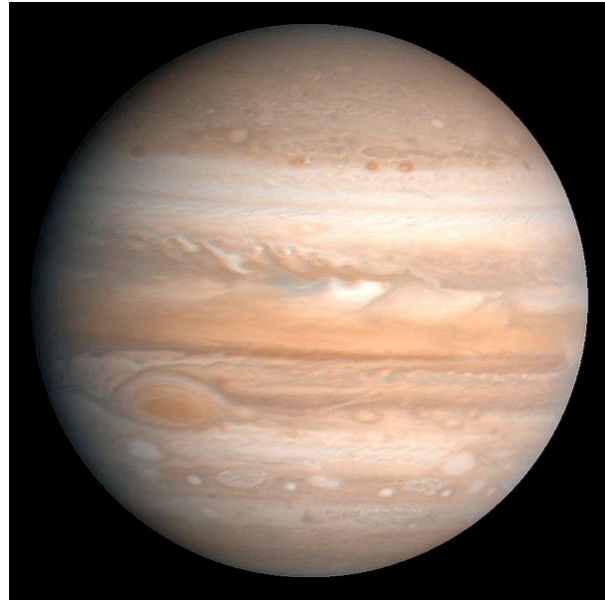


周惑星円盤での衛星系形成とその多様性の起源

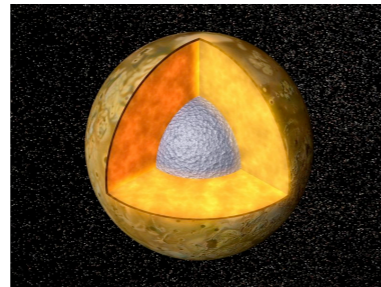
佐々木貴教, 井田茂 (東工大)

Glen R. Stewart (U. Colorado)

