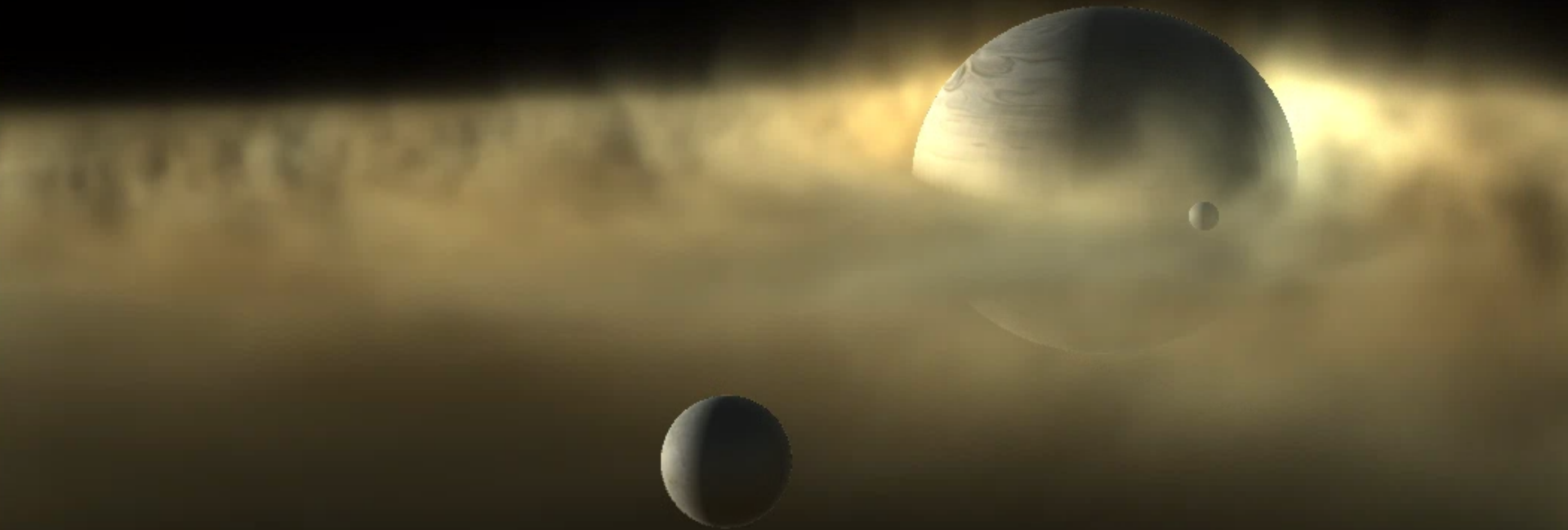
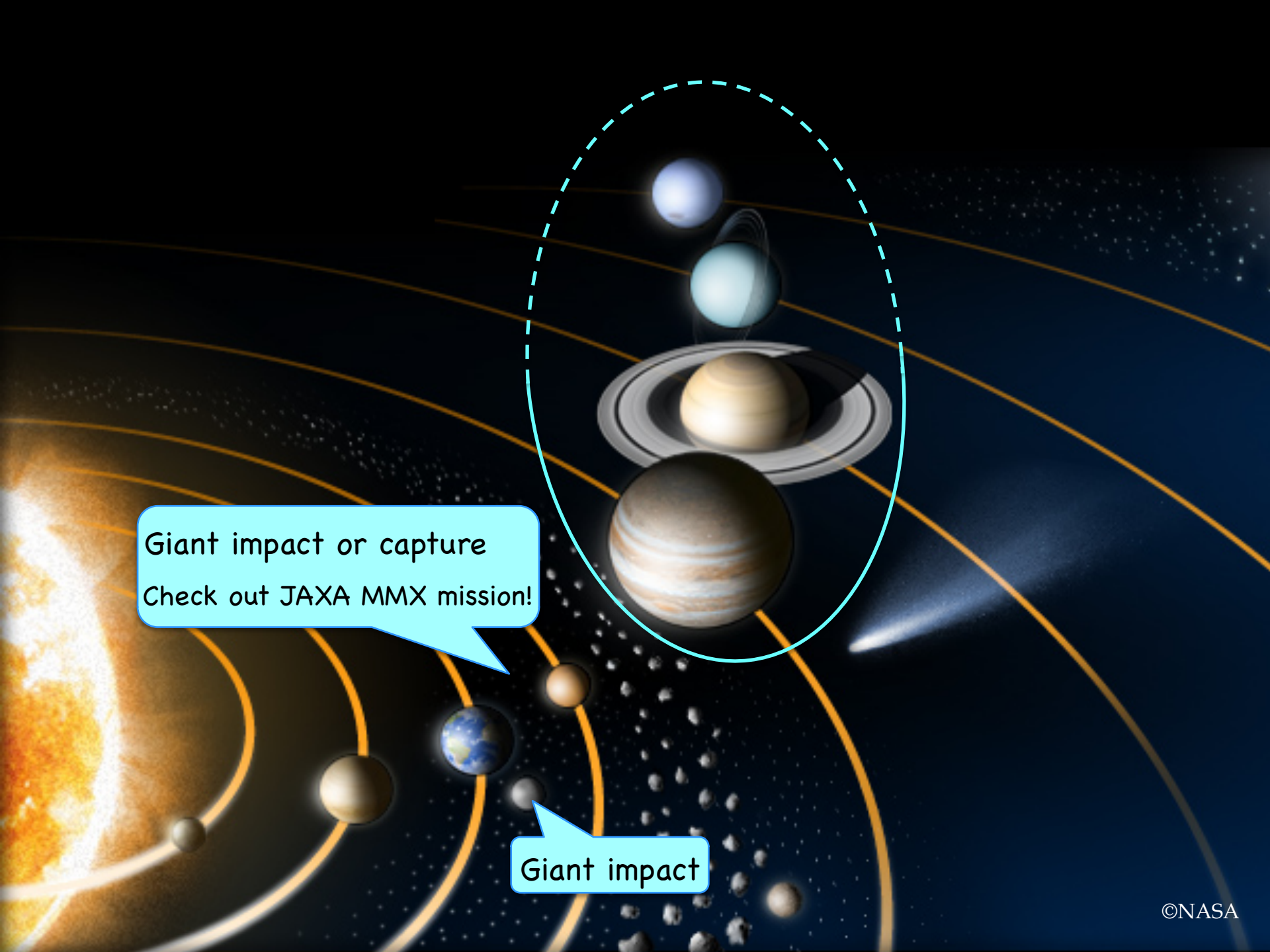


