

系外巨大ガス惑星周りの ハビタブルムーンの形成と その安定性

東京工業大学 井田研究室
佐藤貴央(M1) 佐々木貴教

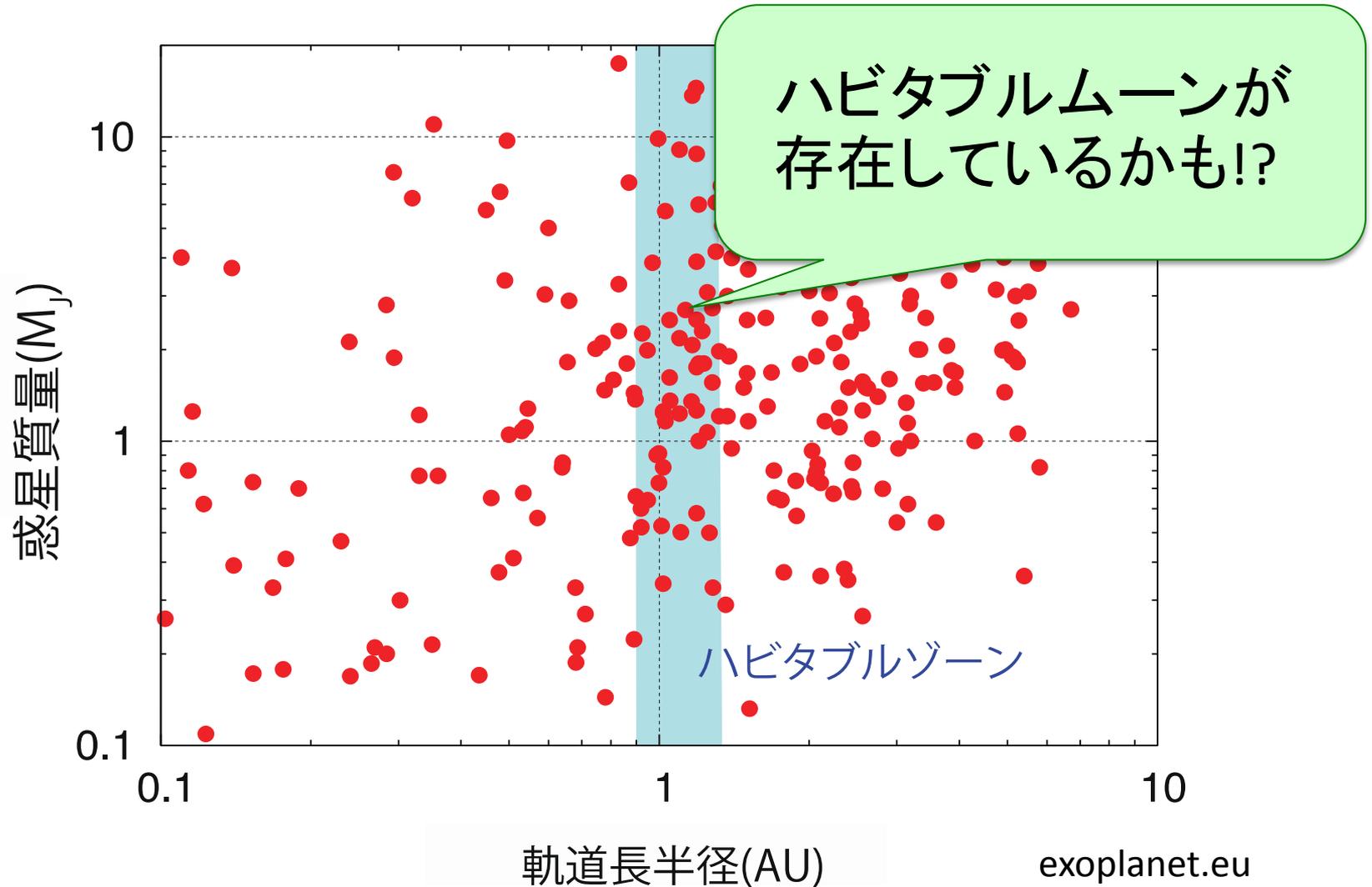
衛星系研究会@定山溪
2013, 8/7 - 9

Contents

- Introduction
 - G型星周りでの系外惑星の観測結果
 - 先行研究
 - 研究目的
- Studies
 - 衛星の形成・進化の素過程
 - 周惑星円盤内での衛星形成
 - タイプⅡ軌道移動の影響
 - 1AUでの長期的な軌道安定性
- Conclusion

Introduction

G型星周りでの系外惑星の観測結果



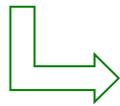
先行研究

- Williams et al. (1997) -

- 大気保持による制約

衛星の大気保持は**気候変動の緩和**のために重要！
(主な気候変動の要因・・・潮汐ロック, 離心率など)

特に...**N₂の散逸**を考慮



- 不可逆的な反応
- 有機物の代謝に利用される etc...

N₂の散逸プロセス・・・**N₂⁺の解離性再結合**

この散逸プロセスから**衛星質量**を制限



$$M_S \geq 0.12M_E$$

先行研究

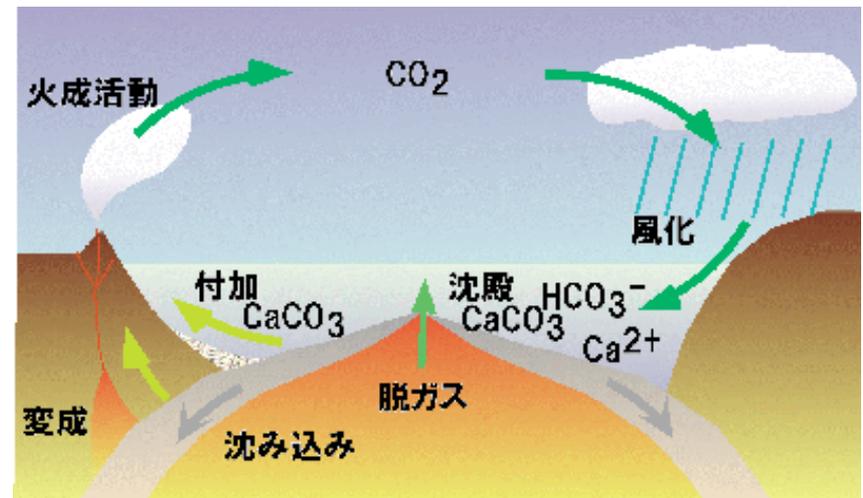
- Williams et al. (1997) -

- 炭素循環による制約

炭素循環は長期的な気候安定性を保つうえで重要！

【いくつかの必要条件】

- プレートテクトニクス
- 陸地の存在 etc...



www.ep.sci.hokudai.ac.jp

先行研究

- Williams et al. (1997) -

- 炭素循環による制約

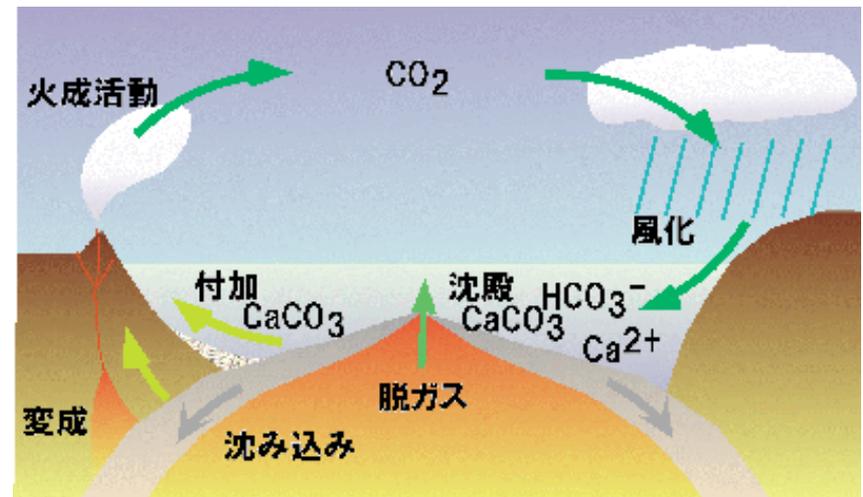
炭素循環は長期的な気候安定性を保つうえで重要！

【いくつかの必要条件】

- プレートテクトニクス
- 陸地の存在 etc...