木星衛星系と土星衛星系はこんなに違う

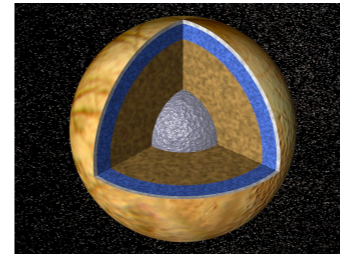


岩石



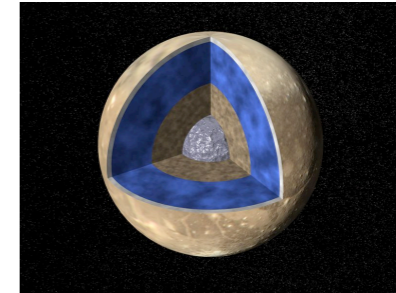
イオ

岩石



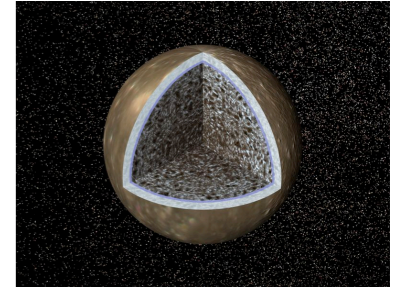
エウロパ

氷



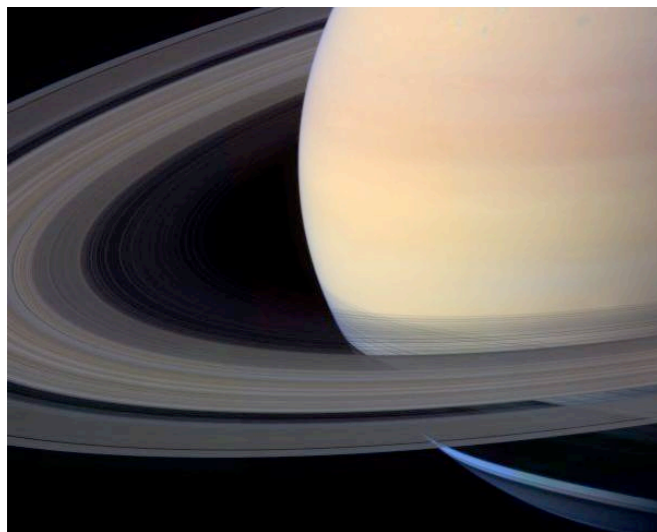
ガニメデ

氷 未分化



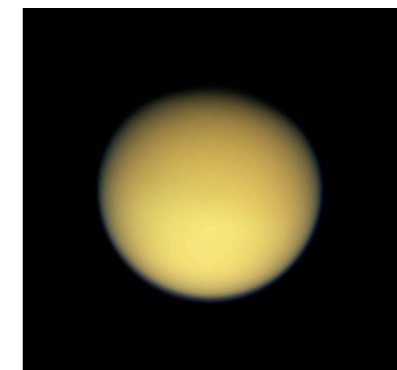
カリスト

イオ～ガニメデは互いに軌道共鳴にある



氷

大きな衛星は
タイタンのみ



タイタン

解明すべきこと；本研究のモチベーション

衛星のサイズ・数・位置

木星系：等サイズの4衛星が内側から共鳴位置に並ぶ

土星系：外側にタイタンがひとつだけ存在

異なる形成過程からの作り分けは可能か？

ガリレオ衛星間の違い

イオ・エウロパ：岩石衛星

ガニメデ・カリスト：氷衛星（カリストは未分化）

狭い範囲内での多様な衛星形成は可能か？

本研究の戦略 ～実際に衛星を作ってみよう～

周惑星円盤モデル

Canup & Ward, 2002, 2006

惑星系円盤から物質が流入
定常状態の周惑星円盤が形成
円盤の面密度と温度を与える

衛星系形成モデル

Ida & Lin, 2008, submitted

N体計算をもとにした解析解
原始惑星の成長と移動を計算
軌道共鳴に入る条件を与える

本研究のオリジナルアイデア

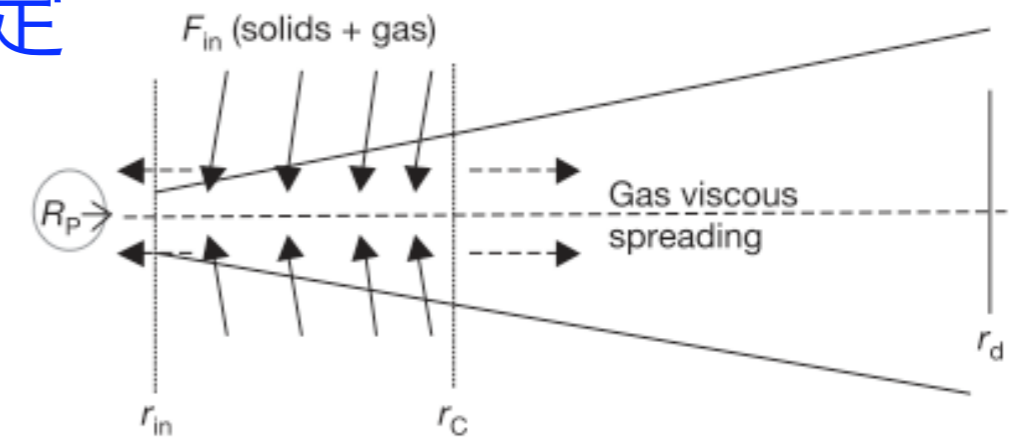
木星系・土星系円盤の違い

衛星系の違いと特徴が、必然的に生まれることを示す

Canup & Ward (2002, 2006)

円盤ガスの流入と散逸のつり合い

→ 周惑星円盤の温度・面密度を決定



$$T_c \approx 180 \left(\frac{M_p}{M_J} \right)^{1/4} \left(\frac{\tau_G}{5 \times 10^6 \text{ years}} \right)^{-1/4} \left(\frac{r}{20R_J} \right)^{-3/4} \text{ [K]}$$

$$\Sigma_g \approx 100 f_g \left(\frac{M_p}{M_J} \right) \left(\frac{r}{20R_J} \right)^{-3/4} \text{ [g/cm}^2\text{]} \quad f_g \equiv \left(\frac{\alpha}{5 \times 10^{-3}} \right) \left(\frac{\tau_G}{5 \times 10^6 \text{ years}} \right)^{-3/4}$$

$$\Sigma_d \approx \eta_{ice} f_d \left(\frac{M_p}{M_J} \right) \left(\frac{r}{20R_p} \right)^{-3/4} \text{ [g/cm}^2\text{]}$$

$$\frac{df_d}{dt} \approx 0.064 \left(\frac{M_p}{M_J} \right)^{2/3} \left(\frac{f}{100} \right)^{-1} \left(\frac{\tau_G}{5 \times 10^6 \text{ years}} \right)^{-1} \left(\frac{r}{20R_J} \right)^{5/4} \text{ [/years]}$$

Ida & Lin (2008, submitted)

惑星集積と Type I migration のタイムスケール

$$\tau_{acc} = \frac{M}{\dot{M}} \approx 10^6 f_d^{-1} \eta_{ice}^{-1} \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right)^{-1/3} \left(\frac{M}{10^{-4} M_p} \right)^{1/3} \left(\frac{M_p}{M_J} \right)^{1/3} \left(\frac{\beta}{10} \right)^2 \left(\frac{r}{20R_J} \right)^{5/4} \text{ [years]}$$

$$\tau_{mig} = \frac{r}{\dot{r}} \approx 10^5 f_g^{-1} C_1^{-1} \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right)^{1/2} \left(\frac{M}{10^{-4} M_p} \right)^{-1} \left(\frac{M_p}{M_J} \right)^{1/6} \left(\frac{r}{20R_J} \right)^{1/2} \left(\frac{\tau_G}{5 \times 10^6 \text{ years}} \right)^{-1/4} \text{ [years]}$$

落下した惑星が軌道共鳴に入る場合の共鳴間隔

$$b_{trap} = 0.16 \left(\frac{m_i + m_j}{M_{\oplus}} \right)^{1/6} \left(\frac{v_{mig}}{v_K} \right)^{-1/4} r_H \text{ [m]}$$