# 周土星ガス円盤における 単一巨大衛星の形成

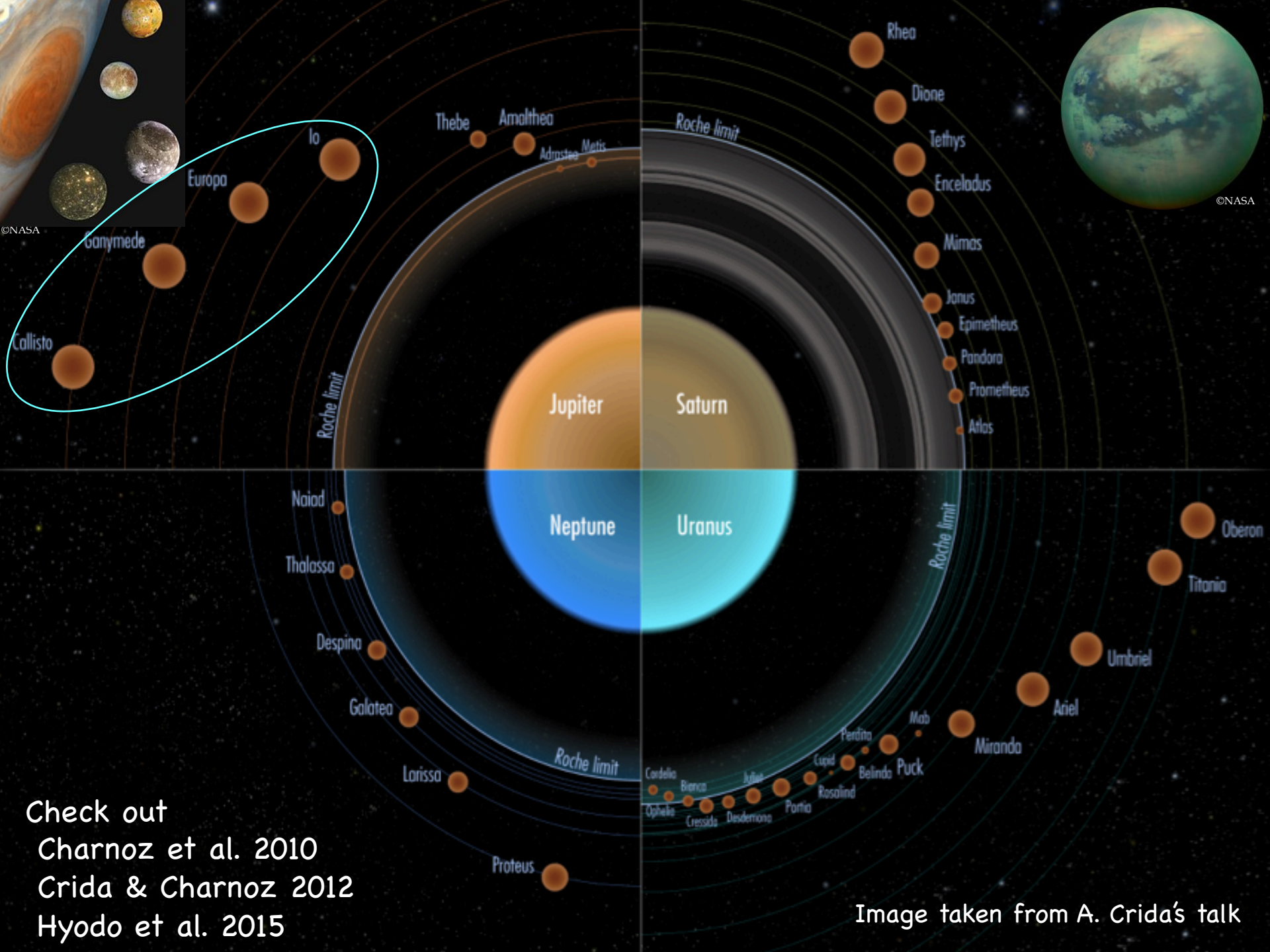
藤井悠里 (名古屋大学), 荻原正博 (国立天文台)





Giant impact or capture  
Check out JAXA MMX mission!

Giant impact



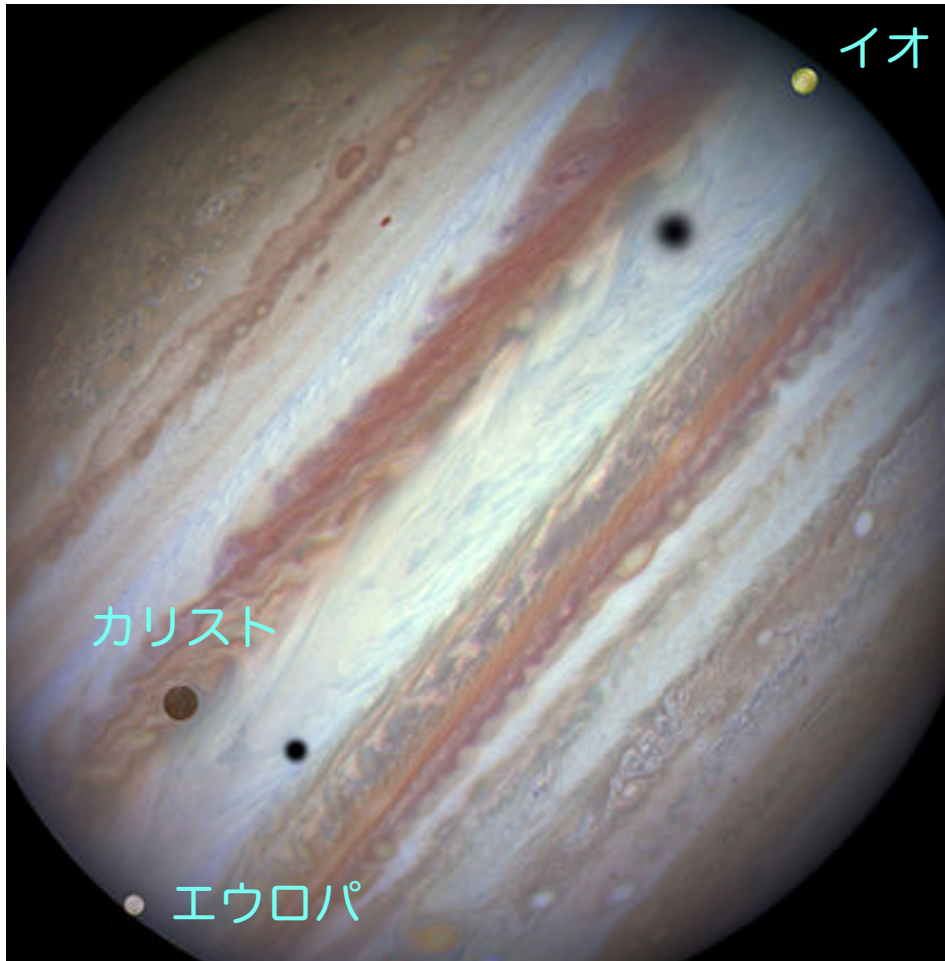
©NASA

©NASA

Check out  
 Charnoz et al. 2010  
 Crida & Charnoz 2012  
 Hyodo et al. 2015

Image taken from A. Crida's talk

# 木星の巨大衛星



ガリレオ衛星：4つ  
周惑星円盤内で形成

Canup & Ward (2002, 2006)

Sasaki et al. (2010)

Ogihara & Ida (2012)

Miguel & Ida (2016)

Fujii et al. (2017)

Shibaike et al. (2017, 2019)

Cilibrashi et al. (2018)

Arakawa & Shibaike (2019)

