

ガス抵抗による微惑星の捕獲過程

末次竜 大槻圭史

神戸大学

衛星系研究会(2015/07/21-22)

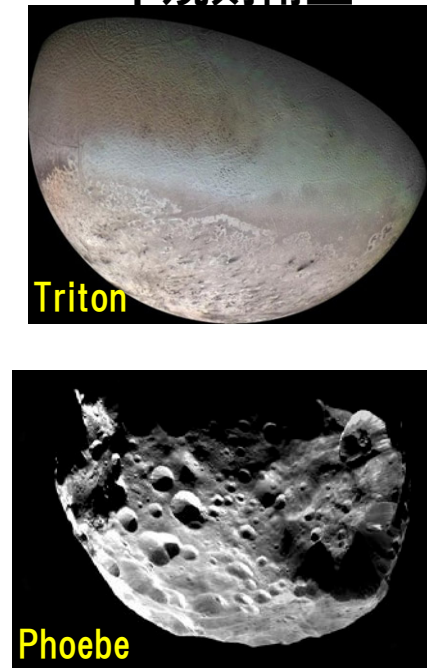
衛星

- 巨大惑星は多くの衛星をもつ
 - ・規則衛星
 - ・不規則衛星

規則衛星



不規則衛星

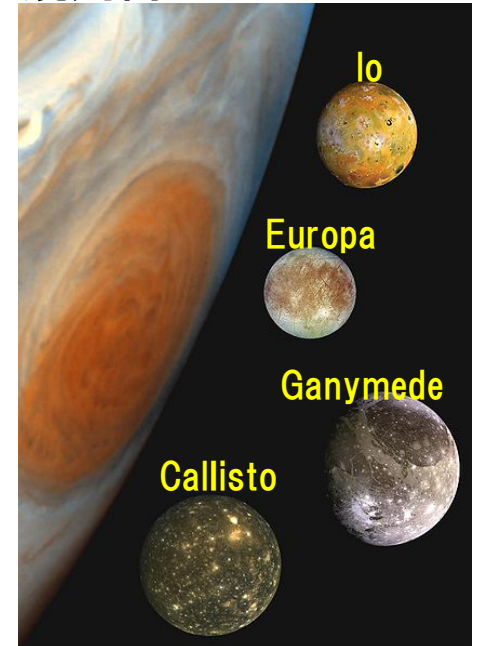


衛星

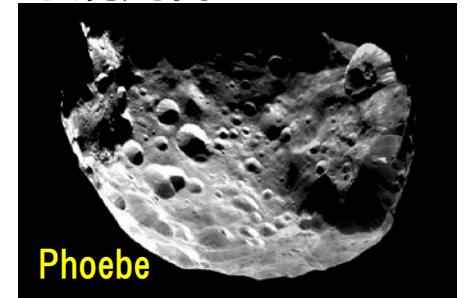
- 規則衛星
 - ・円軌道で惑星赤道面を公転
 - ・惑星の近くを公転

- 不規則衛星
 - ・楕円で傾いた軌道が多い
 - ・逆行のものもある
 - ・捕獲された微惑星が起源

規則衛星



不規則衛星



巨大惑星の衛星系形成モデル

□ 規則衛星

- ・周惑星ガス円盤内での固体物質の集積(e.g., Canup & Ward 2009)
- ・周惑星粒子円盤からの集積(Crida & Charnoz 2012, Hyodo et al. 2015)

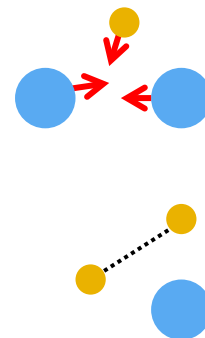
□ 不規則衛星

- ・三体相互作用による捕獲

二つの惑星と微惑星(ニースモデル)(Nesvorny et al. 2007, 2014)

連星系の微惑星と惑星(e.g. Agnor & Hamilton 2006, Philpott et al. 2010)

- ・ガス抵抗による捕獲(e.g. Pollack et al. 1979, Cuk & Burns 2004)



巨大惑星の衛星系形成モデル

□ 規則衛星

- ・周惑星ガス円盤内での固体物質の集積(e.g., Canup & Ward 2009)
周惑星円盤からのガス抵抗で捕獲された微惑星も衛星形成の材料物質になりうる(Fujita et al. 2013, Tanigawa et al. 2014)
- ・周惑星粒子円盤からの集積(Crida & Charnoz 2012, Hyodo et al. 2015)