岩石主体の衛星



www.ep.sci.hokudai.ac.jp

ハビタブルムーン

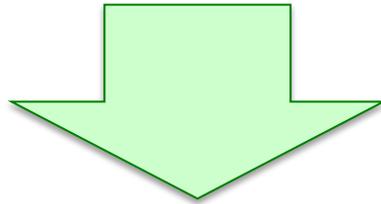
II

0.12M_E以上の質量を持つ岩石衛星

研究目的

先行研究

Williams et al. (1997)では衛星の形成、軌道進化における素過程が考えられていない

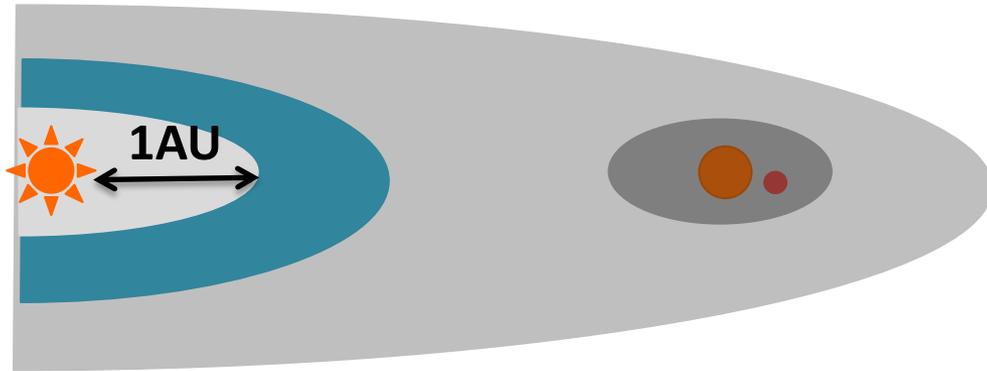


目的

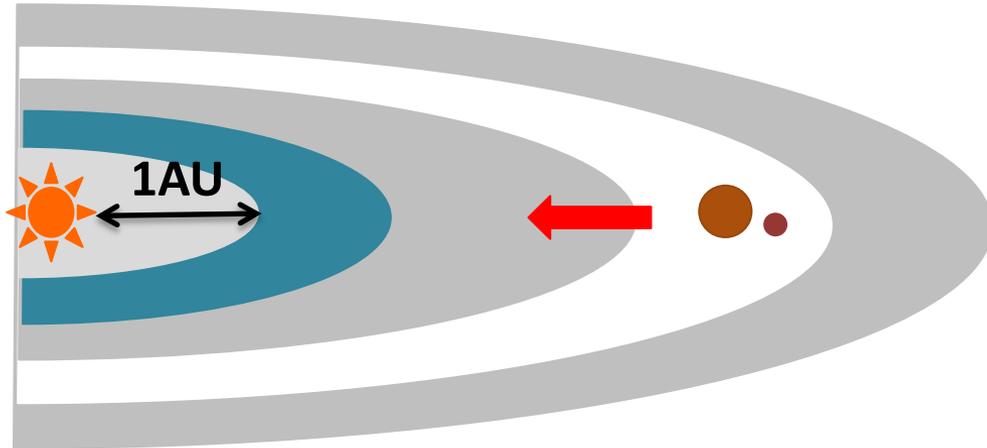
ハビタブルムーン ($M_S \geq 0.12M_E$ の岩石衛星) の形成、軌道安定性を調べる！