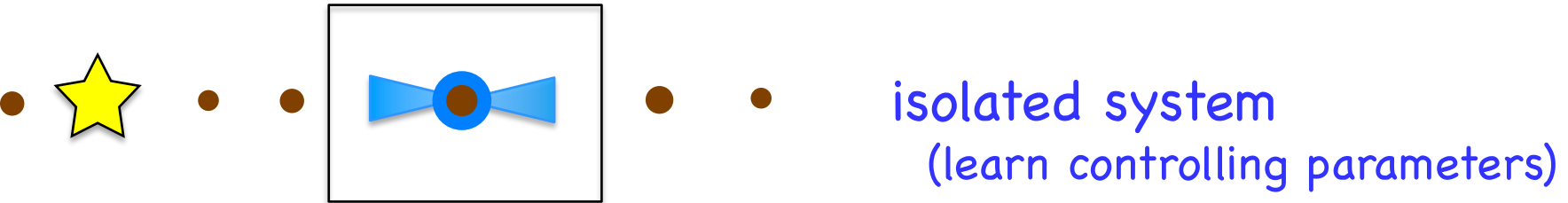
たくさん研究されている

# Satellite Formation

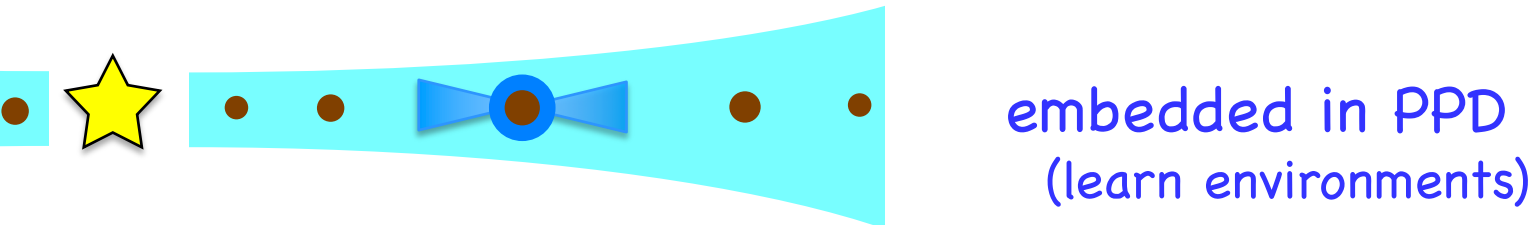
- In circumplanetary disks (CPD)
  - Minimum mass sub-nebula models  
e.g. Lunine & Stevenson (1982), Lissauer & Stewart (1993)
  - Solid enhanced minimum mass model  
Mosqueira & Estrada (2003ab), Miguel & Ida (2016)
  - Gas-starved disk model  
Canup & Ward (2002, 2006), Sasaki+ (2010), Ogiwara+ (2012)
  - Others (based on simulations)  
Fujii+ (2014, 2017), Shibaike+ (2017, 2019), Cilibrasi+ (2018)
- From tidally spreading solid disks  
Charnoz+ (2010), Crida & Charnoz (2012), Hyodo+ (2016)

# Satellite Formation

- In circumplanetary disks (CPD)
  - Minimum mass sub-nebula models
  - Solid enhanced minimum mass model

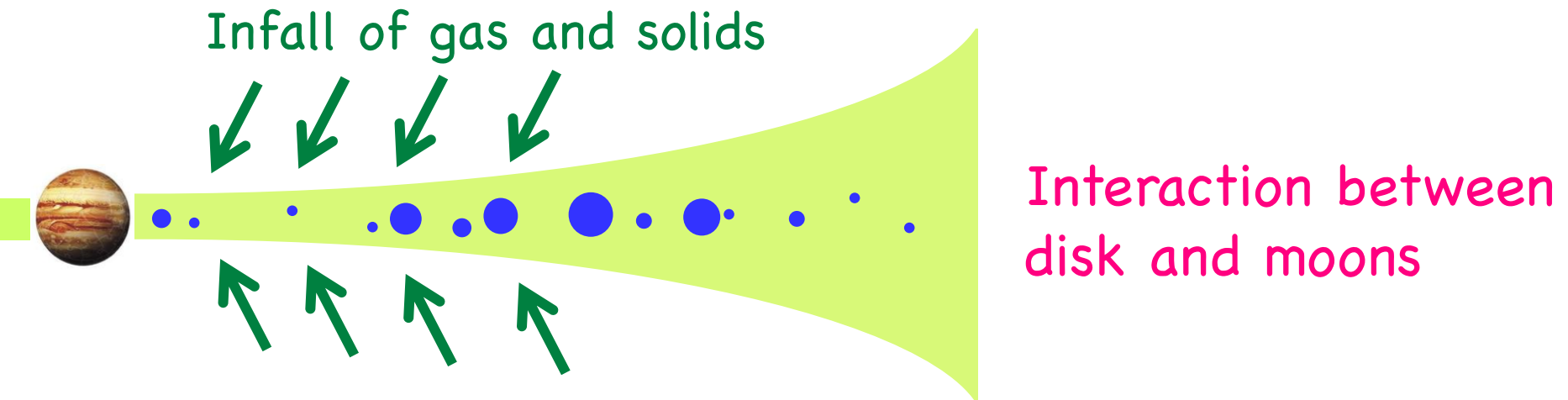


- Gas-starved disk model
- Others (based on simulations)



# Moon Formation in Gas-starved Disk

Canup & Ward (2002, 2006)



- Continuous mass infall from PPD
- Turbulent viscosity keeps disk less massive
  - ⇒ Magnetorotational instability is not very efficient  
(Fujii+ 2011, 2014, Keith+2014, Turner+2014)

# 衛星の救い方

- タイミングよく周惑星円盤が晴れた

Canup & Ward (2002, 2006)

- 円盤の内側に穴がある

Sasaki+ (2010), Ogiwara & Ida (2012), Shibaie+ (2017, 2019)

- 円盤の構造で移動の向きが外向きになる

Fujii+ (2017)

移動がゆっくりな場合はひとつ救うと後続の衛星も救われる

⇒複数の衛星が形成される

Ogiwara & Kobayashi (2013)



# 土星の衛星



大きなものはタイタンのみ

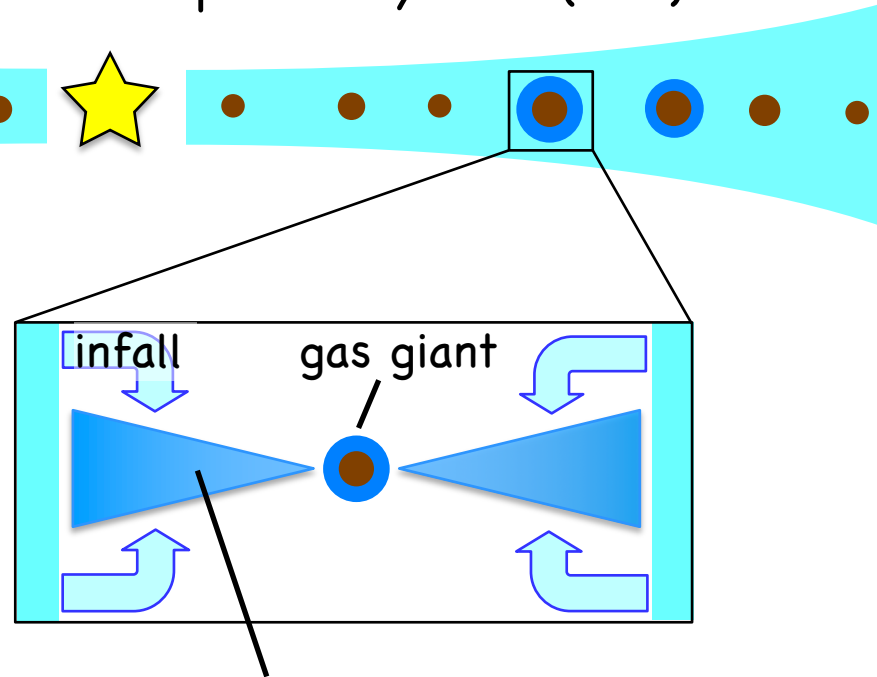
大きな衛星を一つだけ形成することは可能かどうか？

土星・木星衛星の作り分けは難しい (cf. Ogiwara & Ida 2015)