□ 不規則衛星

- ・三体相互作用による捕獲
二つの惑星と微惑星(ニースモデル)(Nesvorny et al. 2007, 2014)
連星系の微惑星と惑星(e.g. Agnor & Hamilton 2006, Philpott et al. 2010)
捕獲後の高い離心率を小さくするためにガス抵抗が必要(Philpott et al. 2010)
- ・ガス抵抗による捕獲(e.g. Pollack et al. 1979, Cuk & Burns 2004)

周惑星円盤からのガス抵抗で捕獲された微惑星は
巨大惑星の衛星系形成において重要となりうる

ガス抵抗による微惑星捕獲

- ガス抵抗による微惑星捕獲は巨大惑星の衛星系形成以外でも重要な役割をもつ可能性がある
- 惑星大気からのガス抵抗による微惑星の捕獲
 - 捕獲された微惑星の降着による惑星成長の促進
(e.g. Inaba & Ikoma 2003, Tanigawa & Ohtsuki 2010)
 - 衛星の捕獲
 - 火星の二つの衛星(Phobos、Deimos)の起源は不明
 - 火星の原始大気からのガス抵抗による微惑星の捕獲(e.g. Hunten 1979)
 - 巨大衝突後の周火星粒子円盤の集積による形成
(e.g. Rosenblatt & Charnoz 2012, Citron et al. 2015)

目的

- ガス抵抗による微惑星の捕獲過程や捕獲後の軌道進化の詳細は不明



- 周惑星円盤からのガス抵抗による微惑星捕獲過程を調べる
 - ・捕獲軌道
 - ・軌道進化
- 球対称大気からのガス抵抗による微惑星の捕獲後の軌道進化についても簡単に報告する