Studies

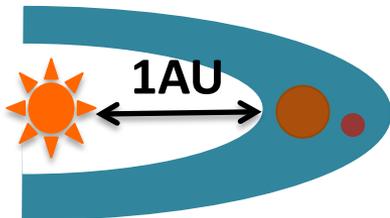
衛星の形成・進化の素過程



周惑星円盤内での衛星形成
Sasaki et al., 2010



タイプⅡ軌道移動の影響
Namouni et al., 2010



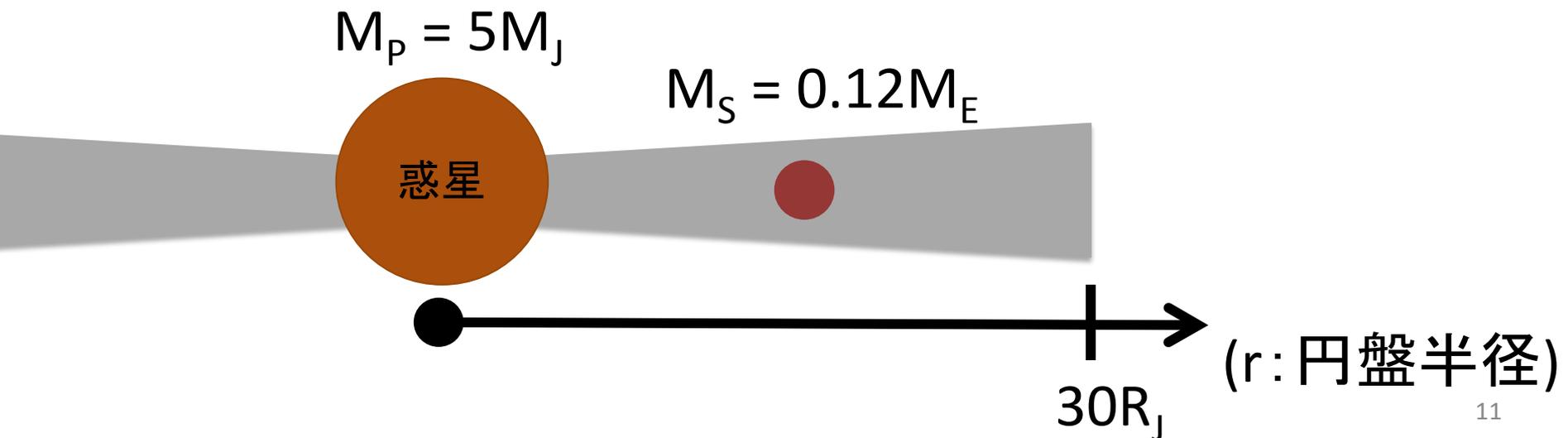
1AUでの長期的な軌道安定性
Barnes & O'brien, 2002

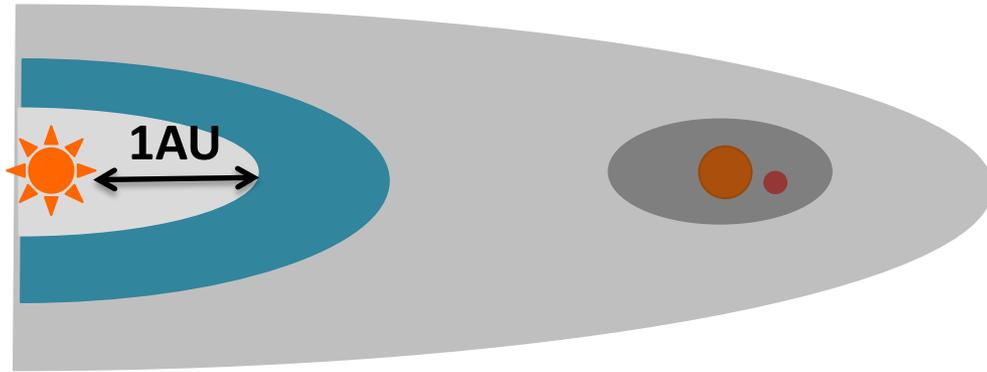
設定

質量

- 衛星質量(M_S) ... $0.12M_E$ (Williams et al. 1997)
 - ガス惑星質量(M_P) ... $5M_J$
- <衛星質量/ガス惑星質量比 (Canup & Ward 2006)>

