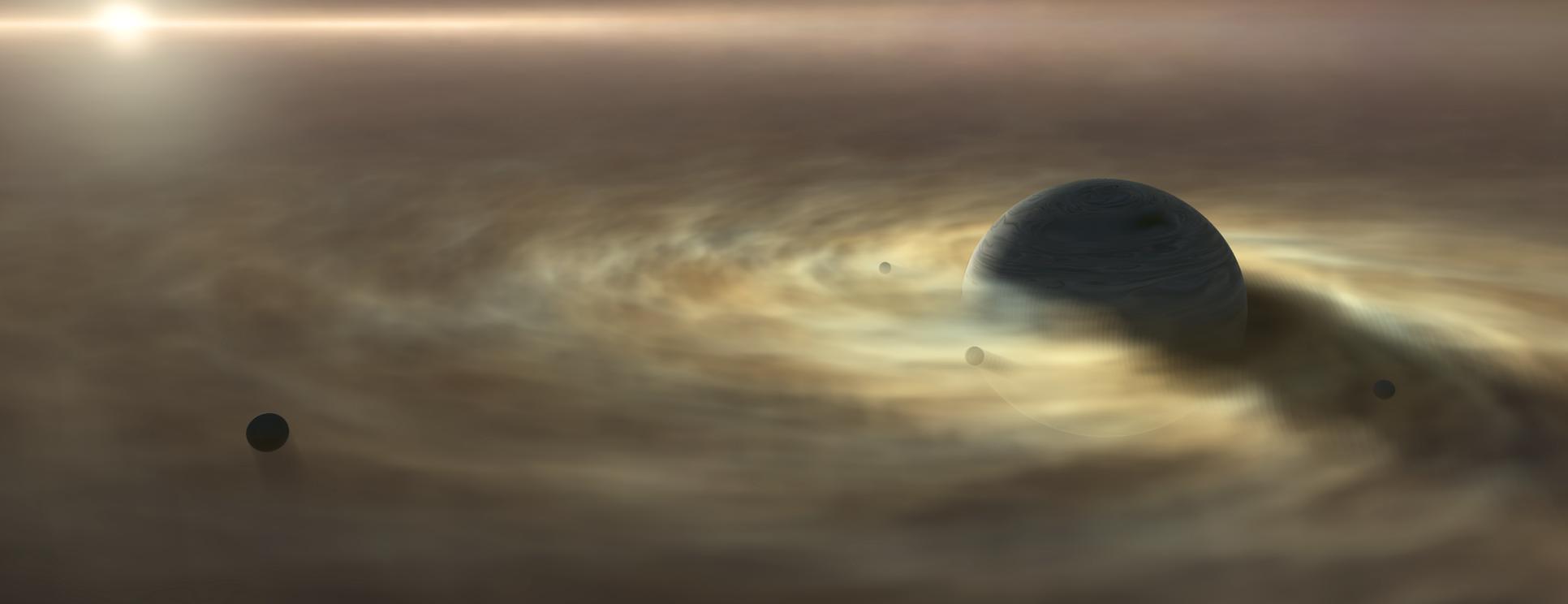


土星衛星タイタンの起源

巨大衛星が一つだけの系の形成

藤井悠里 (名古屋大学), 荻原正博 (国立天文台)

Fujii & Ogihara (2020, A&A Letter)



ガス惑星周りの衛星形成

巨大衛星は周惑星円盤内で形成

└ タイタン, イオ, エウロパ, ガニメデ, カリスト

(土星)

ガリレオ衛星 (木星)

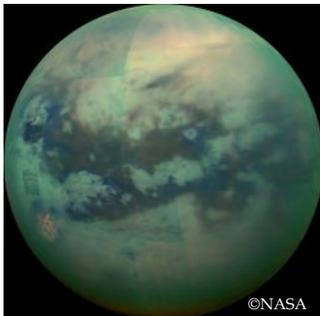
質量, 組成, 軌道進化などの議論



円盤ガスとの相互作用で角運動量を失い惑星に落下

Canup & Ward (2002, 2006)
Sasaki et al. (2010)
Ogihara & Ida (2012)
Miguel & Ida (2016)
Fujii et al. (2017)
Shibaïke et al. (2017, 2019)
Ronnet et al. (2018, 2019)
Cilibrashi et al. (2018)
Arakawa & Shibaïke (2019)
etc.