数値計算法

□ 三体問題軌道計算

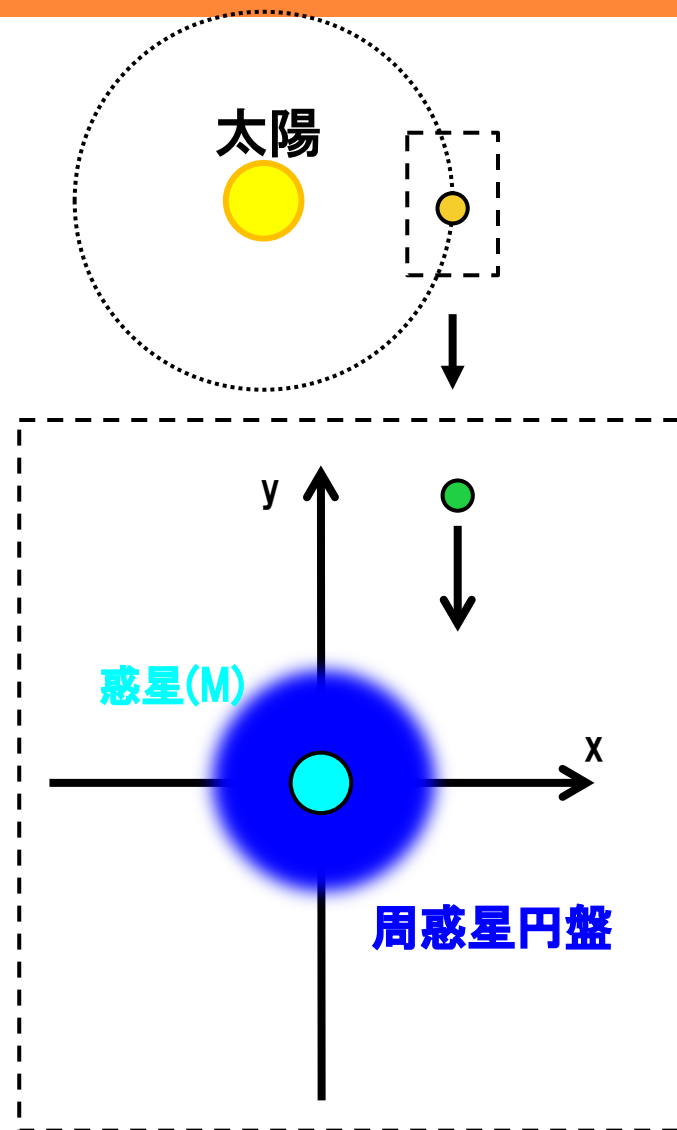
- 太陽、惑星、微惑星
- 惑星は周惑星円盤をもつ

□ 周惑星円盤

- 軸対称で薄い円盤 (Fujita et al. 2013)
- 圧力勾配によって
ケプラー速度より少し遅い

□ ガス抵抗

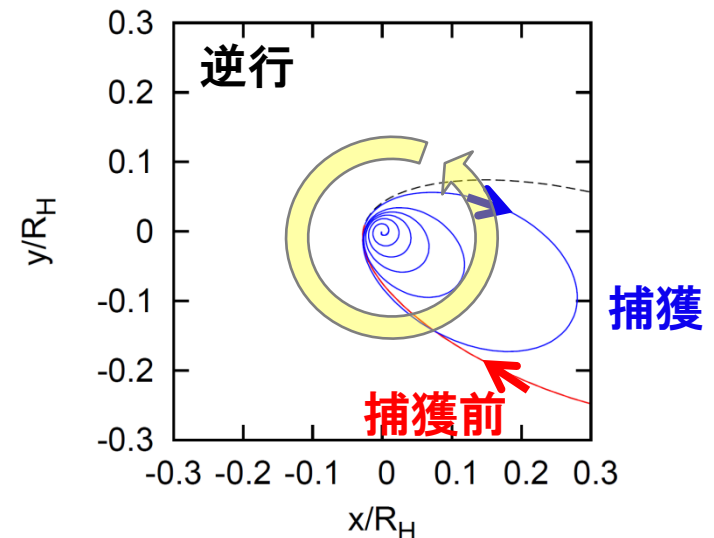
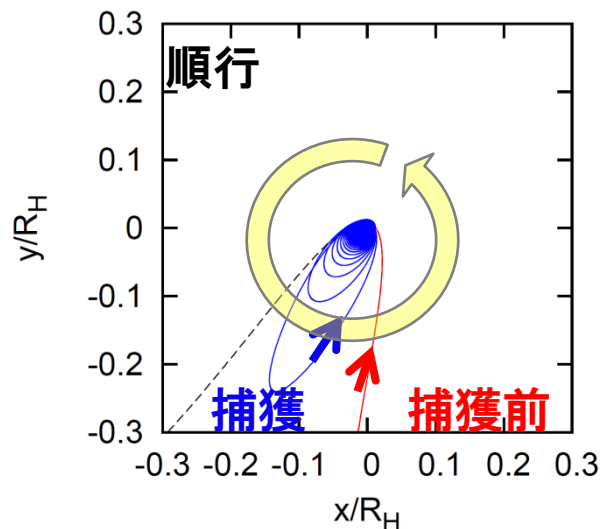
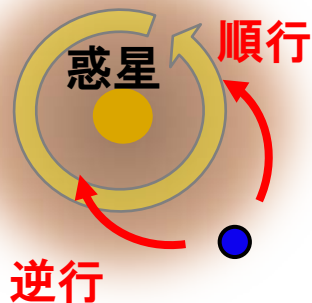
$$a_{\text{drag}} = -\frac{3}{8} C_D \frac{\rho_{\text{gas}}}{r_s \rho_s} u u$$



周惑星円盤による微惑星の捕獲

- ガス抵抗による微惑星の捕獲 (e.g. Pollack et al. 1979, Fujita et al. 2013, Tanigawa et al. 2014)
 - ・微惑星が惑星と遭遇した時に、ガス抵抗によって捕獲
- 順行と逆行で捕獲頻度は異なる
 - ・逆行方向から接近してきた微惑星はエネルギー散逸が大きく、捕獲されやすい