$b_{trap} < 2\sqrt{3}r_H \rightarrow$ 共鳴から外れ、惑星同士が衝突合体

本研究のアイデア

木星：惑星系円盤にgapを形成

→ 周惑星円盤へのガス流入がストップ

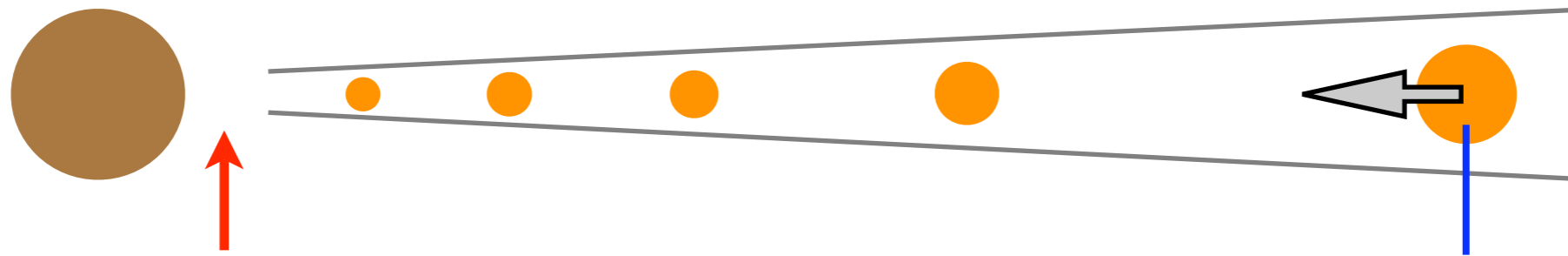
→ 木星形成直後の衛星系が残る

土星：惑星系円盤にgapを形成しない

→ 惑星系円盤散逸 = 周惑星円盤消失

→ 円盤散逸直前の衛星系が残る