タイタン



衛星が落下しないためには

- 周惑星円盤がタイミングよく散逸する

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)

- 円盤の構造で衛星移動が止まる

Fujii+ (2017), Arakawa & Shibaïke (2019)

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

⇒ 複数の衛星が形成される

Ogihara & Kobayashi (2013)

土星の衛星

大きなものはタイタンのみ



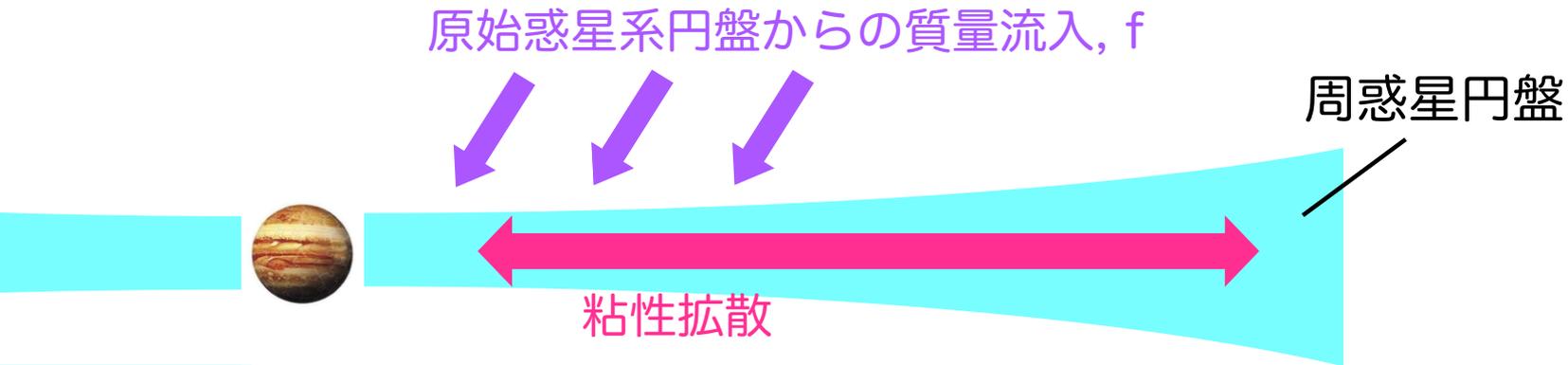
巨大衛星を一つだけ形成することは難しい

複数の衛星が形成 or 全ての衛星が惑星に落下

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

⇒ 温度分布を考慮した円盤モデルを用いて再検討する

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

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

r : 周惑星円盤の半径
 Σ : 面密度
 $\nu = \alpha c_s H$: 粘性係数
 α : 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
 κ : 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

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

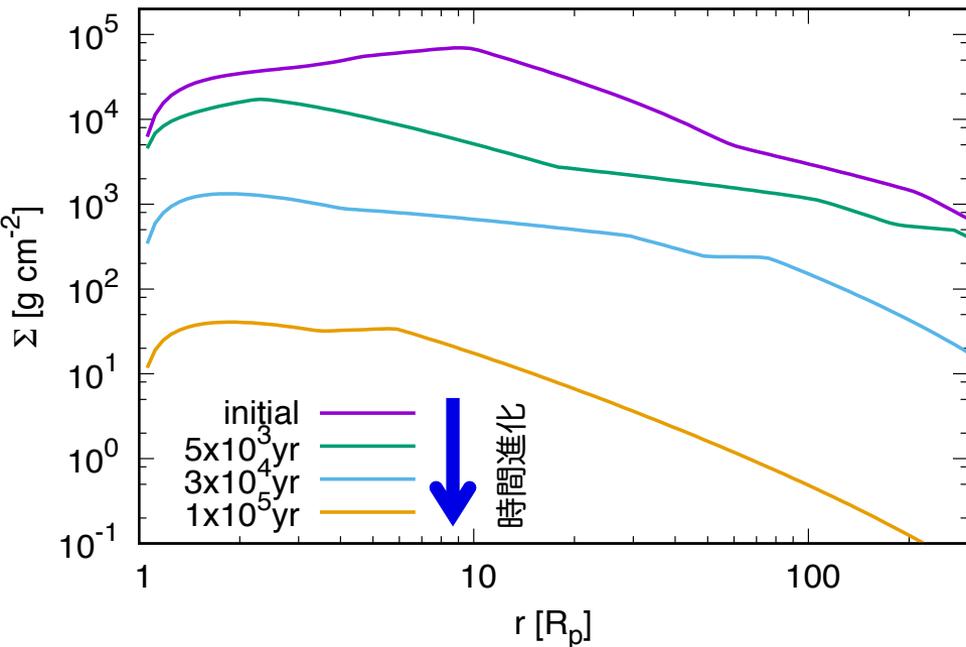
Bell & Lin (1994)