⇒ これまでよりも現実的な円盤モデルを用いて再検討する

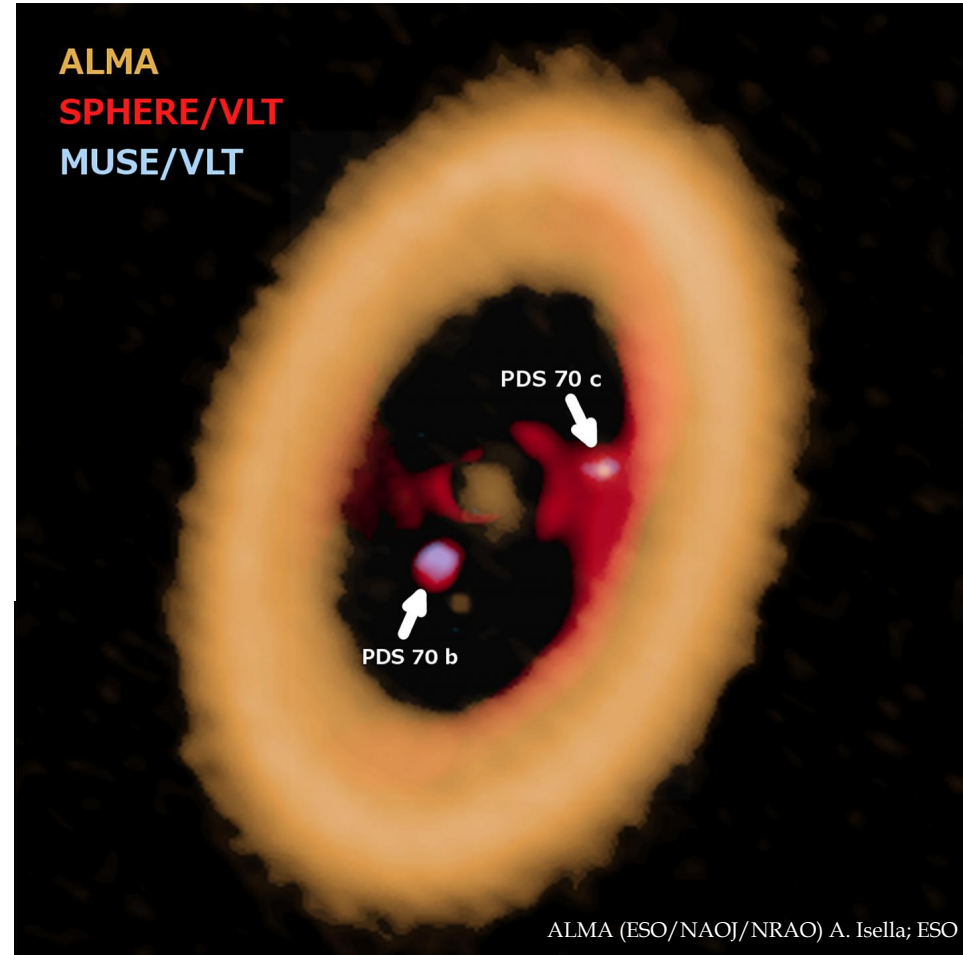
# Planet formation in PPD

Protoplanetary Disk (PPD)

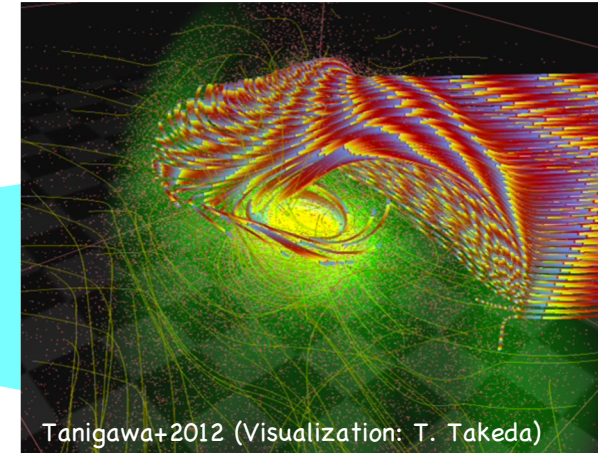
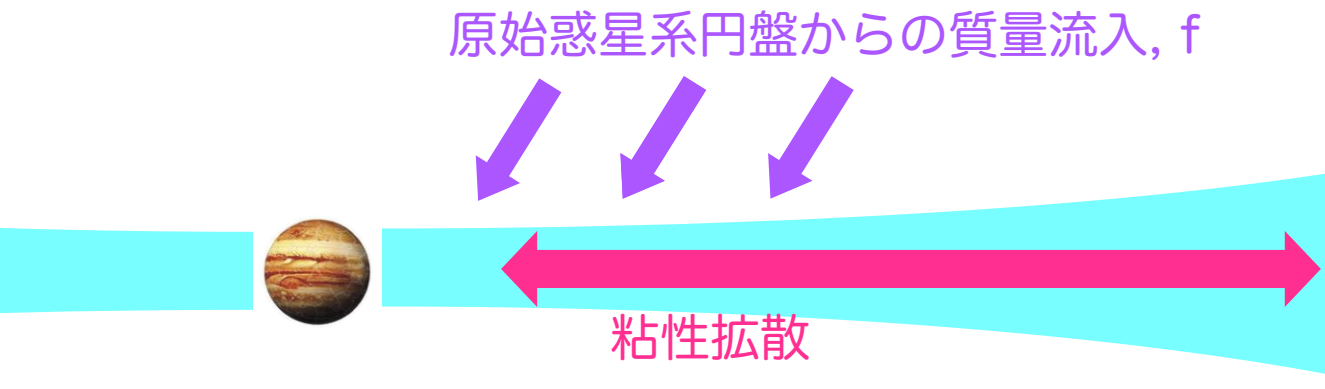


Circumplanetary disk (CPD)

Birth place of moons



# 周惑星円盤の面密度進化



流入項ありの円盤の拡散方程式

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \underline{3r^{\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^{\frac{1}{2}} \nu \Sigma \right)} \right) + \underline{f}$$