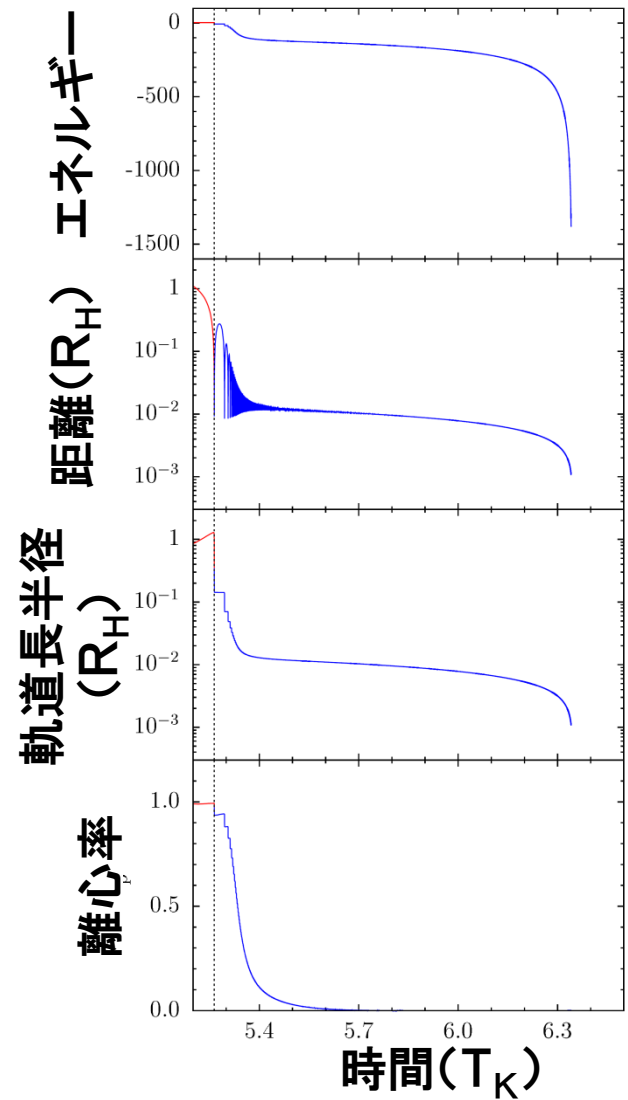
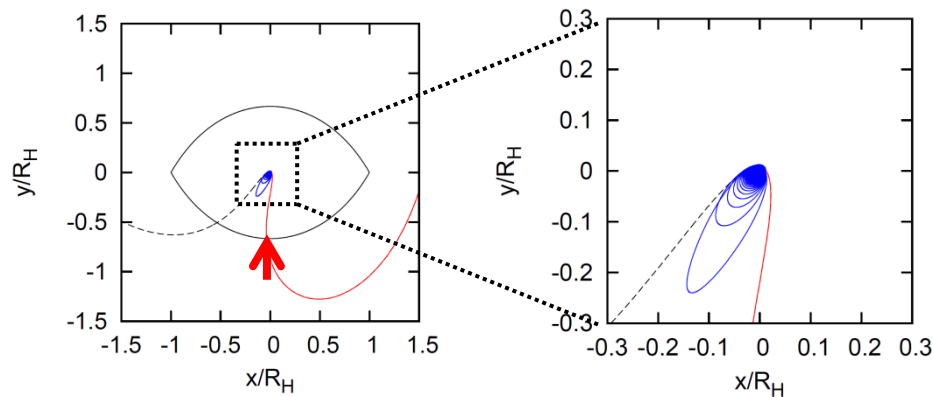
ガスの公転方向



