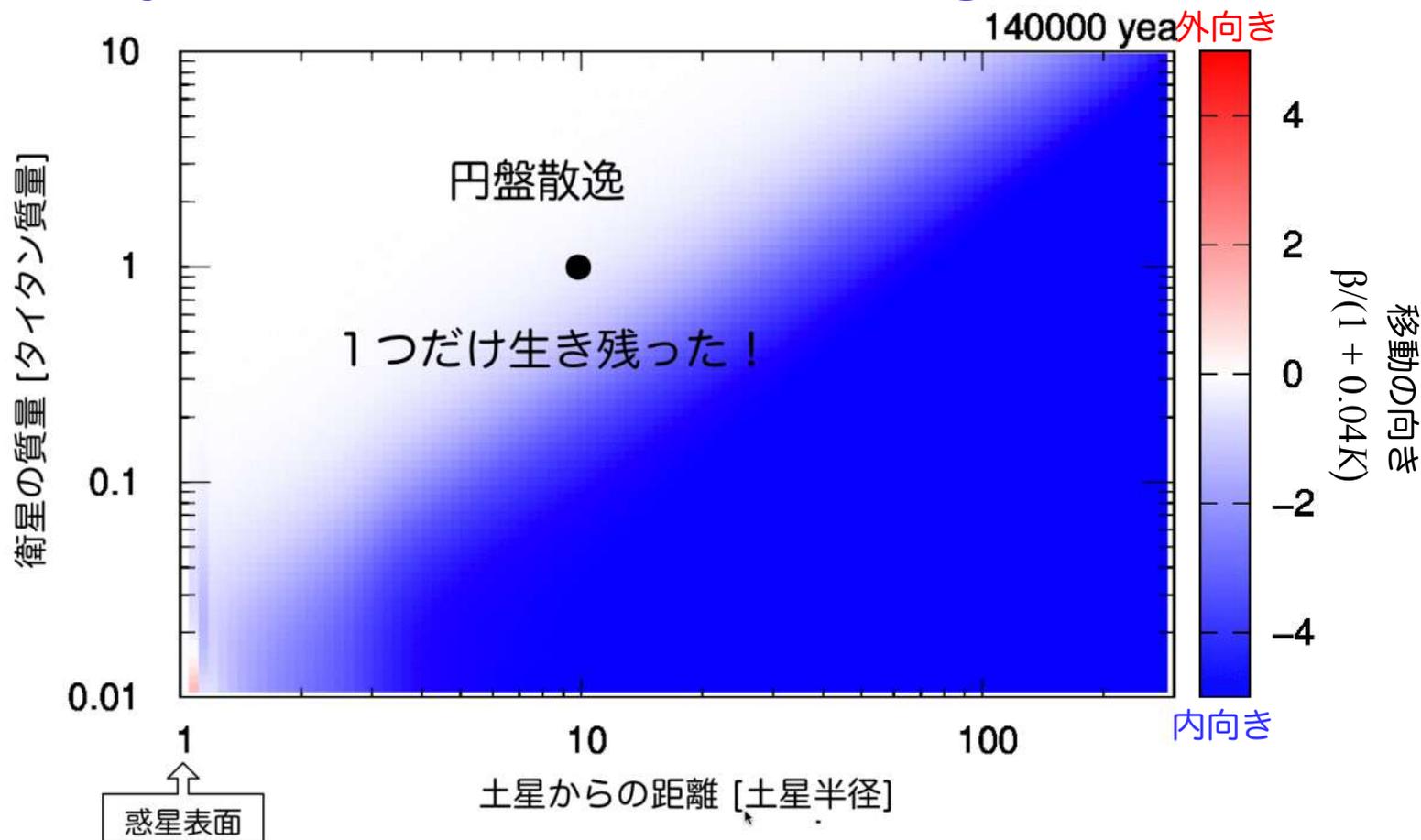


温度



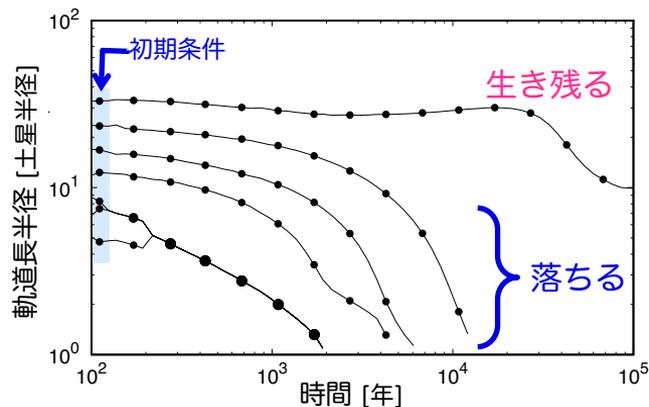
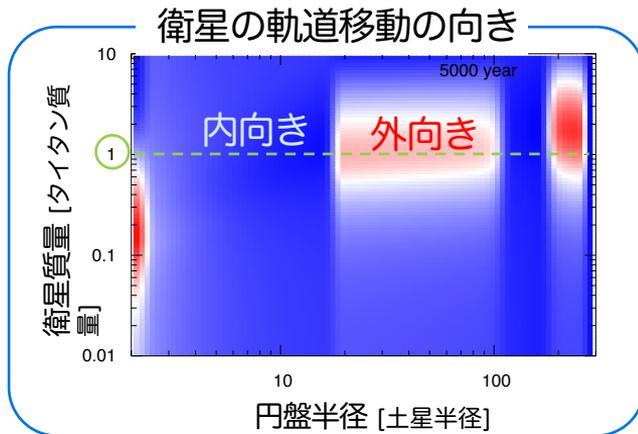