$r$  : 周惑星円盤の半径  
 $\Sigma$  : 面密度  
 $\nu = \alpha c_s H$  : 粘性係数  
 $\alpha$  : 粘性パラメータ  
 $c_s$  : 音速  
 $H$  : スケールハイト

$$f \propto r^{-1} \quad (\text{Tanigawa+ 2012})$$

Fujii et al. (2014, 2017)と同様

# 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)

$T_c$ : 赤道面の温度

$T_e$ : 有効温度

$c_p$ : 定圧比熱

$v_r$ : r方向の速度

$\kappa$ : オパシティ

粘性加熱

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

$$T_c = \left( 1 + \frac{3}{8} \kappa \Sigma \right)^{1/4} T_e$$

放射冷却

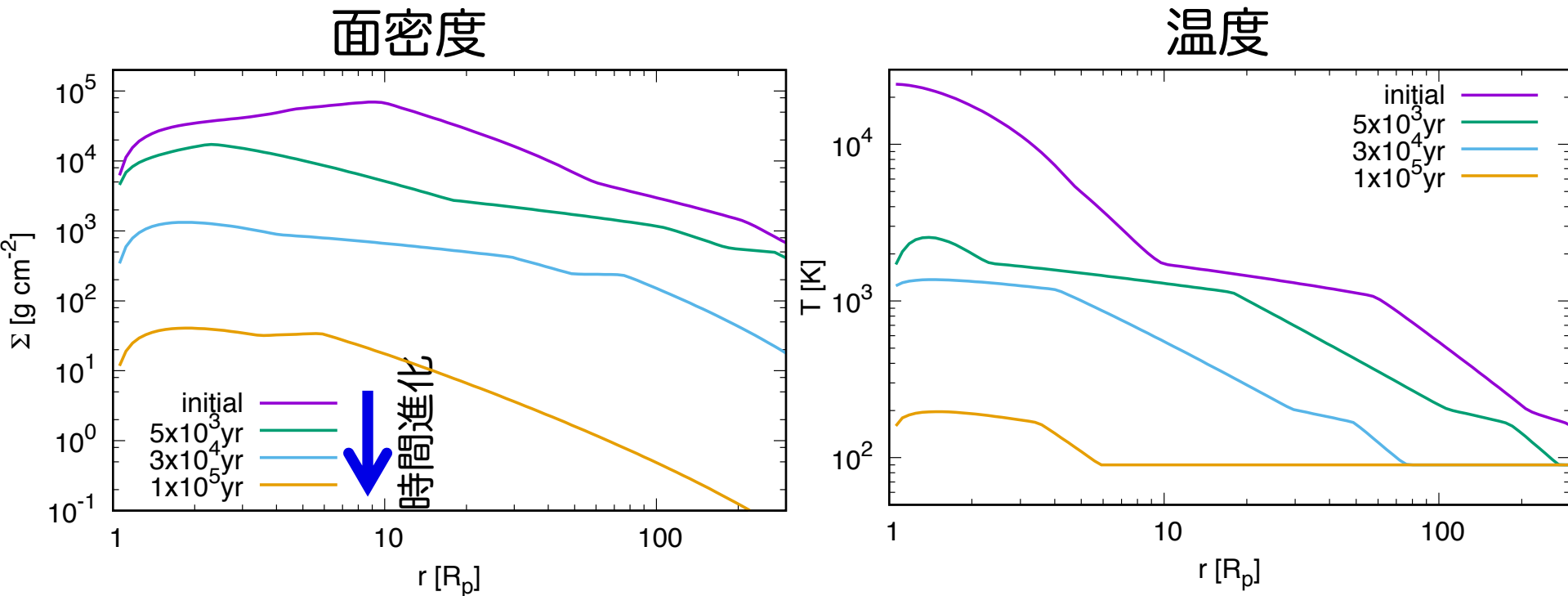
$$Q_- = \sigma T_e^4$$

Bell & Lin (1994)

# 散逸する円盤の時間進化

原始惑星系円盤からの流入がなくなると円盤が散逸し始める

$\langle \alpha = 10^{-4}$  のとき) 定常状態  $\Rightarrow$  流入を止めてからの時間進化



# Type I 衛星移動

移動タイムスケール

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

(e.g., Paardekooper et al. 2011)

面密度や温度構造の  
半径依存性で決まる

$\beta > 0$ : 外向き

$\beta < 0$ : 内向き

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

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

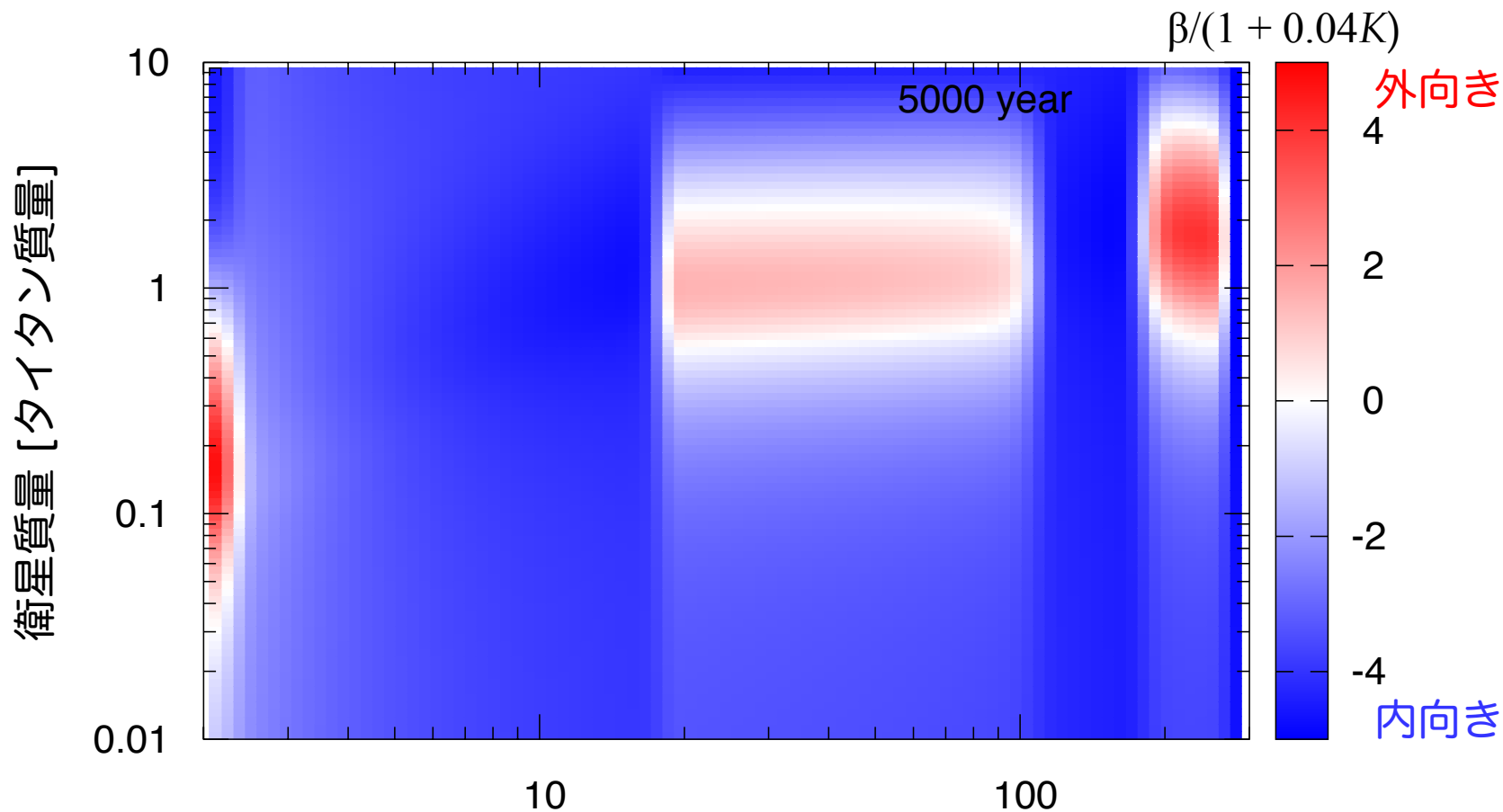
$\beta$ : 移動の向きを決める係数

$M_p$ : 中心惑星の質量 (土星質量)