散逸する円盤の時間進化

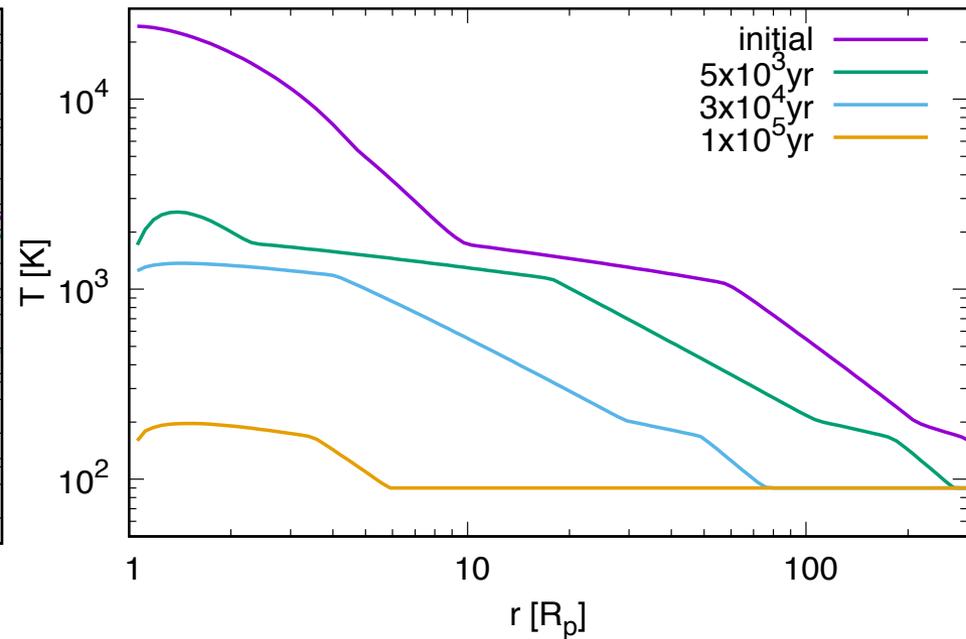
原始惑星系円盤からの流入がなくなると円盤が散逸し始める

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

面密度



温度



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

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

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