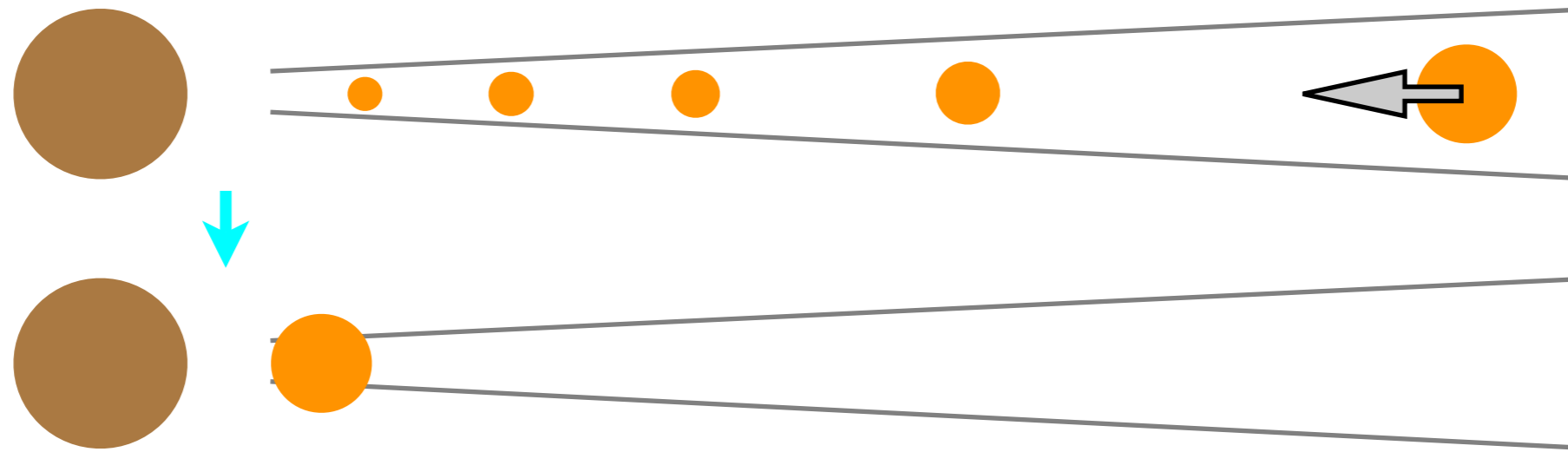
木星衛星系の形成シナリオ



木星磁場と円盤とのカップリングにより
円盤内縁（共回転半径）に空隙が形成

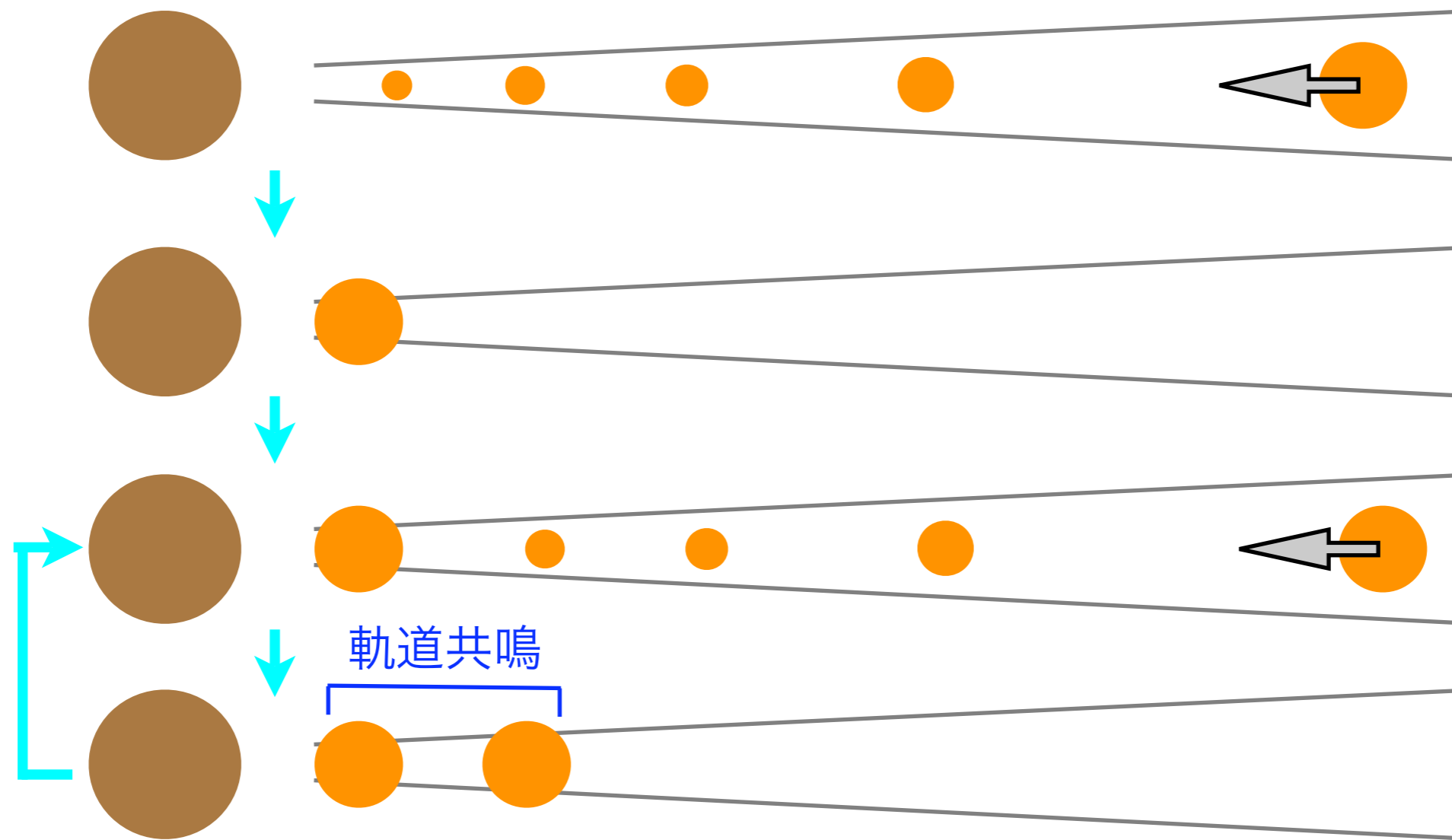
外側の微衛星が早く成長し
Type I migration で落下を始める

木星衛星系の形成シナリオ