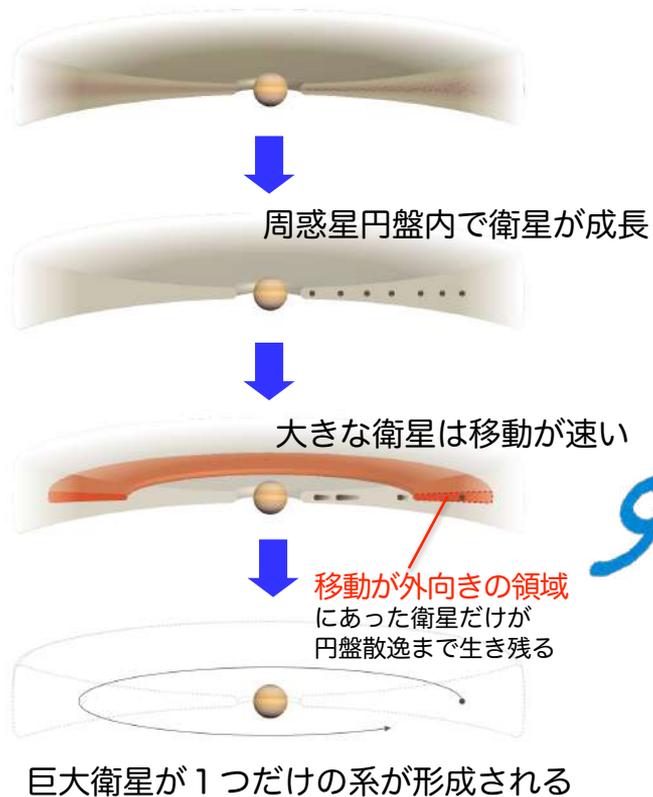


# N-body simulation on migration map



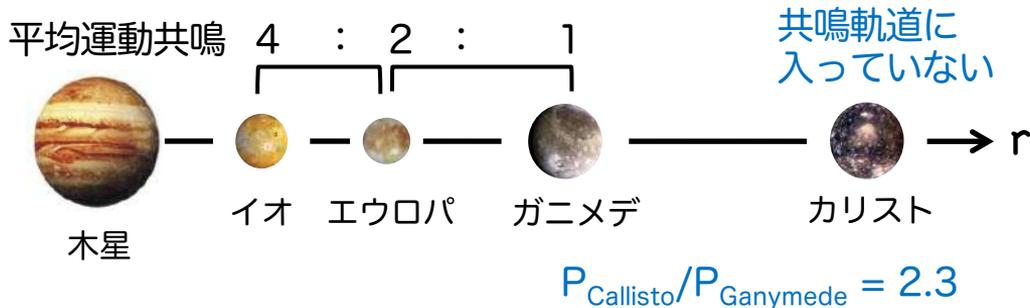
# タイタン形成シナリオ

Fujii & Ogihara (2020)