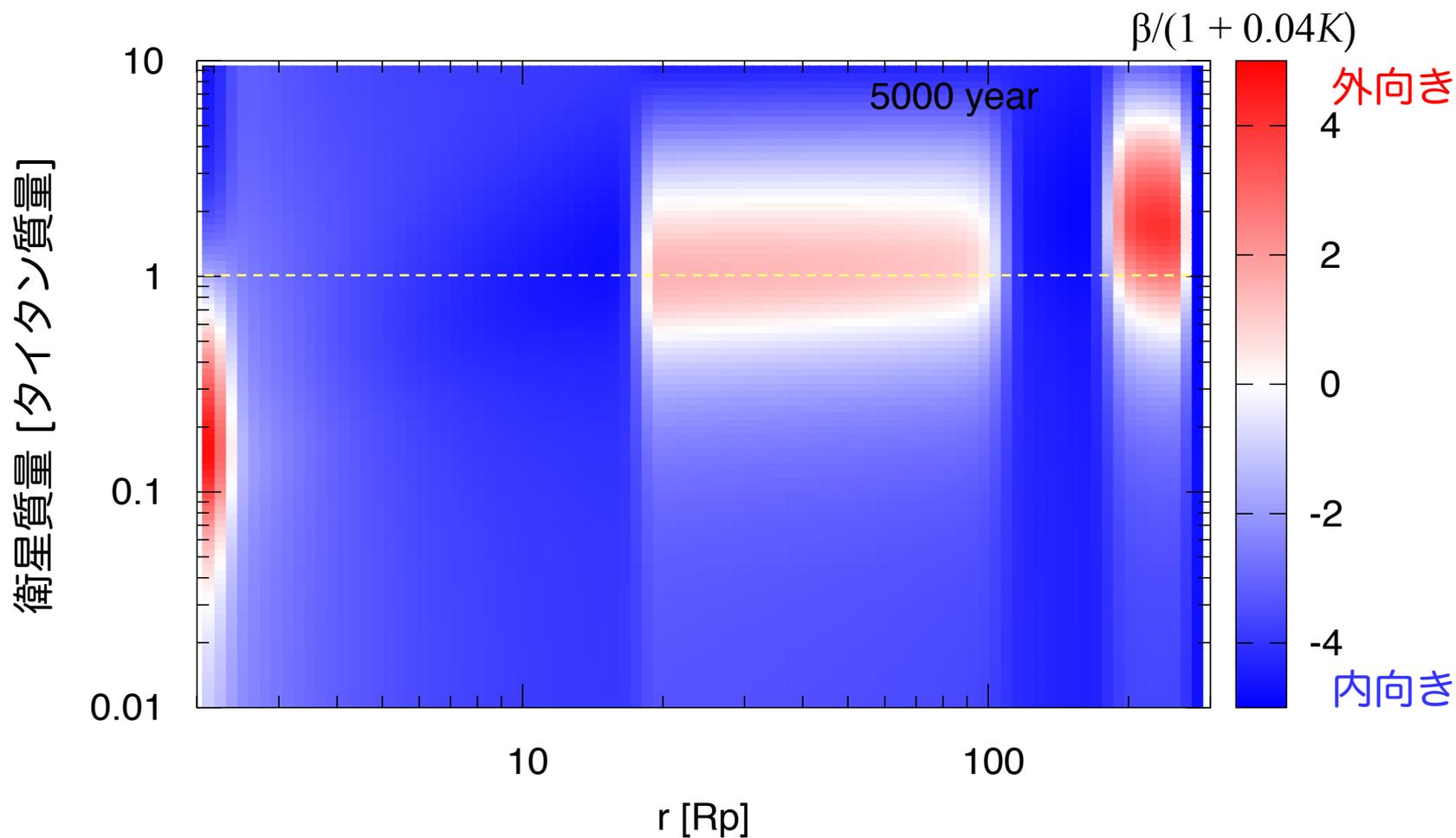
β : 移動の向きを決める係数

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



Type I から Type II への移行も考慮

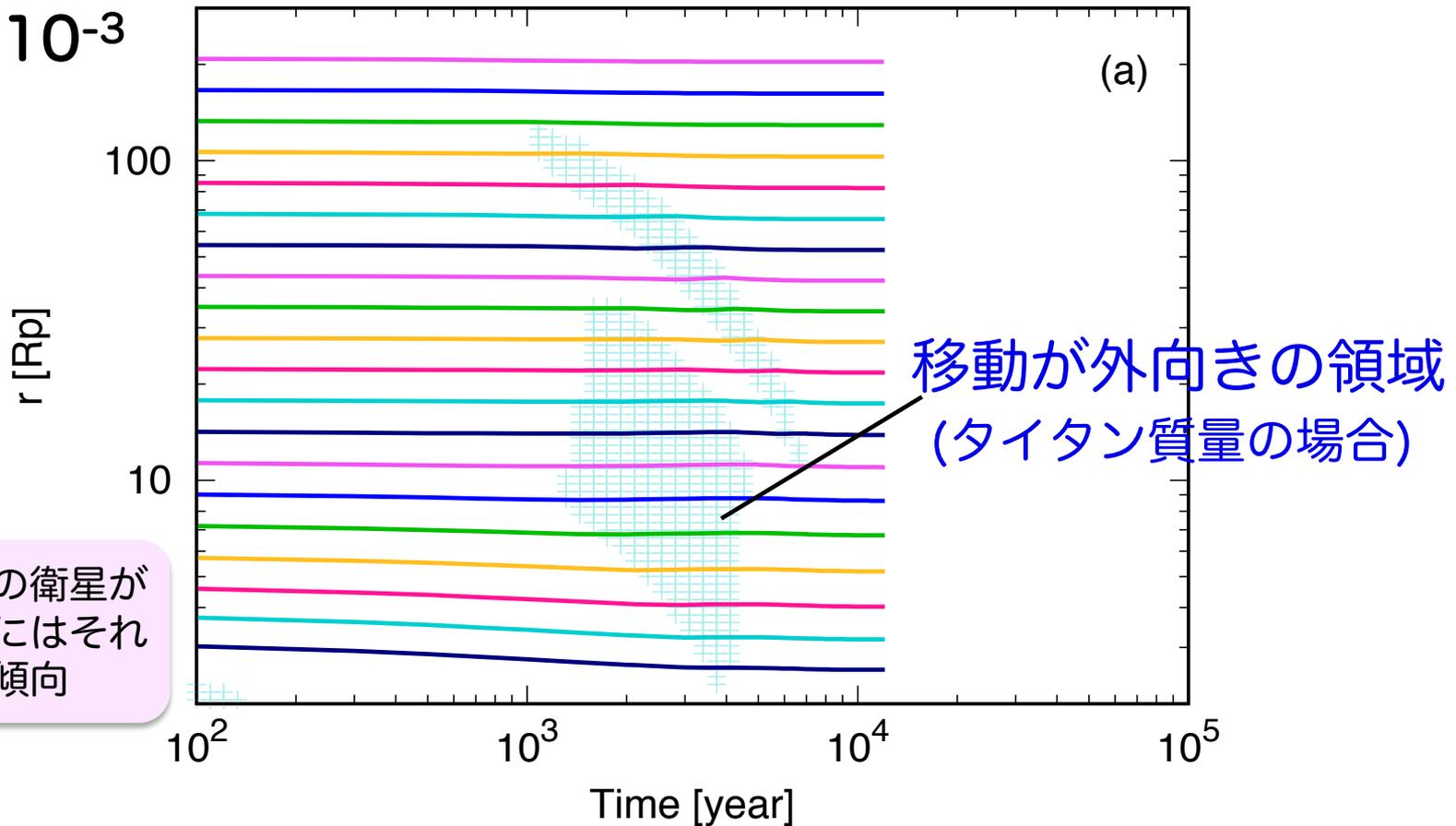
$$K = (M_m/M_p)^2 (h/r)^{-5} \alpha^{-1} \text{ (Kanagawa et al. 2015, 2018)}$$