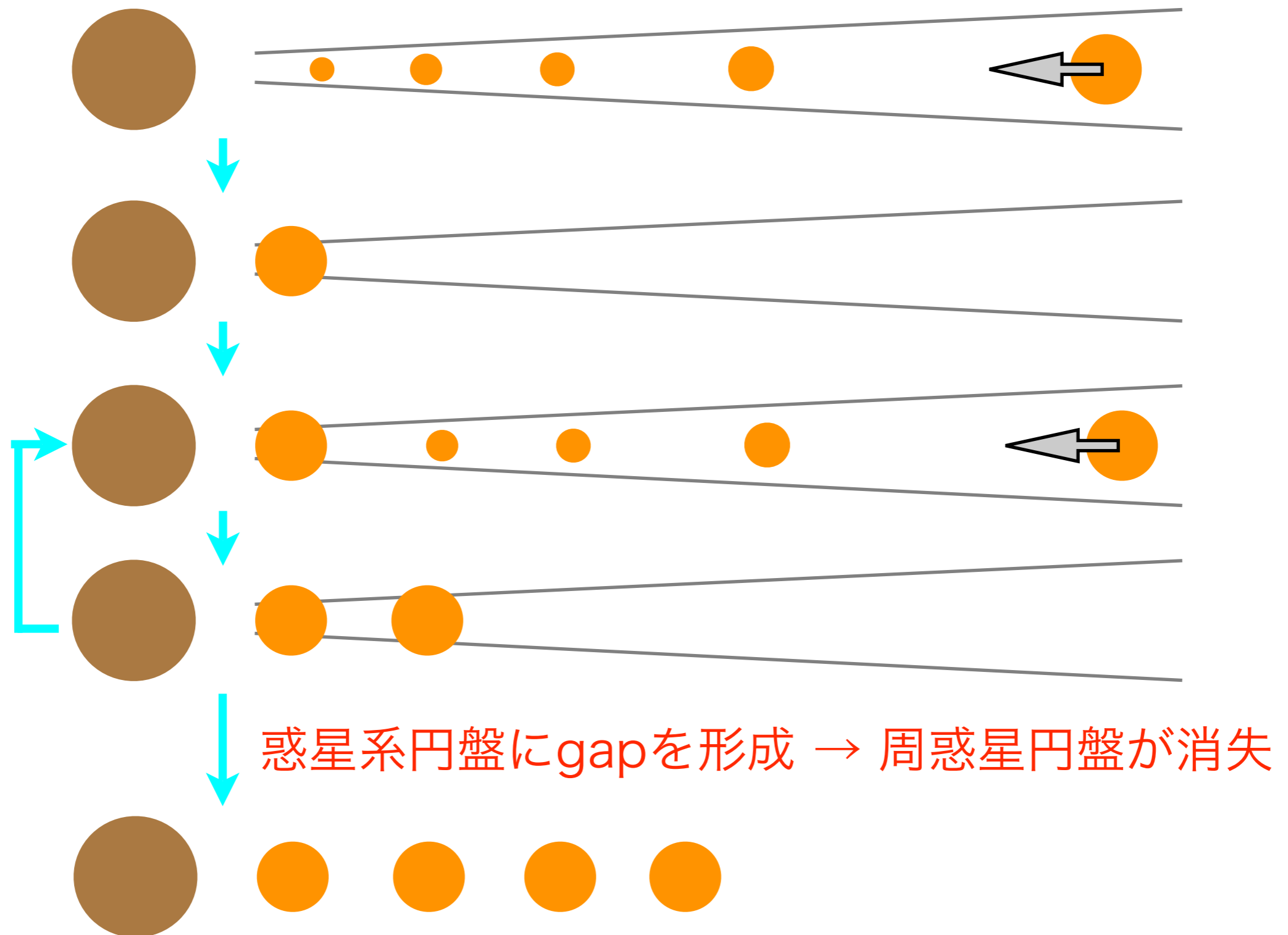
落下してきた原始衛星は
円盤内縁で落下を停止

木星衛星系の形成シナリオ

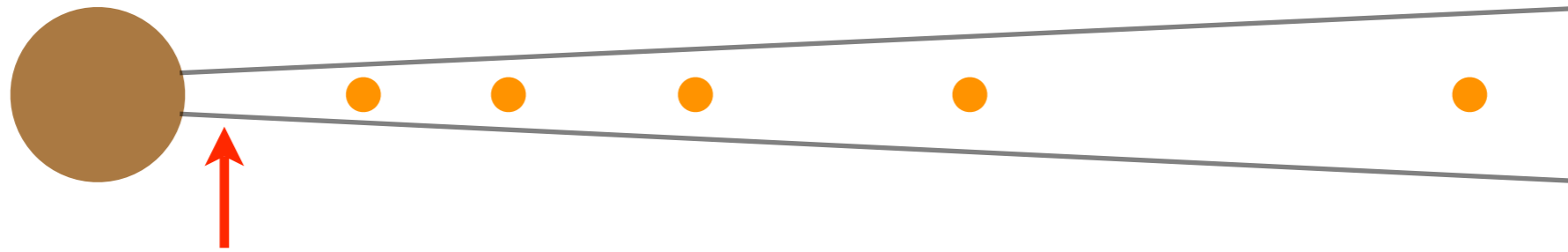


原始衛星の成長・落下が繰り返され
それぞれ内側の原始衛星との軌道共鳴にトラップ

木星衛星系の形成シナリオ



土星衛星系の形成シナリオ

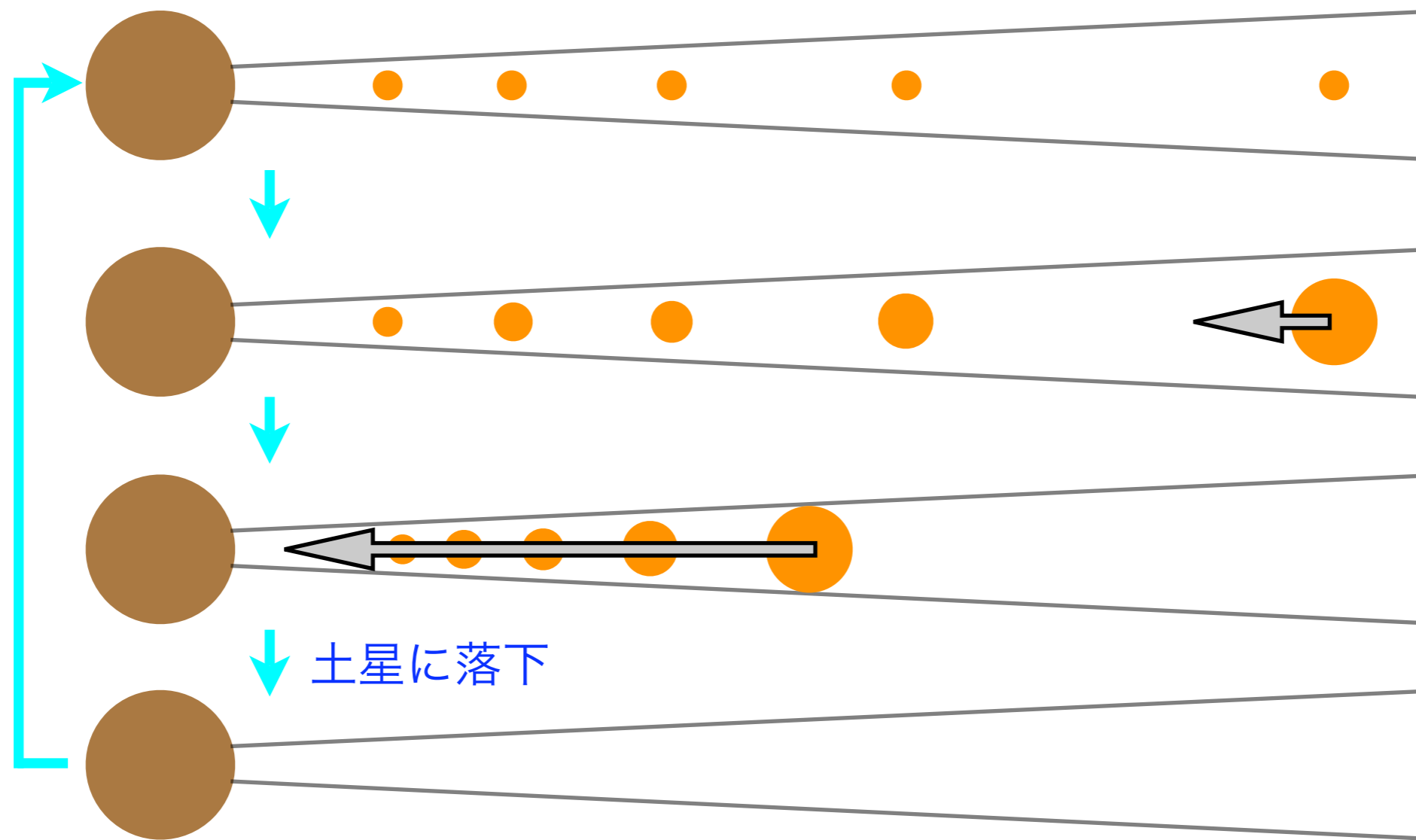