$M_s$ : 衛星の質量       $c_s$ : 音速

$v_K$ : ケプラー速度

# 衛星移動の向き



Fujii & Ogihara (2020)

$r [R_p]$

$$K = (M_m/M_p)^2(h/r)^{-5}\alpha^{-1}$$

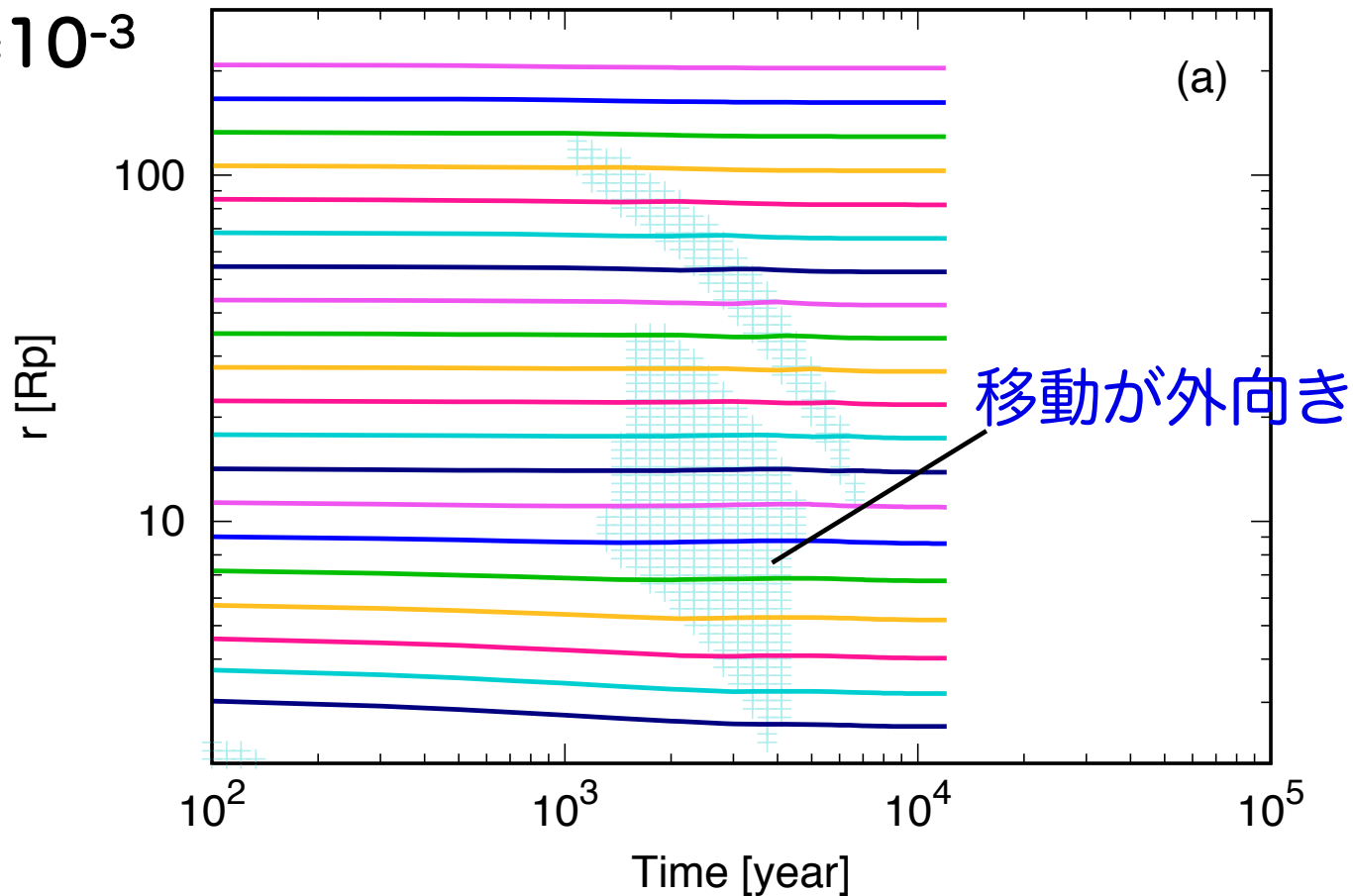
(Kanagawa et al. 2015, 2018)