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, 衛星はタイタン質量

⇒ 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

$\alpha = 10^{-3}$



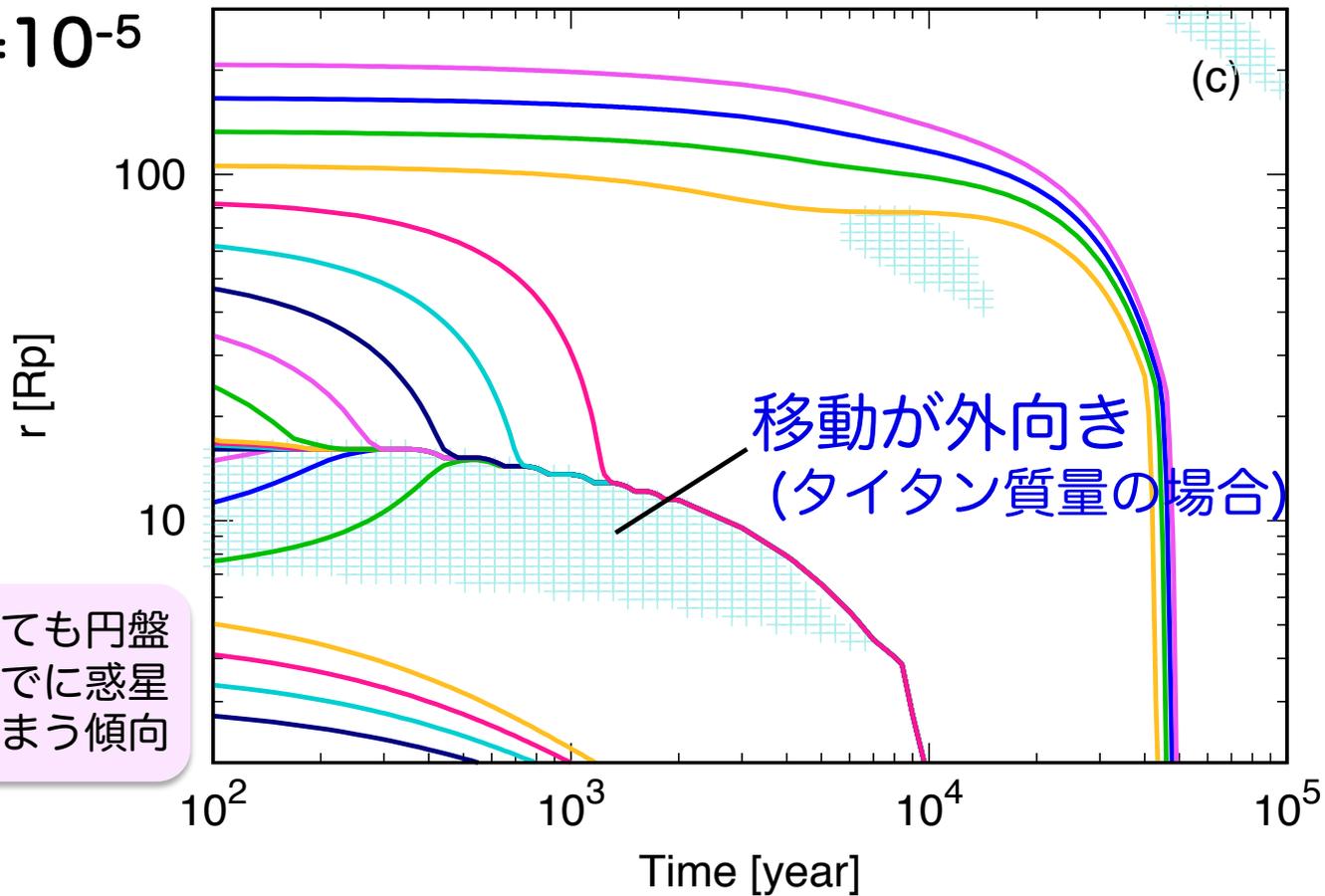
円盤内で複数の衛星が
形成した場合にはそれ
らは生き残る傾向

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, 衛星はタイタン質量

⇒ 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