捕獲後の軌道進化

□ 順行の場合

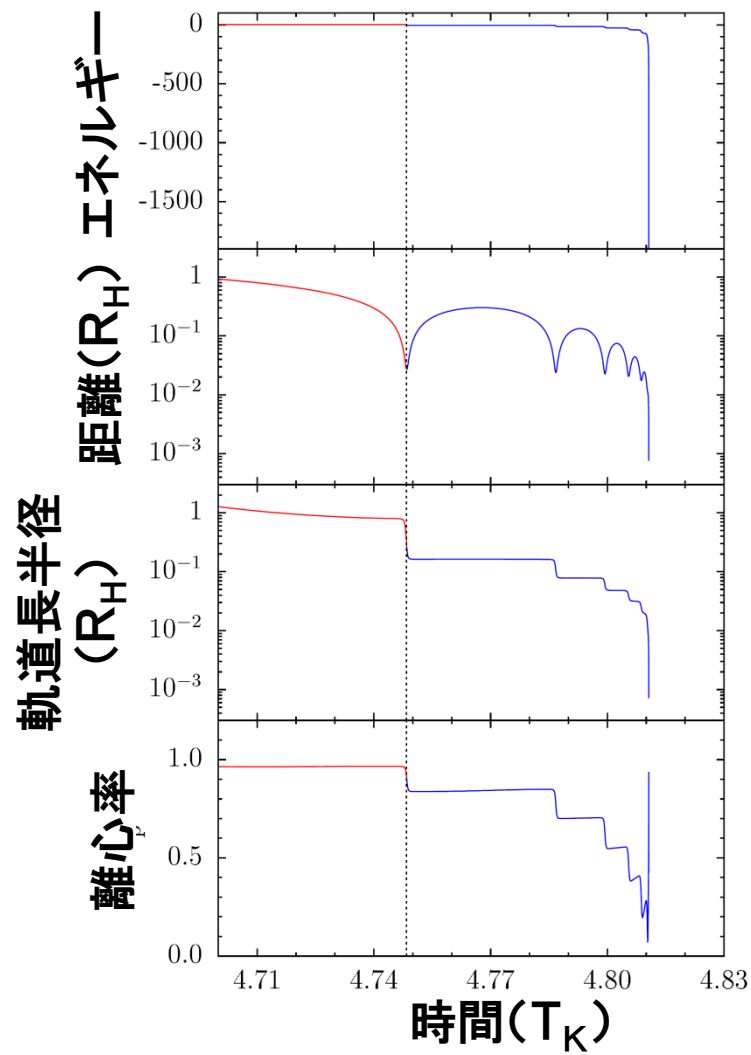
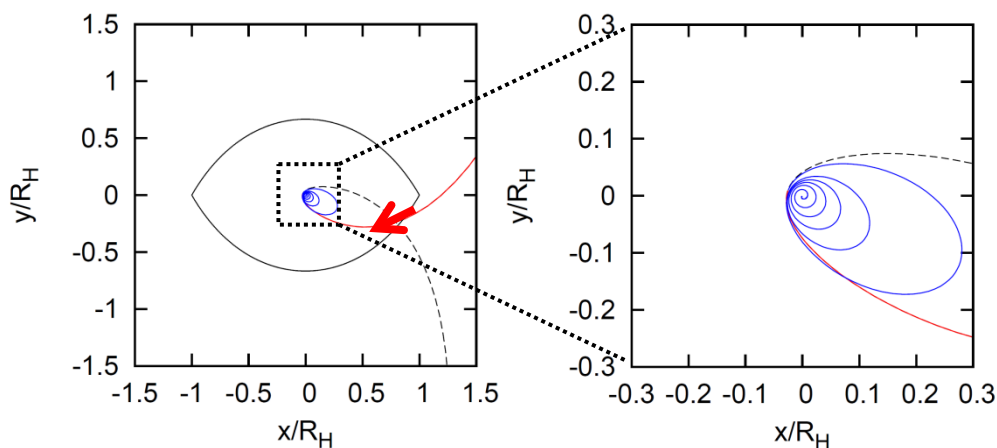
- ・捕獲直後は軌道長半径、離心率ともに大きいが、すぐに減少
- ・ほぼ円軌道化したのち、軌道減衰は緩やかになり、惑星に落下(約1-10惑星公転周期)