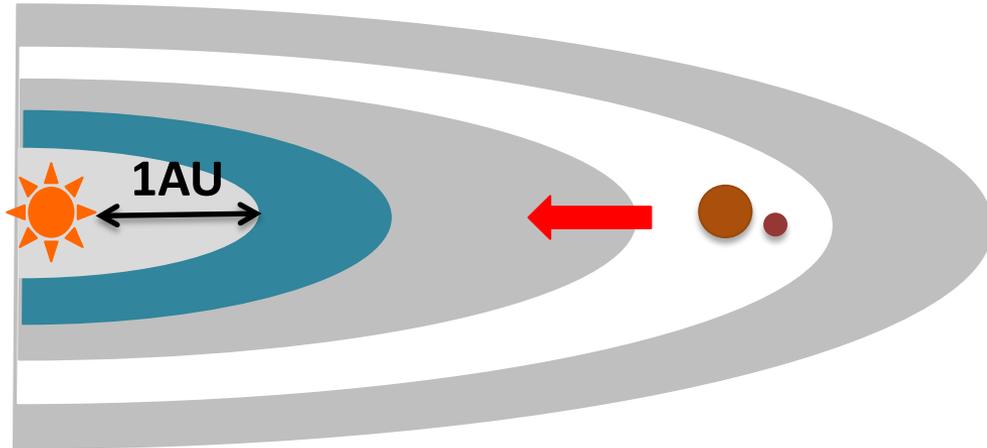
$$\frac{M_S}{M_P} \sim 10^{-4}$$





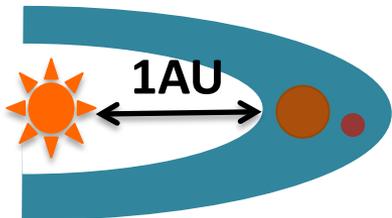
周惑星円盤内での衛星形成

Sasaki et al., 2010



タイプII軌道移動の影響

Namouni et al., 2010

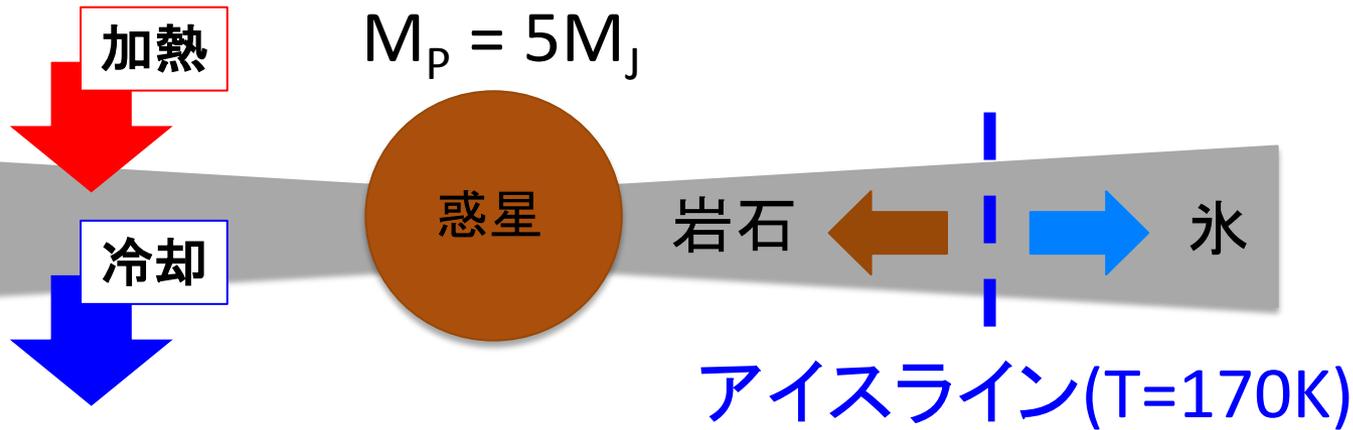


1AUでの長期的な軌道安定性

Barnes & O'Brien, 2002

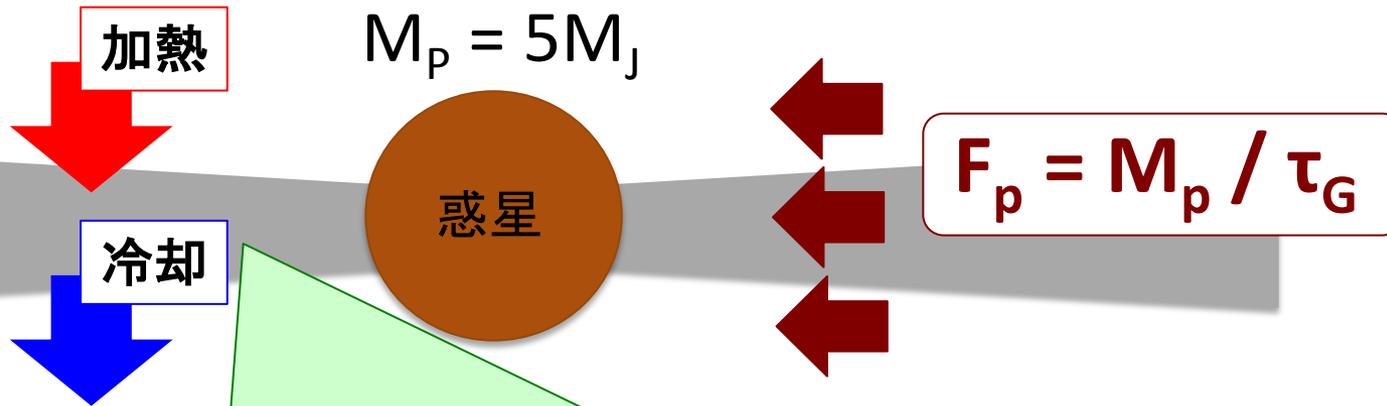
周惑星円盤内での衛星形成

- 周惑星円盤の温度構造



周惑星円盤内での衛星形成

- 周惑星円盤の温度構造



面密度 $\Sigma_g \simeq 0.55 \frac{F_P}{3\pi\nu}$

温度のつり合いの式

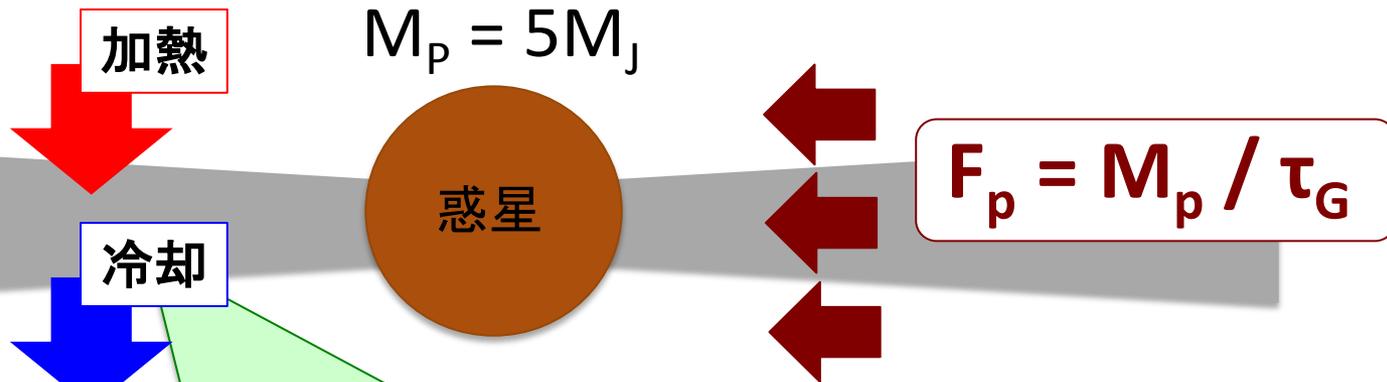
$$\sigma_{\text{SB}} T_d^4 \simeq \frac{9}{8} \Omega_K^2 \nu \Sigma_g \simeq \frac{0.55 \times 3}{8\pi} \Omega_K^2 F_P$$

黒体放射

粘性加熱

(Sasaki et al., 2010)

周惑星円盤内での衛星形成



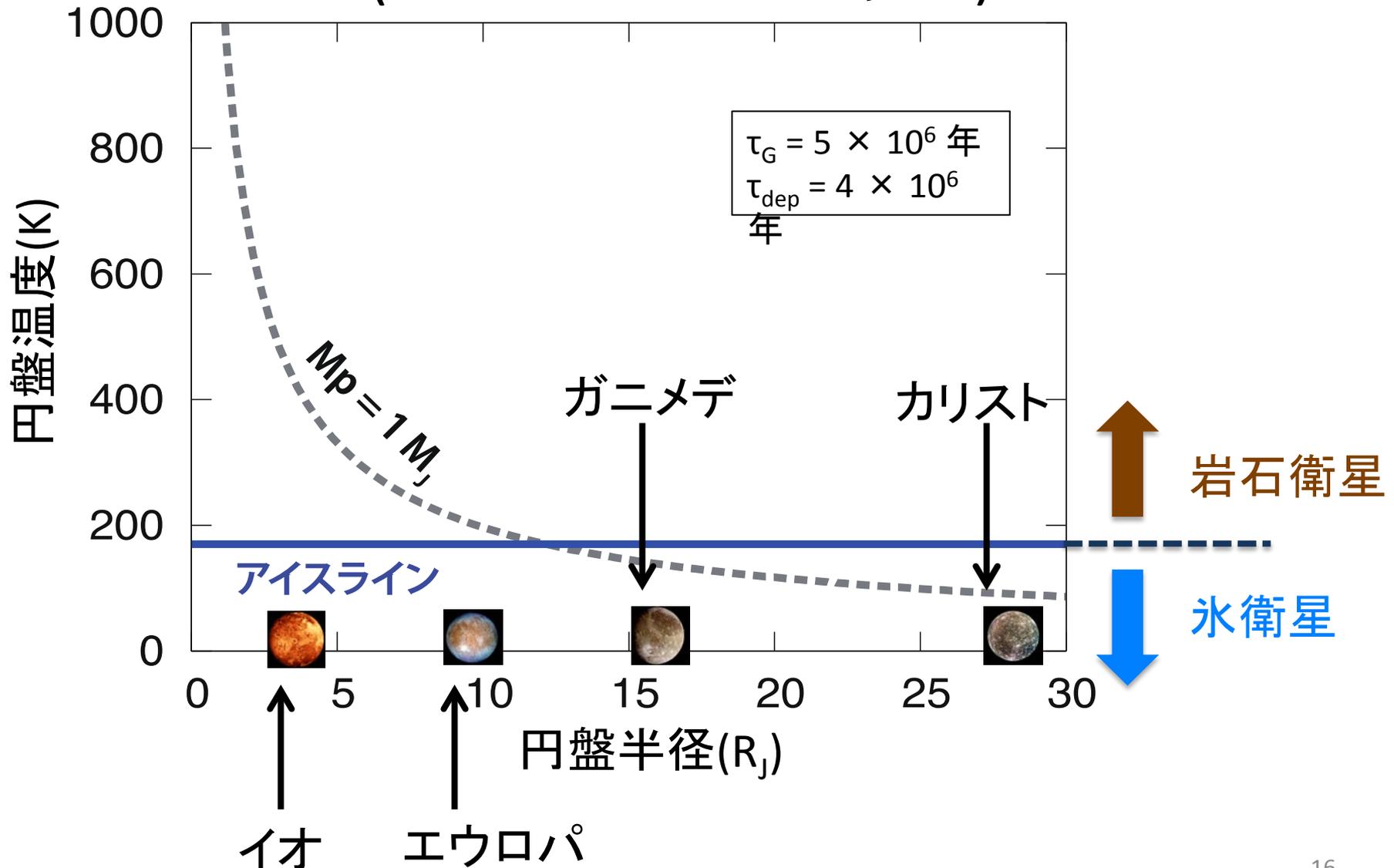
$$T_d = 160 \left(\frac{M_P}{M_J} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\tau_G}{5 \times 10^6 \text{yr}} \right)^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{r}{20R_J} \right)^{-\frac{3}{4}} \exp \left(\frac{-t}{4\tau_{\text{dep}}} \right)$$