# 散逸する円盤内での衛星の軌道進化

衛星同士の相互作用なし

⇒ ある初期位置においた衛星それぞれの独立した軌道進化

$\alpha = 10^{-3}$



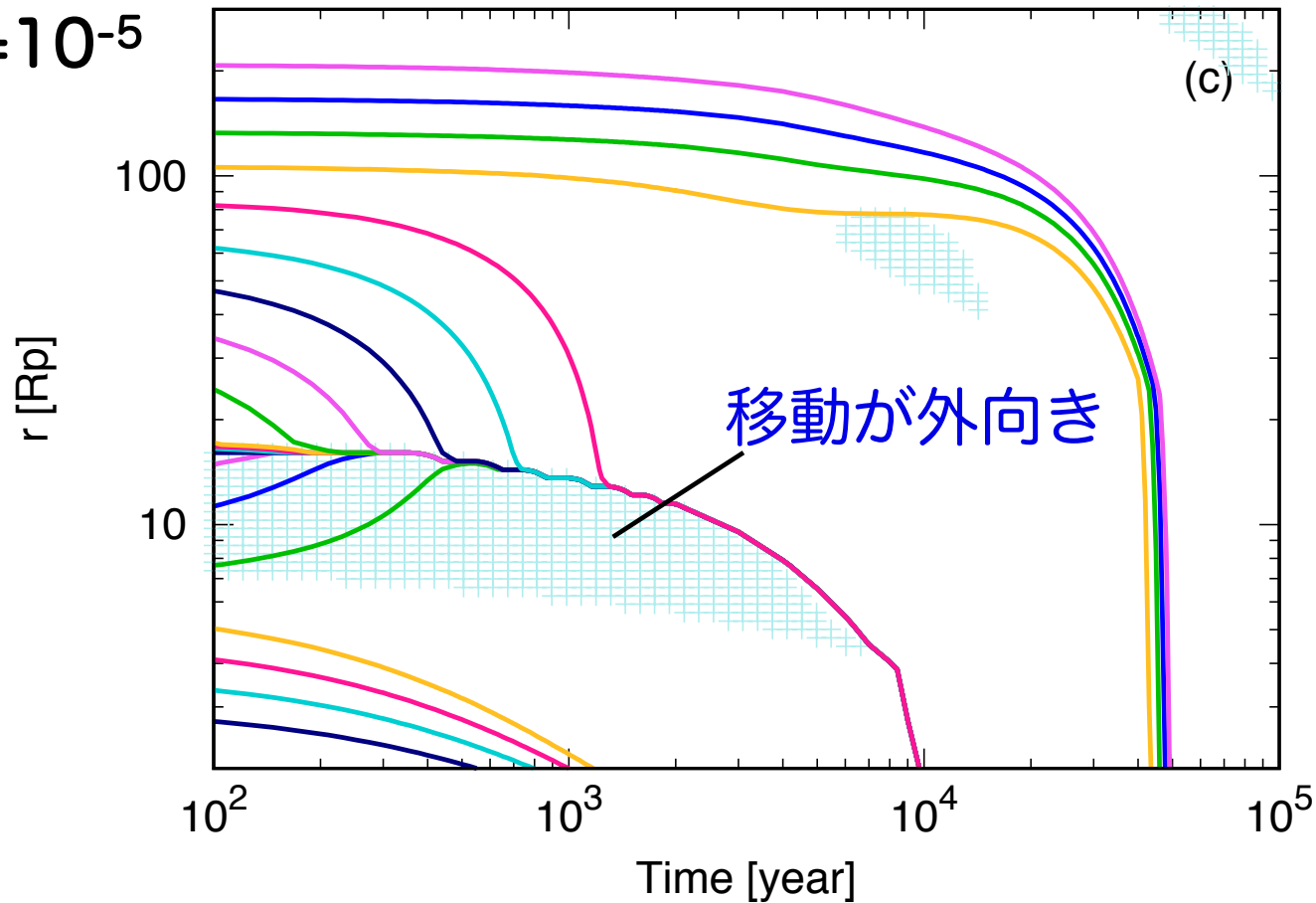


# 散逸する円盤内での衛星の軌道進化

衛星同士の相互作用なし

⇒ ある初期位置においた衛星それぞれの独立した軌道進化

$\alpha = 10^{-5}$

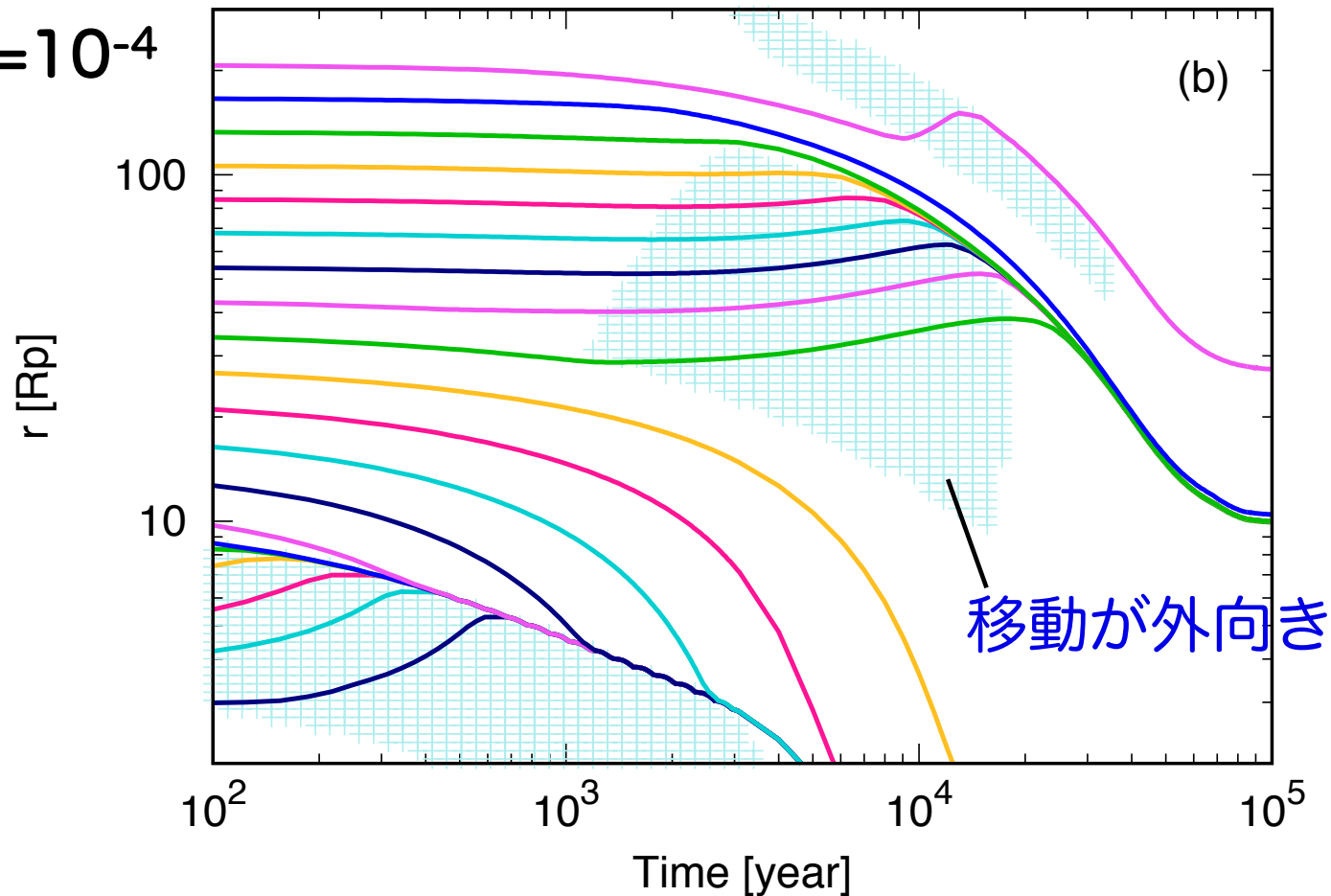


# 散逸する円盤内での衛星の軌道進化

衛星同士の相互作用なし

⇒ ある初期位置においた衛星それぞれの独立した軌道進化

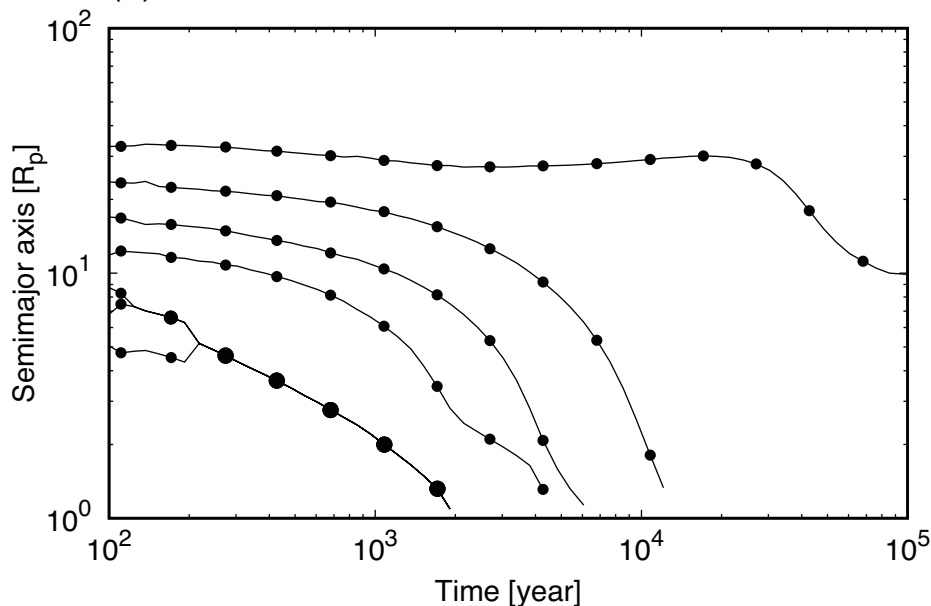
$\alpha = 10^{-4}$



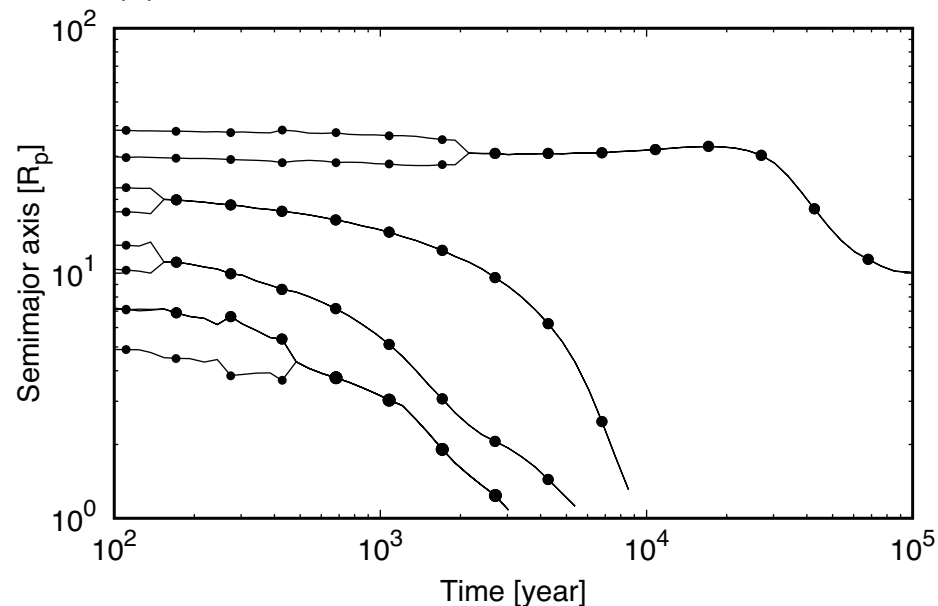