捕獲後の軌道進化

□ 逆行の場合

- ・ガスの公転方向と逆なのでガス抵抗が大きく、軌道長半径と離心率は急速に減衰する
- ・捕獲から惑星に落下するまで約1惑星公転周期



周惑星円盤による微惑星捕獲

□ ガス抵抗が強い場合

- ・惑星に最接近した時にガス密度の高い領域を通過することで捕獲
- ・捕獲後の軌道進化は順行と逆行も数惑星公転周期で惑星に落下する

規則衛星の材料物質となる可能性がある

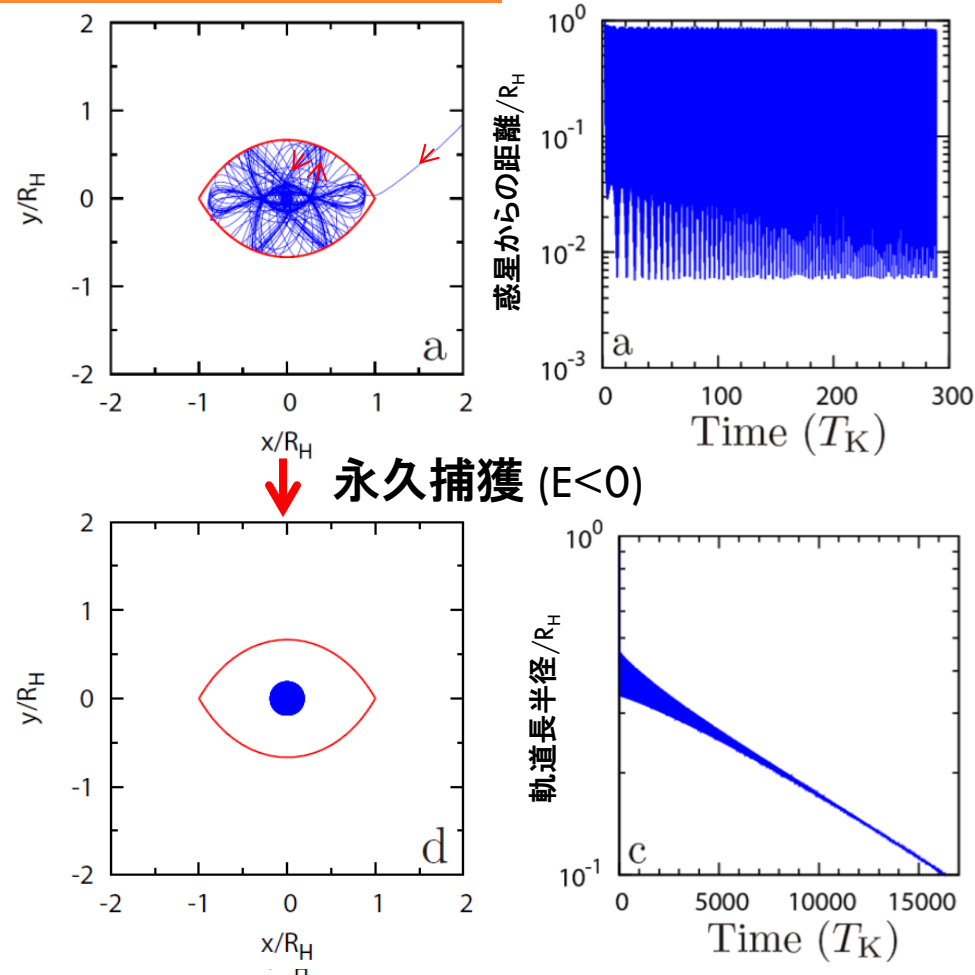
(Fujita et al. 2013, Tanigawa et al. 2014)

- ・不規則衛星として惑星周りで生き残ることは難しい
→ 巨大惑星形成最終段階の低いガス密度の場合だと生き残りうる
(Cuk & Burns 2004)

弱いガス抵抗による微惑星の捕獲過程は？

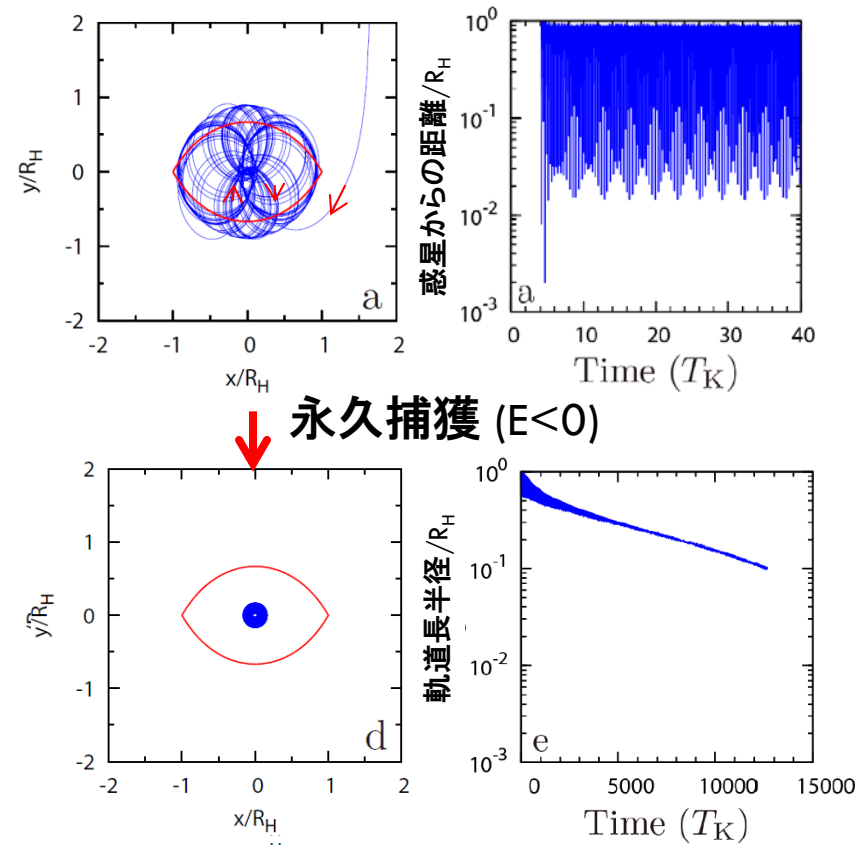
微惑星の捕獲(順行方向)