初期円盤温度
時間変化による効果

τ_G : 周惑星系円盤からのガス流入率を決めるパラメータ
 τ_{dep} : ガス流入率の減衰を決めるパラメータ

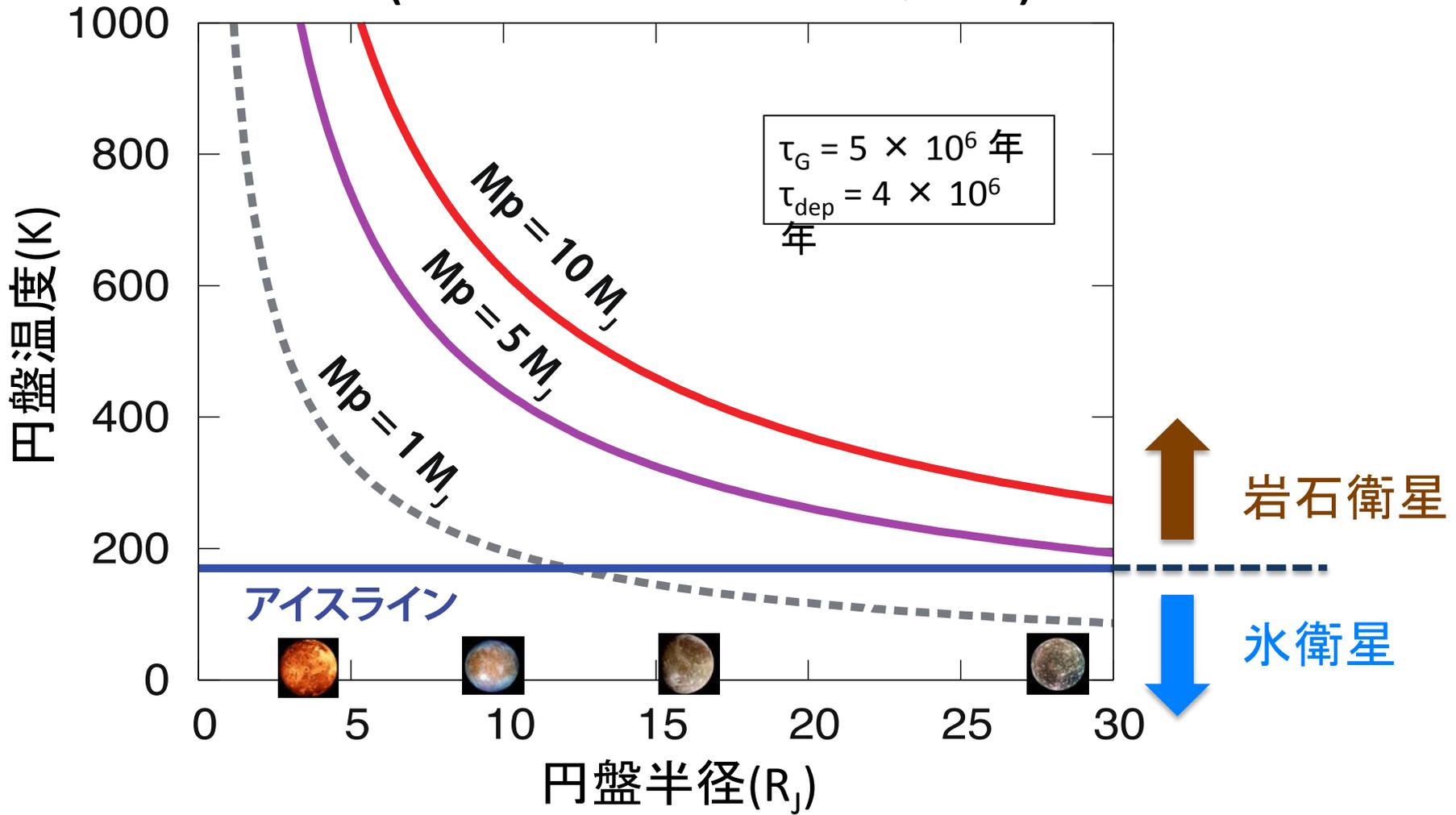
結果

($t = 5 \times 10^6$ 年の場合)

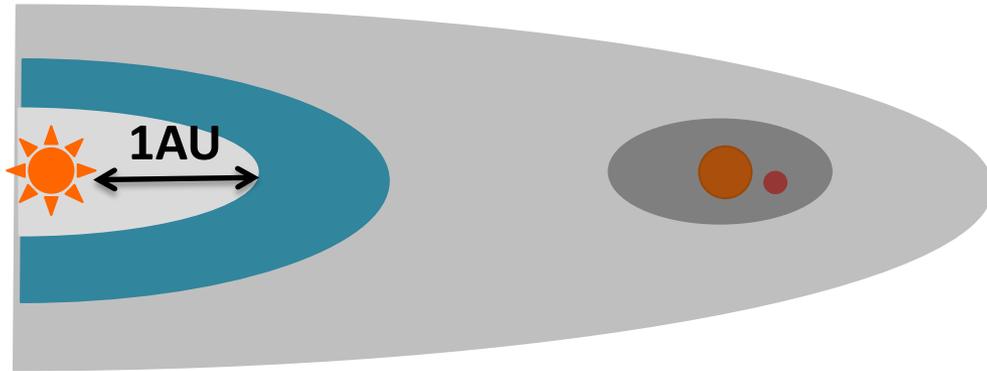


結果

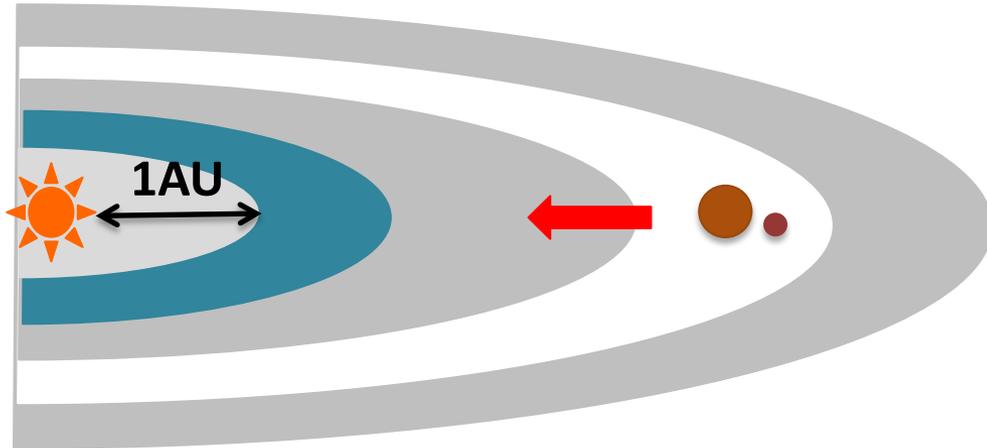
($t = 5 \times 10^6$ 年の場合)



円盤全領域でアイスラインを上回る！

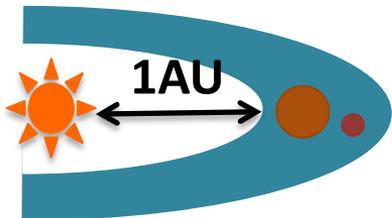


周惑星円盤内での衛星形成
Sasaki et al., 2010



タイプII軌道移動の影響

Namouni et al., 2010



1AUでの長期的な軌道安定性

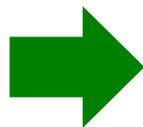
Barnes & O'Brien, 2002

タイプⅡ軌道移動の影響

- 衛星安定領域 R_{SZ} (Domingos et al., 2006)

制限3体問題を解くことにより、衛星の安定領域 R_{SZ} が次のように与えられる

$$R_{SZ} = f \times \underbrace{\left[\frac{M_P}{3M_*} \right]^{\frac{1}{3}}}_{\text{ヒル半径}} a_P$$