土星磁場と円盤のカップリングは弱く

円盤に空隙が形成されない

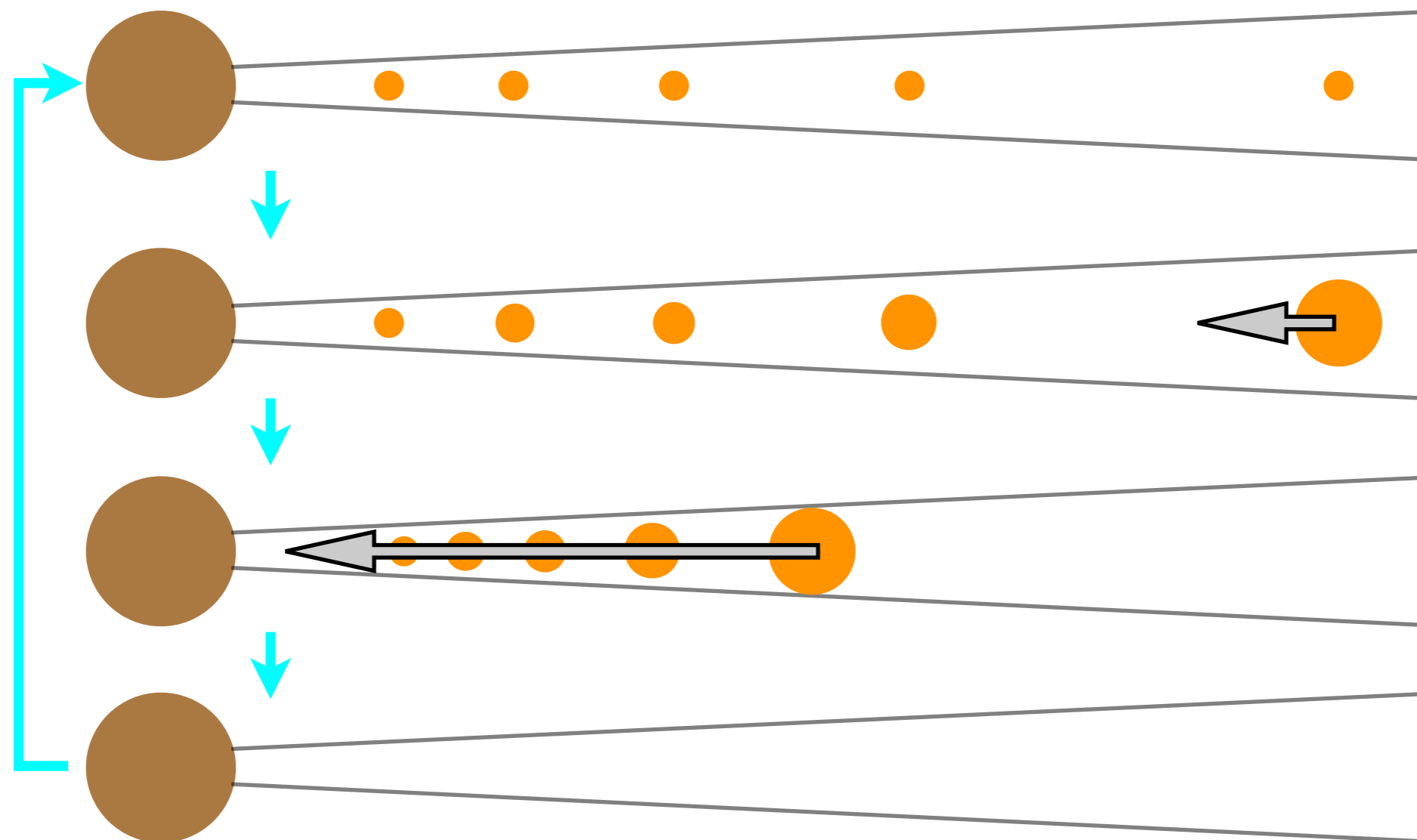
(過去に存在していても消滅)

土星衛星系の形成シナリオ



原始衛星の成長・落下・消失が繰り返される

土星衛星系の形成シナリオ



惑星系円盤の散逸とともに、周惑星円盤が消失



計算結果

Monte Carlo Simulation (n=100)