$\alpha = 10^{-5}$



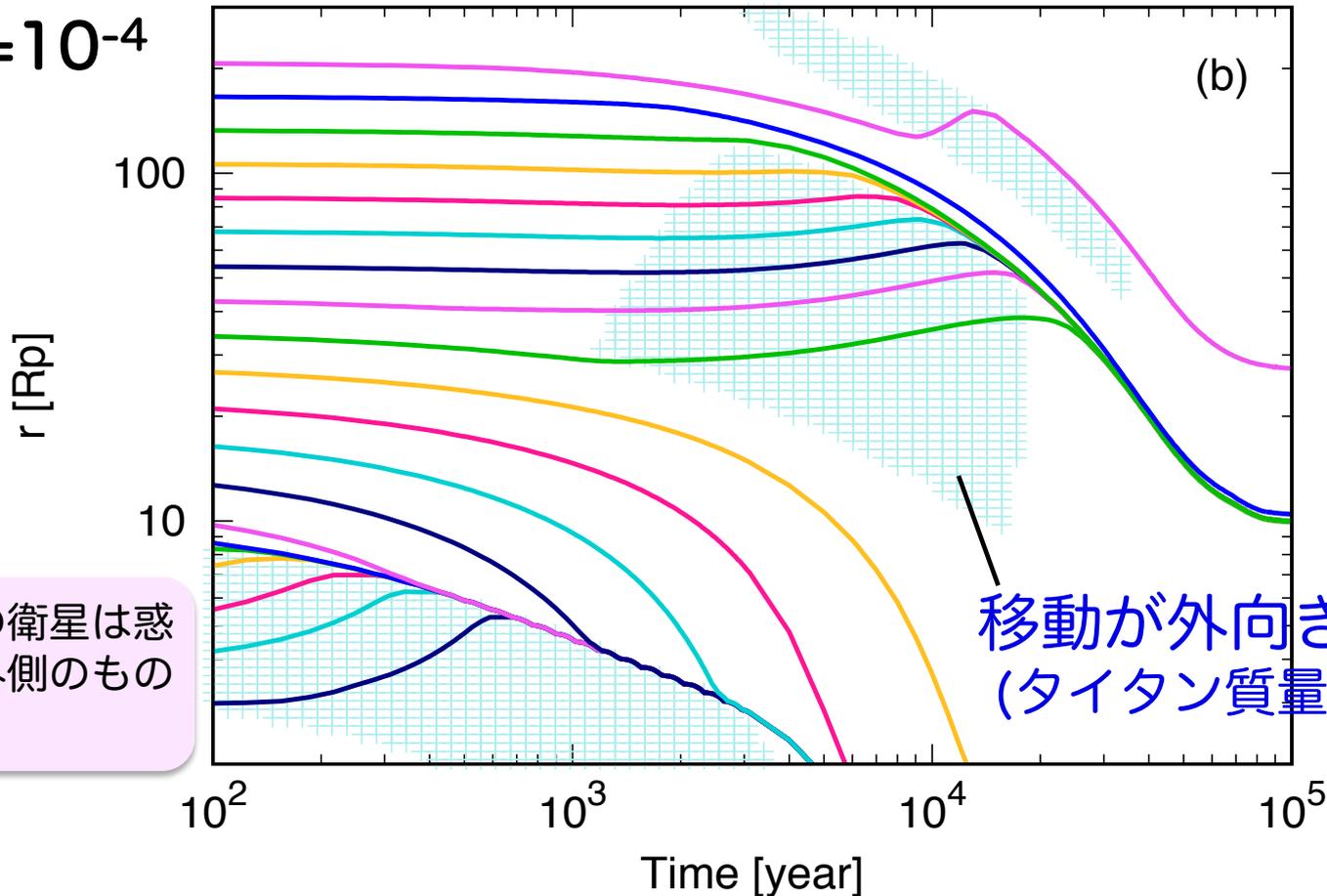
衛星が形成しても円盤が散逸するまでに惑星に落下してしまう傾向

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, 衛星はタイタン質量

⇒ 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

$\alpha = 10^{-4}$

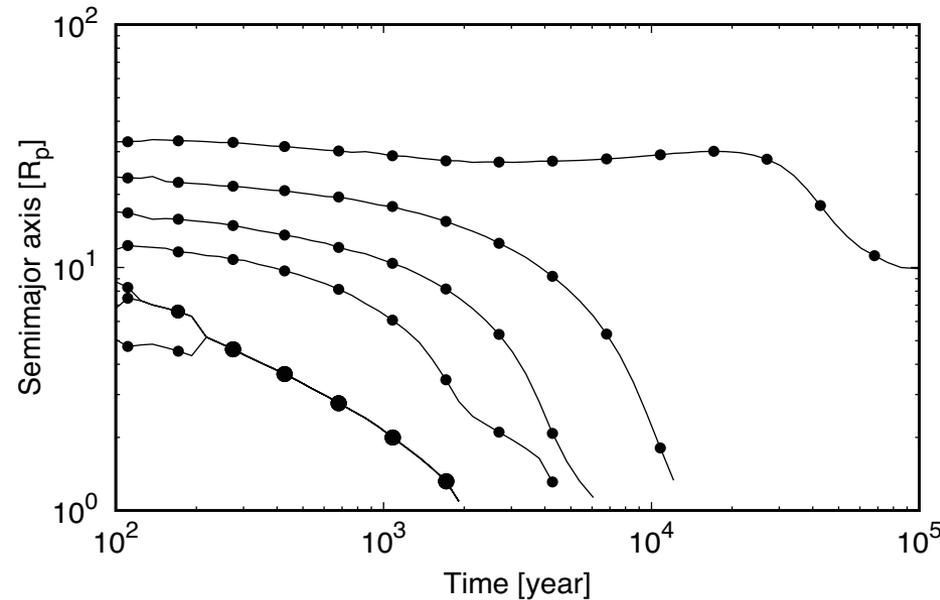