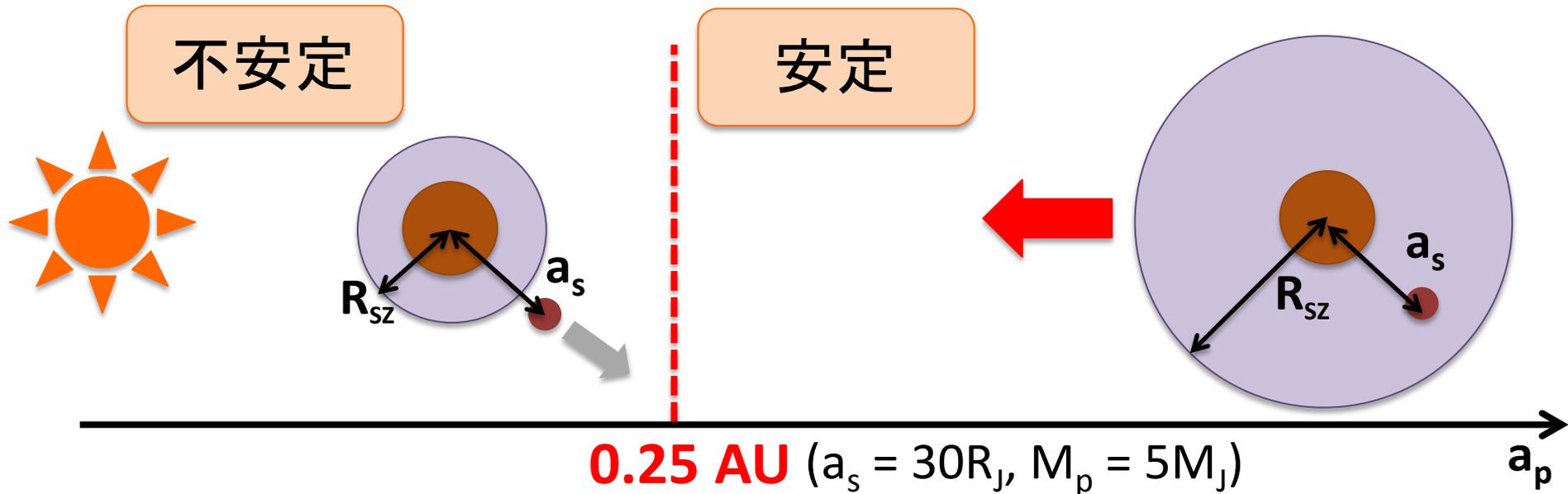
$R_{SZ} \leq a_s$ のとき
衛星軌道は不安定

- タイプⅡ軌道移動の影響

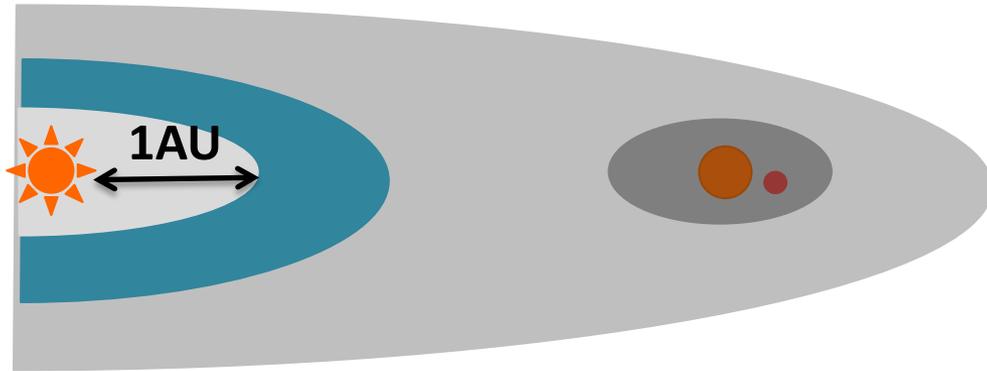
- タイプⅡ軌道移動のタイムスケールと衛星の公転速度を比較⇒直接衛星軌道には影響なし。
- ガス惑星の軌道長半径(a_p)が変化⇒ R_{SZ} が変化

タイプII軌道移動の影響

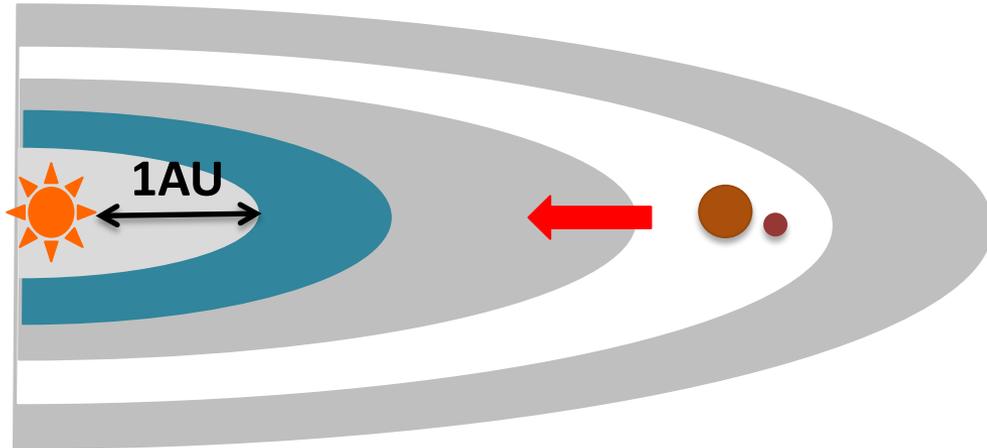
- $a_s \geq R_{SZ}$ となる a_p が衛星軌道の安定性を決める臨界値



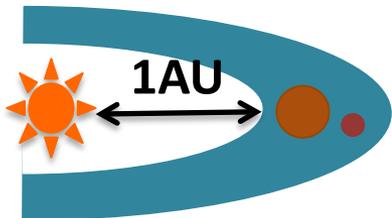
$a_p > 0.25 \text{ AU}$ で衛星は軌道安定領域に存在！



周惑星円盤内での衛星形成
Sasaki et al., 2010



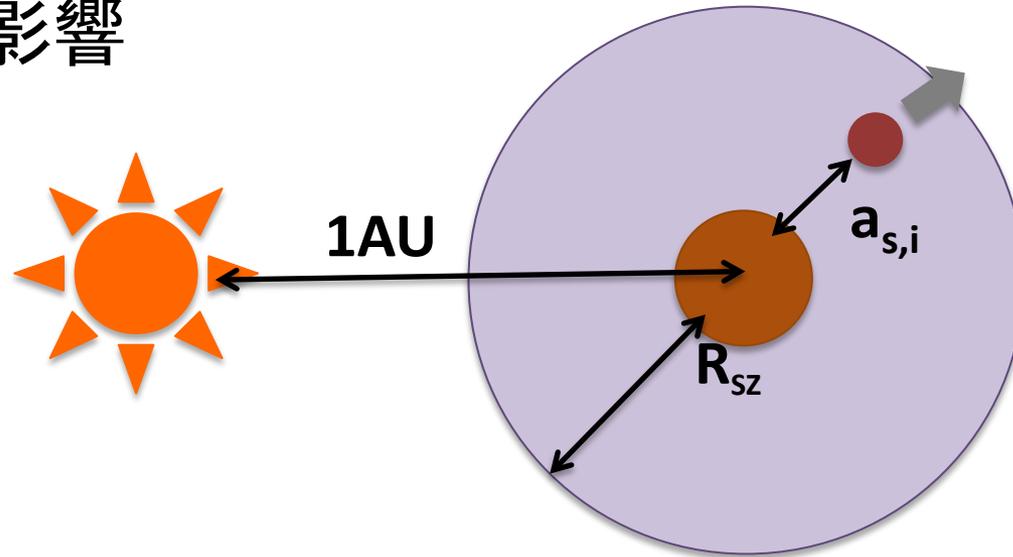
タイプII軌道移動の影響
Namouni et al., 2010



1AUでの長期的な軌道安定性
Barnes & O'Brien, 2002

1AUでの長期的な軌道安定性

- 潮汐力の影響



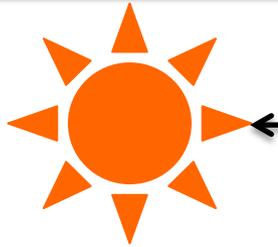
初期衛星軌道長半径($a_{s,i}$)と寿命(t)の関係式

$$t \leq \frac{2Q_P}{39k_{2P}R_P^5M_S} \left(\frac{M_P}{G} \right)^{\frac{1}{2}} \left[(R_{SZ})^{\frac{13}{2}} - (a_{s,i})^{\frac{13}{2}} \right]$$