# 衛星同士の相互作用ありの計算

$$\alpha = 10^{-4}$$

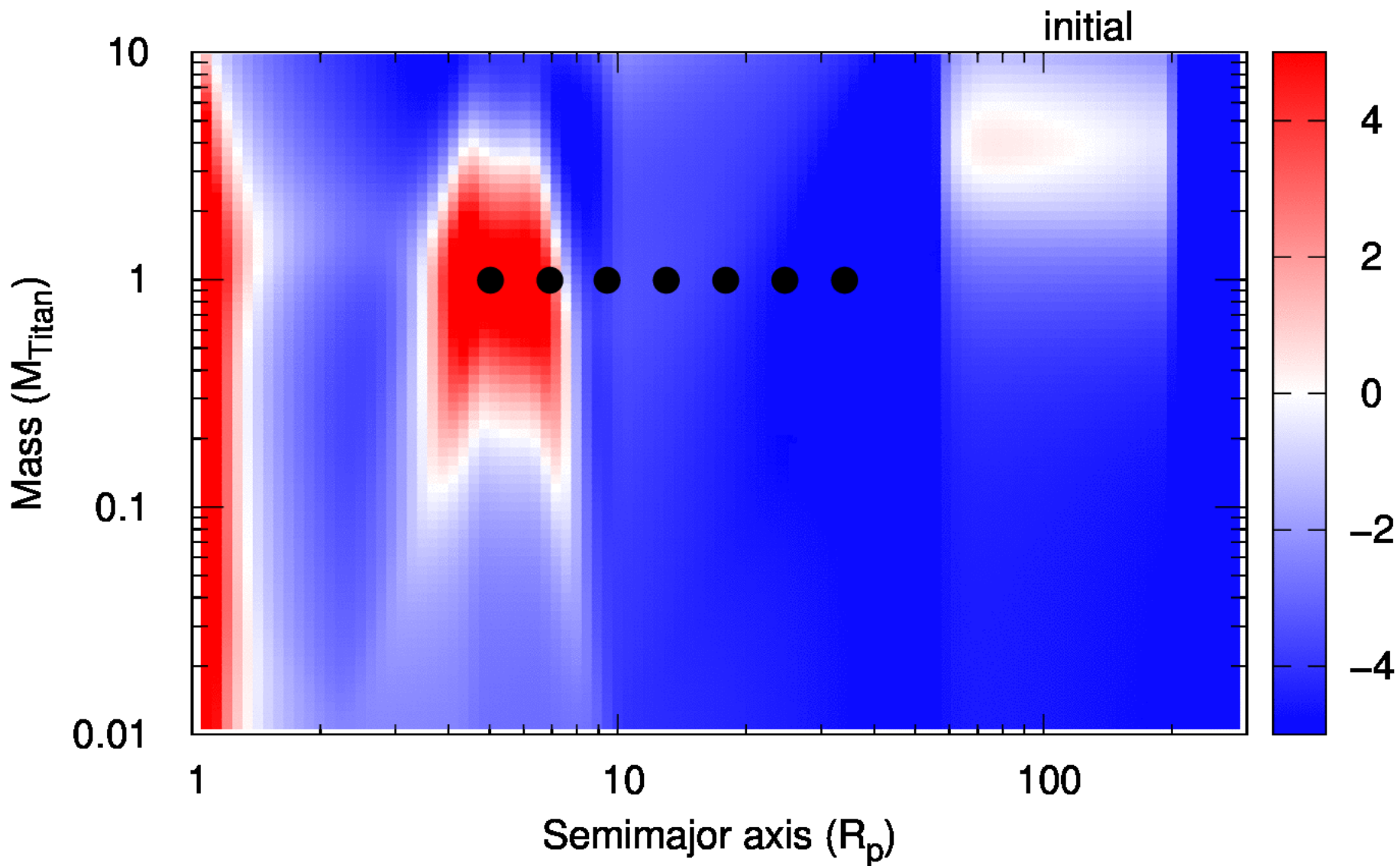
(a) 初期条件： $1M_{\text{Titan}}$  7個



(b) 初期条件： $0.5M_{\text{Titan}}$  9個



円盤散逸開始(=ガス流入停止)までに  
複数の衛星が形成されていたとしても最終的に1つに！



# まとめ

- 散逸する周惑星円盤内での衛星の軌道進化を計算
- Type I 移動の向き・速度は衛星の質量に依る
- 多くのパラメータでは複数 or 0個の衛星形成
- タイタン質量の衛星の場合では我々のモデルでは  $\alpha \sim 10^{-4}$  のときに衛星を1つだけ形成可能
- この結果を足がかりにタイタンの形成について詳しく調べていく必要がある