- ガス抵抗によって捕獲される前に、惑星の周りをしばらくの間公転
- ガス密度の高い惑星近傍の領域は通過しない
→ エネルギーはゆるやかに減少
- 永久捕獲後、 $10^4 T_K$ 以上周惑星円盤内で公転



微惑星の捕獲(逆行方向)

- ガス抵抗によって捕獲される前に、惑星の周りをしばらくの間公転
- ガス密度の高い惑星近傍の領域は通過しない
→ エネルギーはゆるやかに減少
- 永久捕獲後、 $10^4 T_K$ 以上周惑星円盤内で公転



捕獲後の微惑星の分布

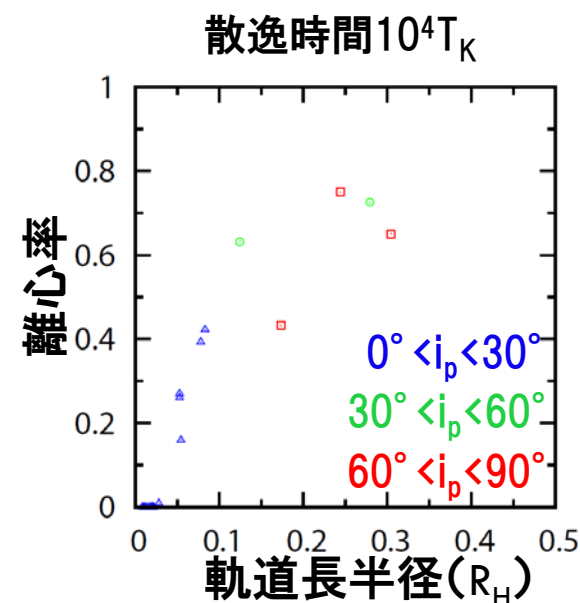
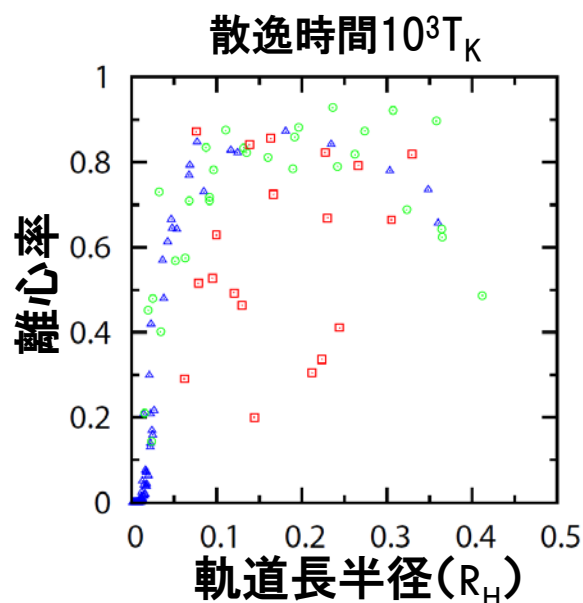
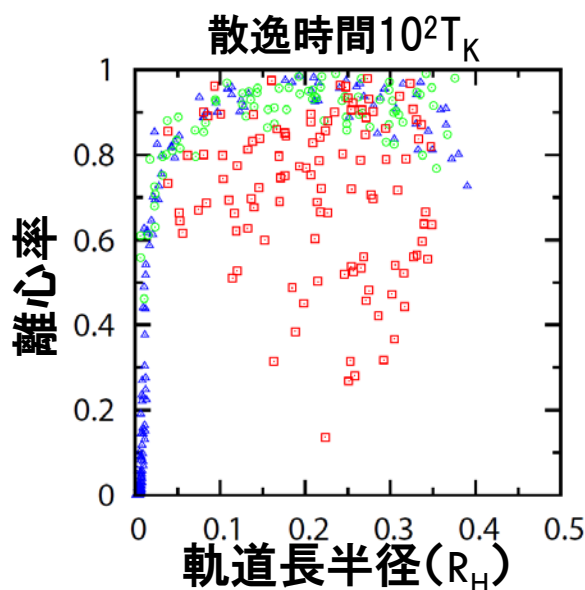
□ 円盤散逸後の捕獲された微惑星の分布(順行の場合)

- 惑星から離れるほど離心率、軌道傾斜角が増加
→ 軌道長半径の大きいものは捕獲直後のもの
- 散逸時間が長いほど離心率が減少
→ ガスと長い時間相互作用しているため

円盤散逸の効果

$$\Sigma = \Sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{dis}}}\right)$$