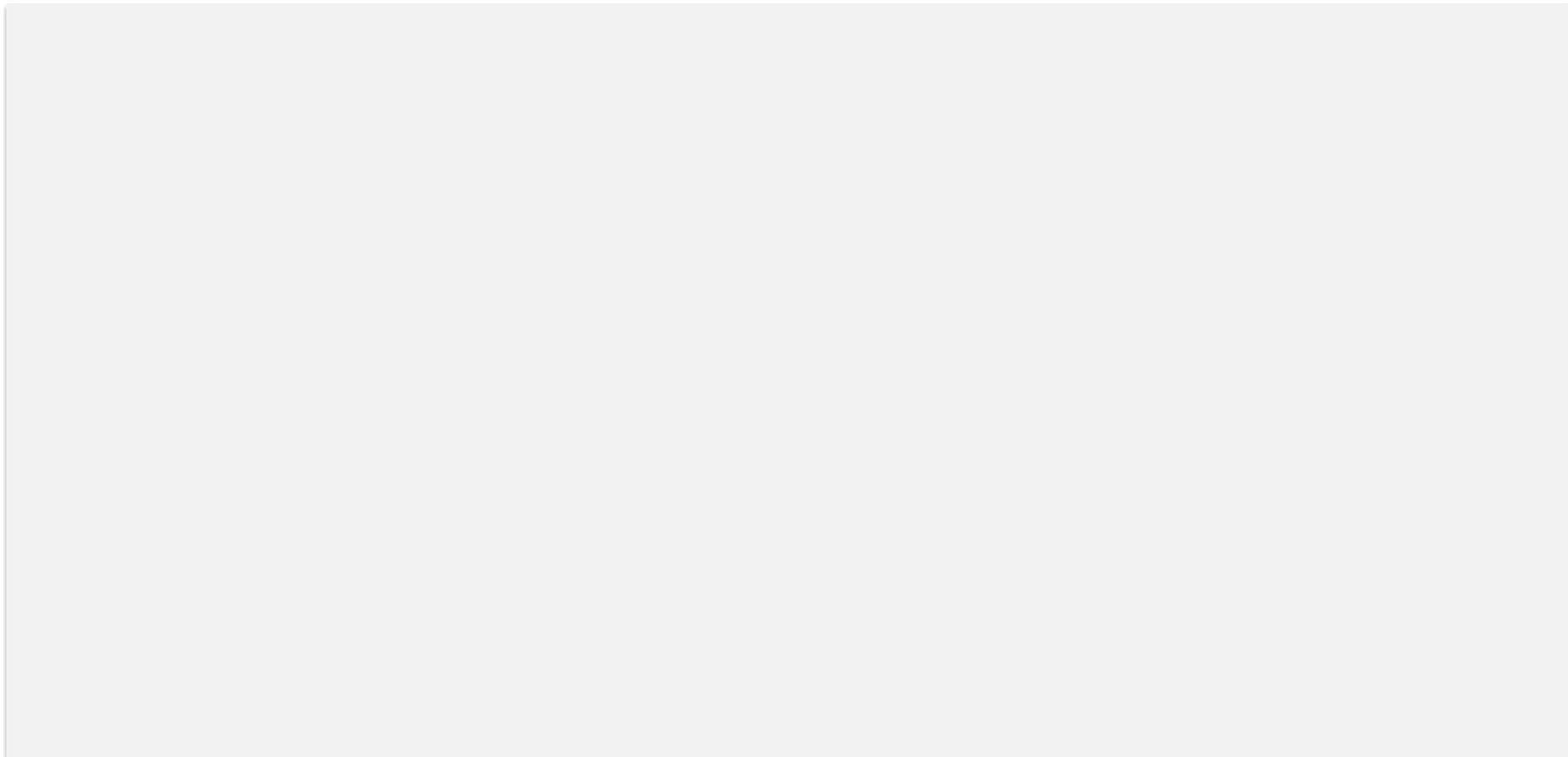


安全地帯

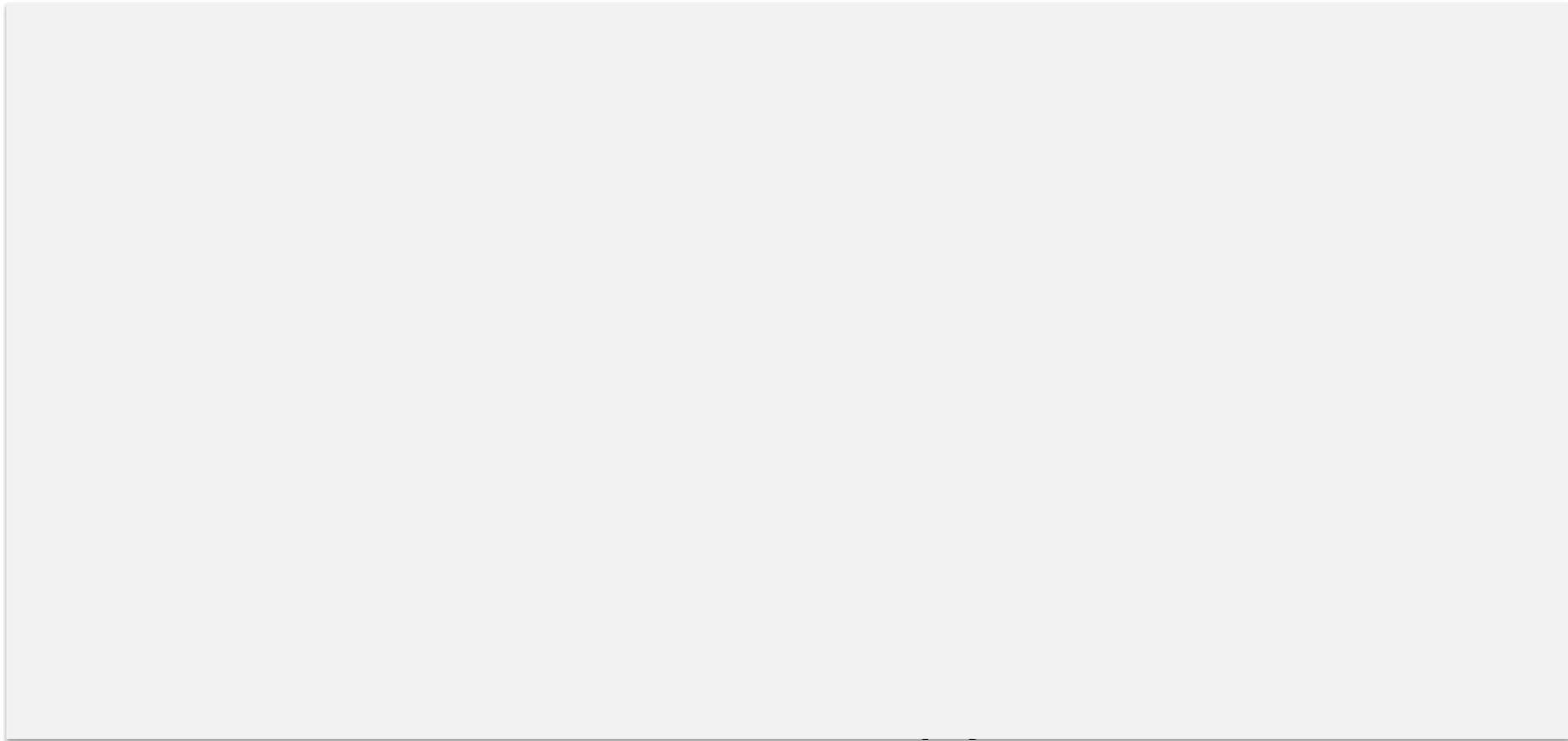
- 土星-タイタン系の場合には軌道移動が外向きの領域に一時避難した衛星だけが生き残った
- 「安全地帯」がある円盤モデルを木星系に応用しガリレオ衛星の軌道の特徴を説明したい