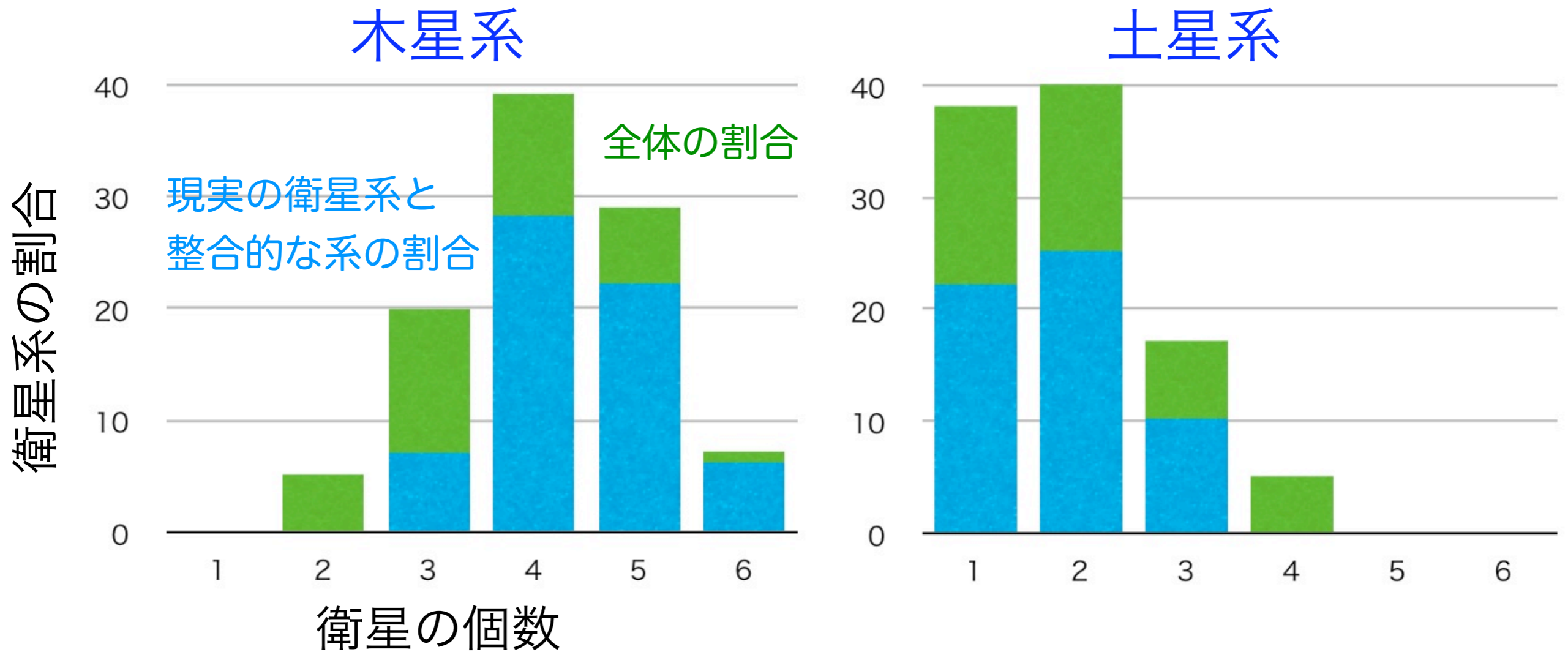
パラメータ：

円盤の粘性 (α モデルで与える)