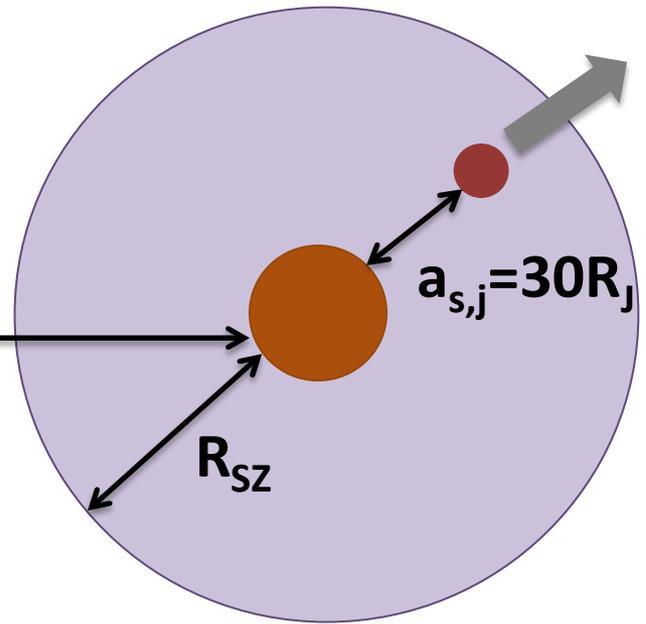
Q_p : 潮汐散逸に関するパラメータ
 k_{2p} : 惑星のラブナンバー

t と $a_{s,i}$ の関係を調べる!

$$R_{SZ} \left(= f \times \left[\frac{M_P}{3M_*} \right]^{\frac{1}{3}} a_P \right)$$



1AU



$$a_p = 1\text{AU}, a_{s,i} = 30R_J$$

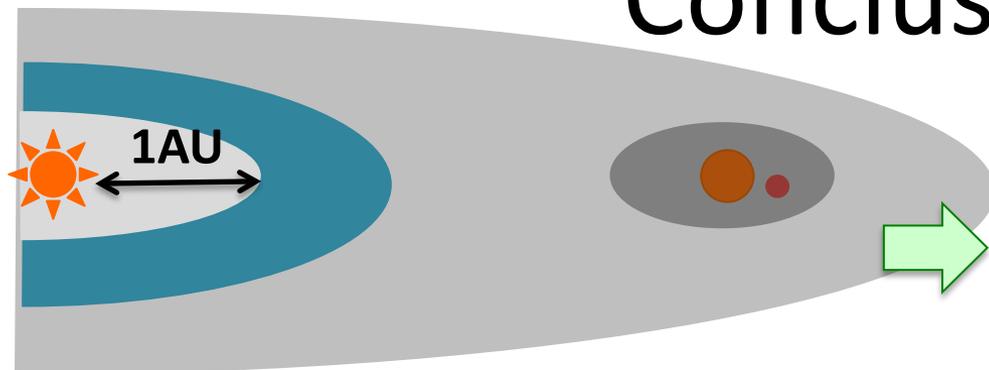
$$a_p = 0.1\text{AU}, a_{s,i} = 5R_J$$

- $R_{SZ} \sim 120R_J$
 - $R_{SZ} < a_s$ となるt
- ➔ $t \sim 10^{16} \text{ yr} \gg 10^9 \text{ yr}$

- $R_{SZ} \sim 12R_J$
 - $R_{SZ} < a_s$ となるt
- ➔ $t \sim 10^{-5} \text{ yr} \ll 10^9 \text{ yr}$

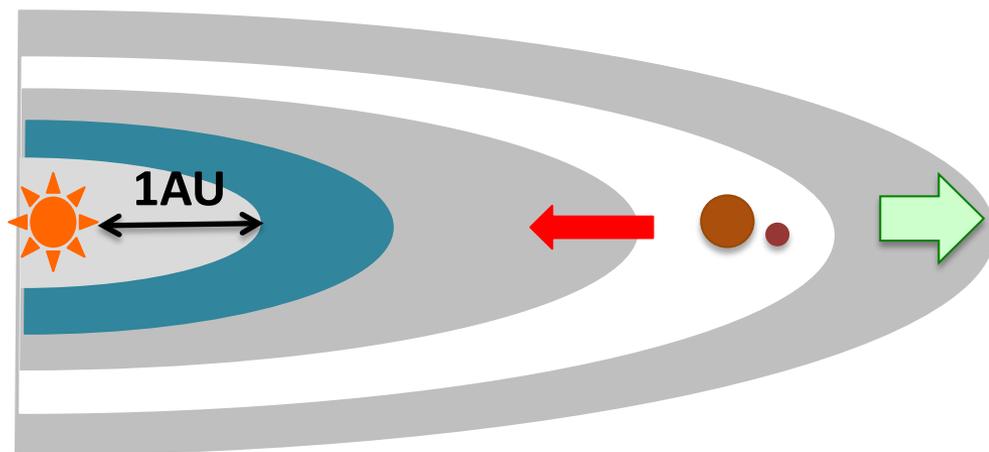
1AUでは $a_{s,i}$ に関わらず長期的に安定！！

Conclusion



周惑星円盤内での衛星形成

$M_p > 5M_J$ ならば
 $M_s > 0.12 M_E$ の岩石衛星の
可能性高



タイプ II 軌道移動

$a_p > 0.25\text{AU}$ ならば
衛星軌道は安定



長期的な軌道安定性

1AU ならば数十億年間
軌道安定を維持

ハビタブルムーンの形成 & 長期間の軌道安定が可能！

ハビタブルゾーンについて

- 内側境界条件(暴走温室条件)

惑星放射には「射出限界」と呼ばれる上限が存在

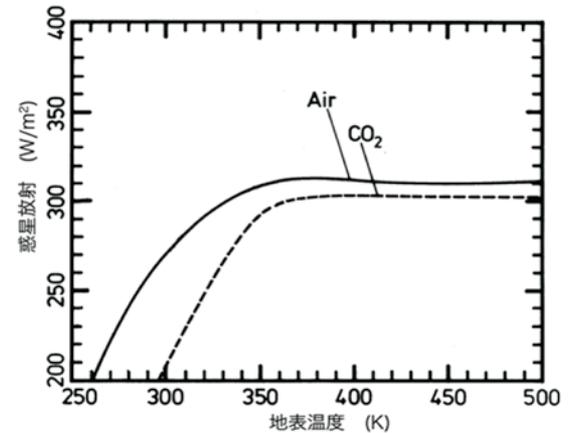
この上限を超える太陽放射が入射



入射/放射のバランスが崩れる

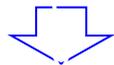


全ての水が蒸発するまで、暴走的に温度上昇

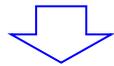


- 外側境界条件(凍結限界条件)