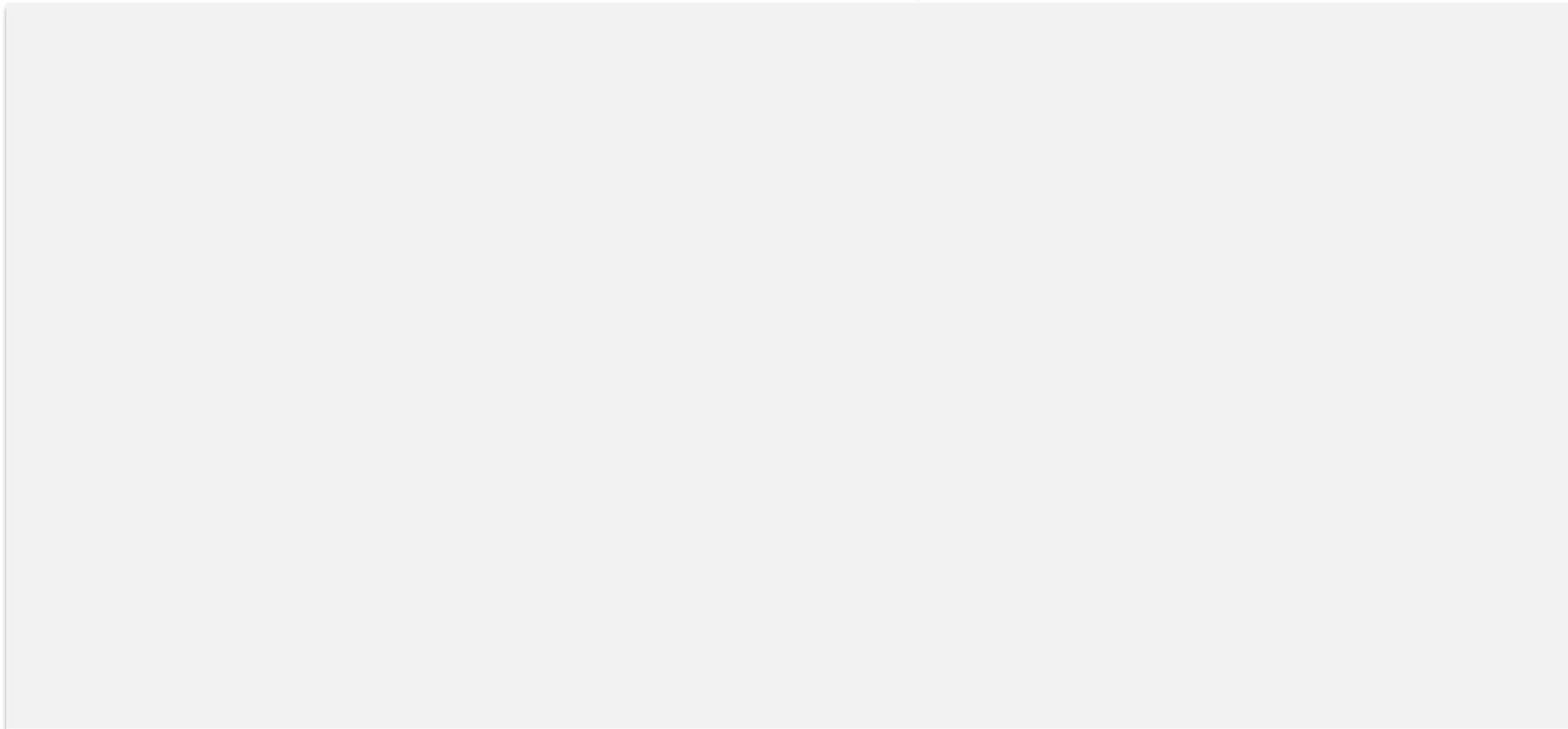
# 散逸円盤内での衛星の軌道進化



# 円盤に内縁がある場合



# 衛星同士の相互作用ありの計算



# まとめ

- 土星系：「安全地帯あり円盤」で単一巨大衛星系の形成シナリオを提唱

- 木星系：共鳴軌道に入れるには円盤に内縁があることが好ましい

⇒ 内縁があると内側3つが平均運動共鳴にあり、一番外側の衛星が共鳴に入っていない  
4つの衛星からなる系の形成が可能

ただし「ラプラス共鳴+2:1共鳴より少し遠い衛星」の形成は容易でない



(Batygin 2018)

## 詰めていくべき課題

惑星近傍の磁場構造・強度が知りたい！

- 惑星磁場と円盤の共進化：磁気圏降着の可否，円盤内縁ができる場合はその空間・時間進化

現状：次元解析的な議論しかない ⇔ 衛星の軌道を決めるにはファクターの精度が必要

- 周惑星円盤の進化の精密化：角運動量輸送メカニズム(粘性の起源)，その空間・時間変化

- 固体成分の分布：衛星の材料物質の供給，オパシティ

↑衛星軌道(移動速度)・円盤進化に重要