円盤散逸のタイムスケール

微衛星の種の数と位置

計算結果；大きなサイズの衛星の個数

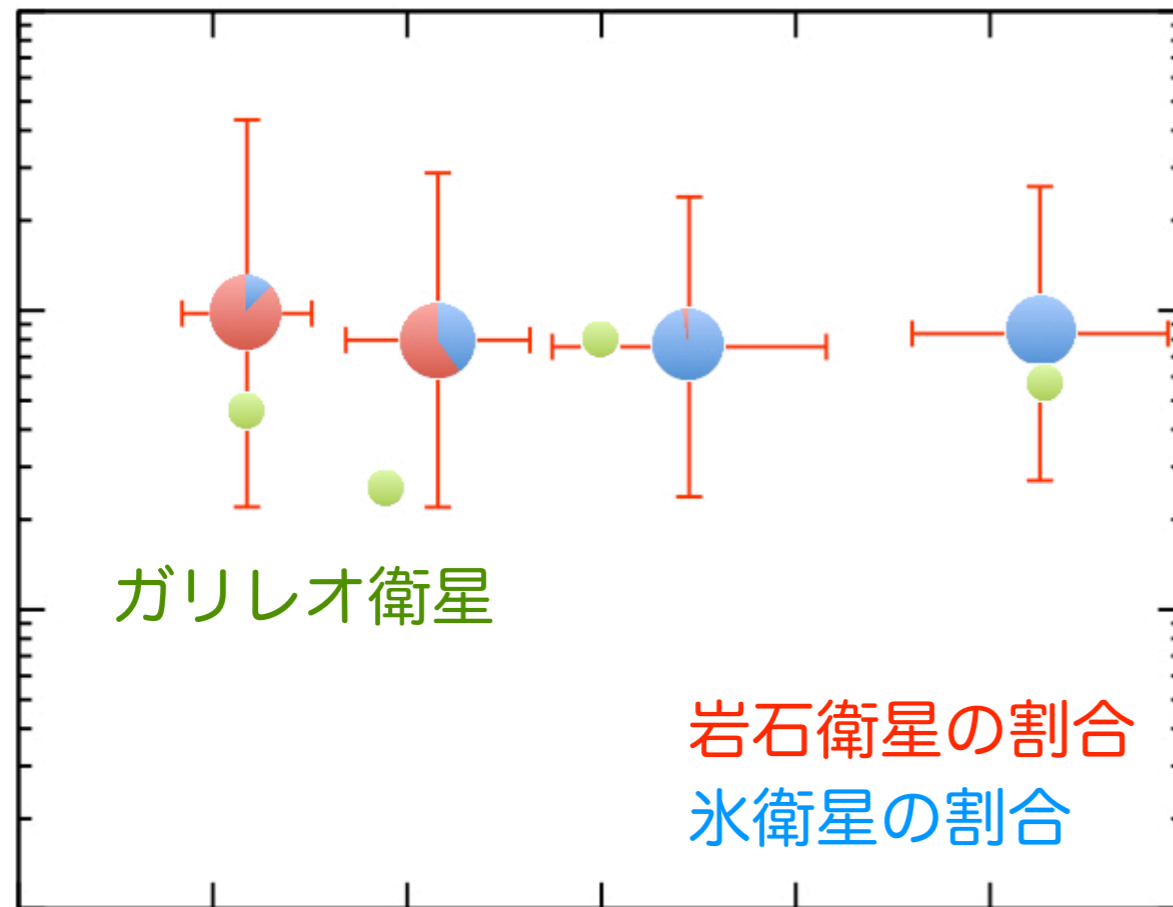


それぞれ現実の系に近い個数の衛星が形成
現実の系と統合的な衛星系も多数形成

計算結果；衛星の位置・質量・構成物質

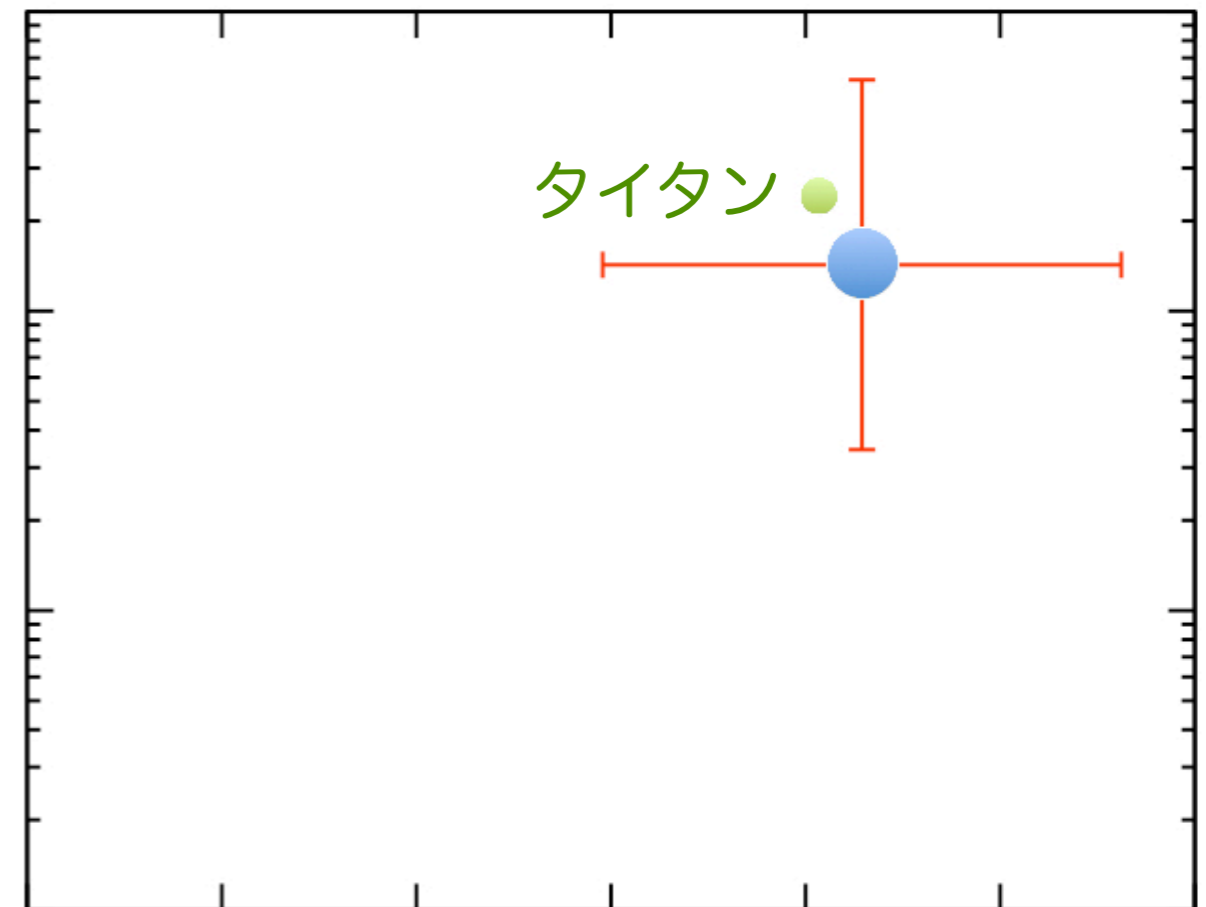
木星系

規格化した衛星の質量



規格化した衛星の位置

土星系



1 σ の範囲で現実の系と整合的な衛星系が形成

まとめ

- 木星衛星系と土星衛星系の違いを紹介
 - 衛星の個数・位置・質量・構成物質が互いに大きく異なる
- 木星衛星系と土星衛星系の作り分けのアイデアを提案
 - 2つの衛星系の特徴の違いは偶然ではなく必然である
- 衛星系形成過程を解析解を用いて Monte Carlo 計算
 - 衛星の個数・位置・質量・構成物質が全て現実と整合的
- Super-Earth系と太陽系の違いも同様に説明可能？