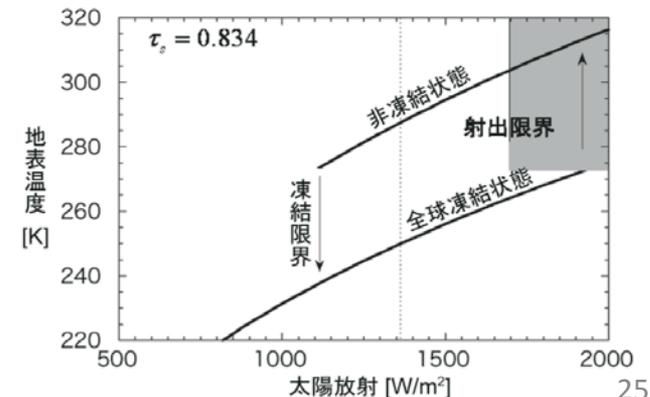
アルベドの違いによって多重平衡解が存在



太陽放射を弱くすると全球凍結状態に遷移

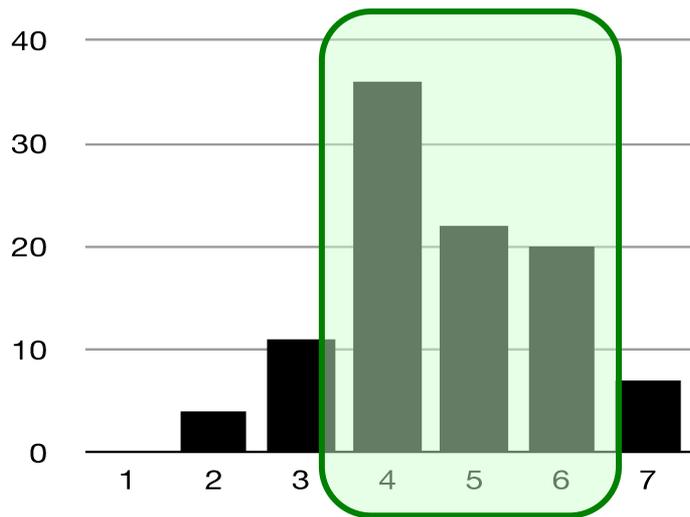


凍結限界

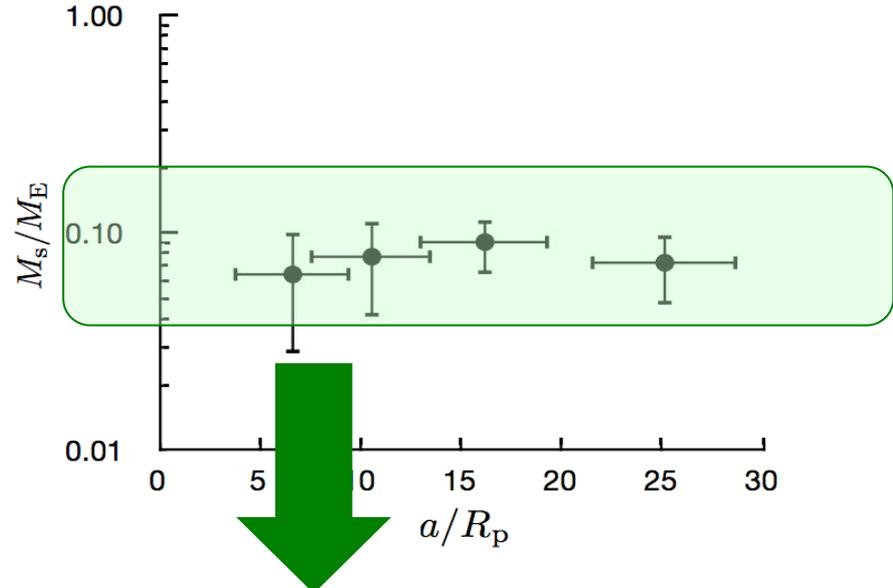


10M_Jの木星による衛星形成

- 10M_Jのガス惑星において、Sasaki et al.(2010)と同様の population synthesis model を用いた計算結果(佐々木さん)



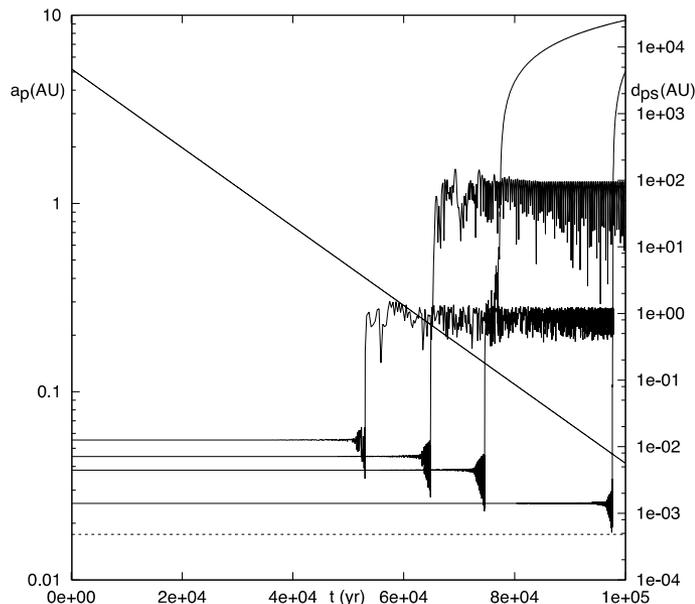
80%の確率で4~6個の衛星が形成



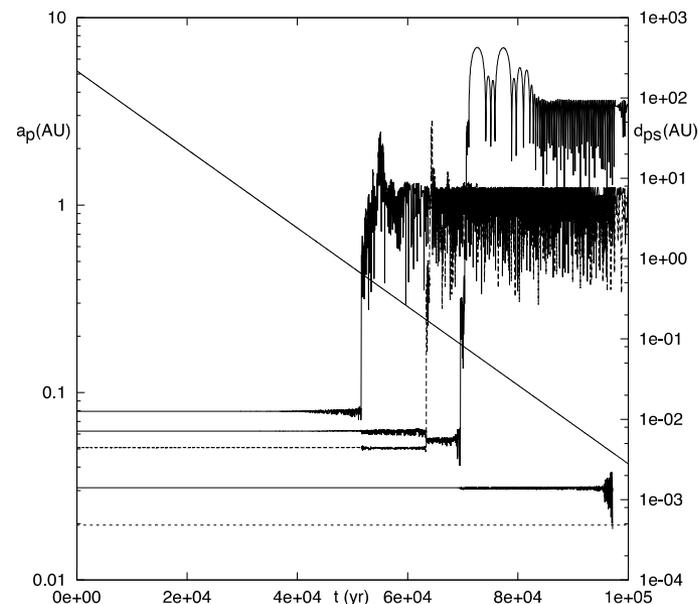
衛星が4つ形成される場合、0.1M_E程度の衛星が形成されうる

Namouni et al. (2010)

木星系におけるタイプ II 軌道移動の影響の数値計算結果



衛星間の相互作用なし



衛星間の相互作用あり

- 軌道に変化が生じ始める位置は解析解とほぼ同値
- 相互作用により多少軌道のずれは変化