軌道が内側の衛星は惑星に落下し外側のものは生き残る

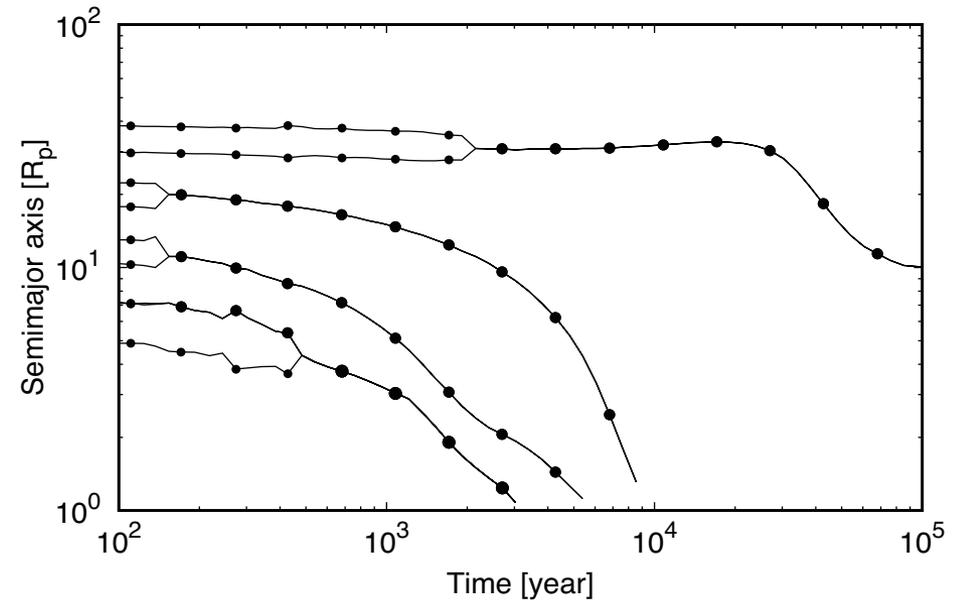
衛星同士の相互作用ありの計算

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

(a) 初期条件： $1M_{\text{Titan}}$ 7個

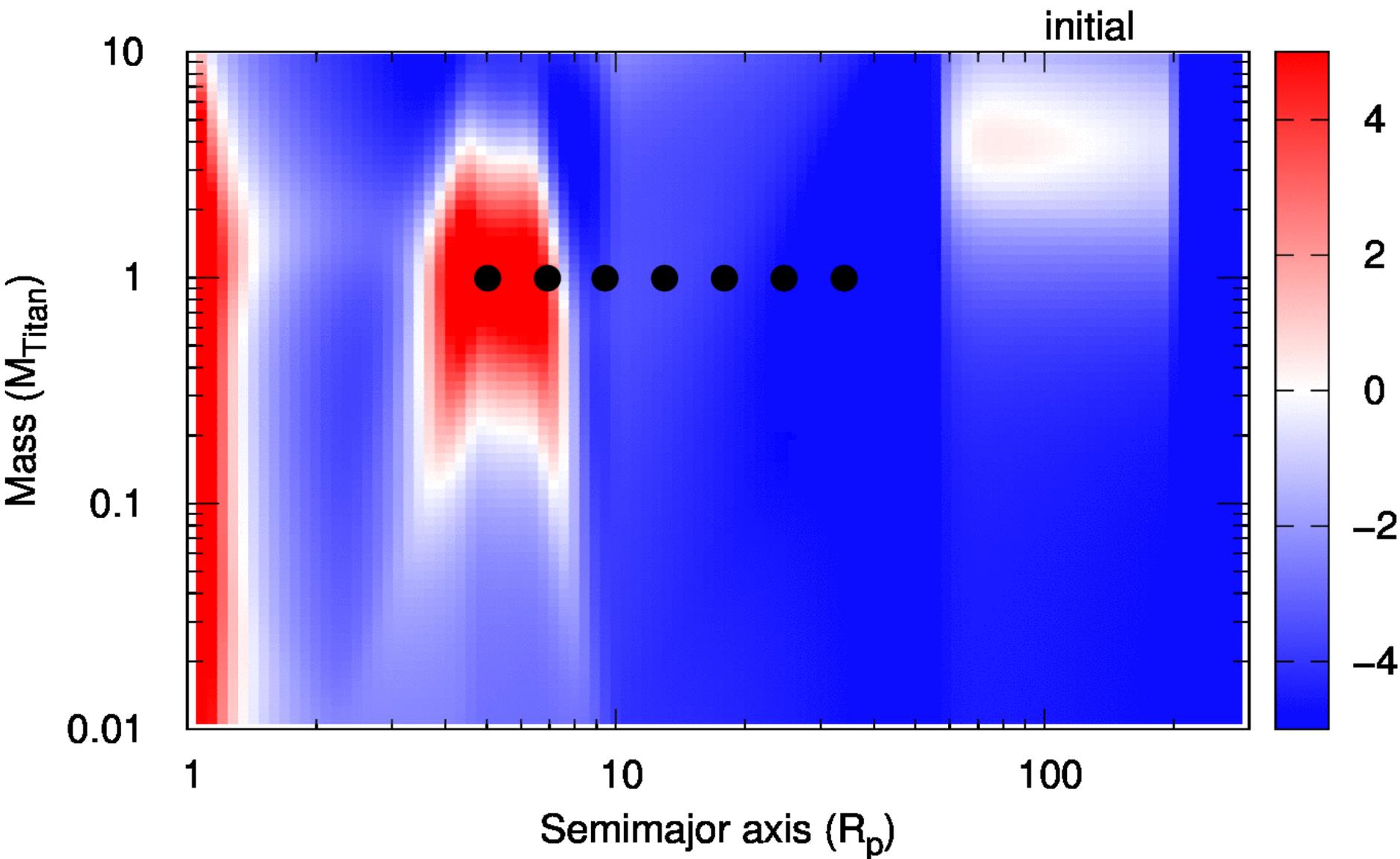


(b) 初期条件： $0.5M_{\text{Titan}}$ 9個



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つだけが残る

動画： <https://www.youtube.com/watch?v=cJ7DxHxzxVc&feature=youtu.be>



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
- 多くのパラメータでは複数 or 0個の衛星が形成
- 衛星を1つだけ形成可能な場合を発見
本モデルではタイタン質量の場合:
 $\alpha \sim 10^{-4}$ のとき
- 軌道が内側の衛星は惑星に落下し、外側の移動が外向きになる領域に位置していた衛星だけが生き残る
- 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