散逸時間



捕獲後の微惑星の分布

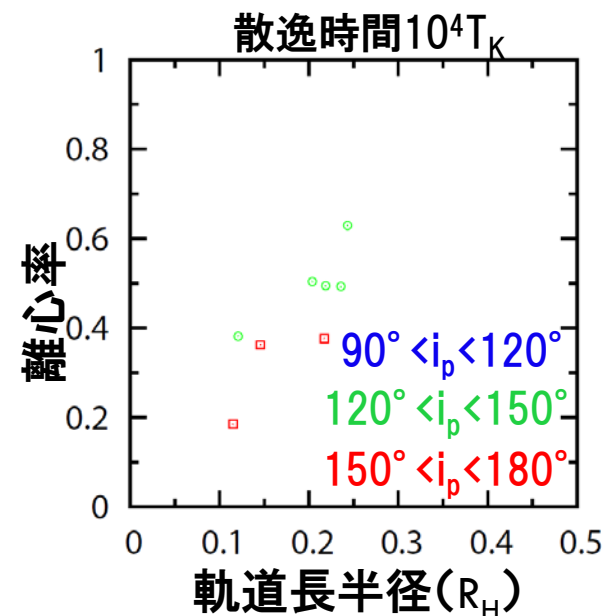
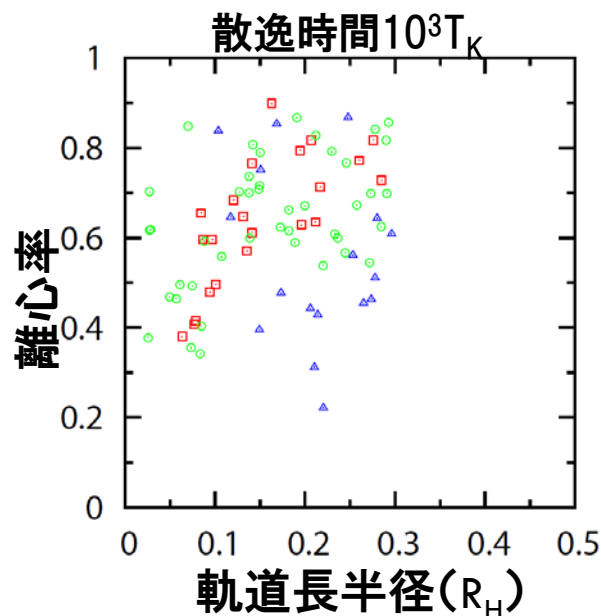
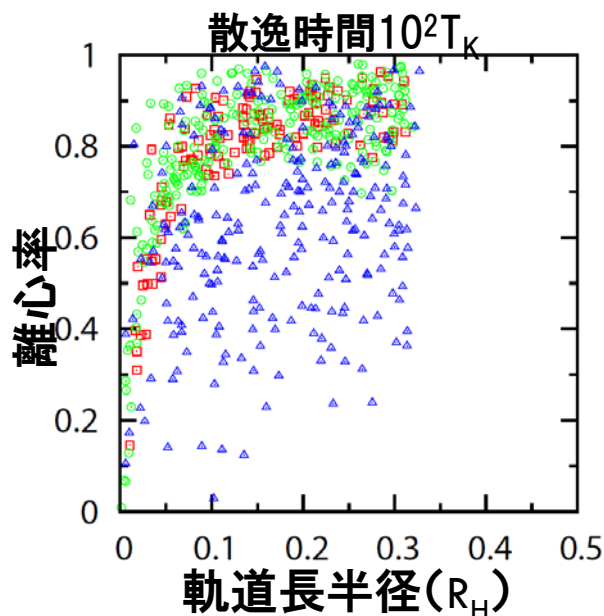
□ 円盤散逸後の捕獲された微惑星の分布(逆行の場合)

- 惑星から離れるほど離心率、軌道傾斜角が増加
→ 軌道長半径の大きいものは捕獲直後のもの
- 散逸時間が長いほど離心率が減少
→ ガスと長い時間相互作用しているため

円盤散逸の効果

$$\Sigma = \Sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{dis}}}\right)$$

散逸時間



周惑星円盤による微惑星捕獲

□ ガス抵抗が弱い場合

- ・惑星の周りをしばらく公転している間にエネルギーが減少し捕獲される
- ・周惑星円盤散逸後の微惑星の分布は、軌道長半径が増加するほど離心率、軌道傾斜角が増加する

□ 不規則衛星の分布との比較

- ・順行の不規則衛星の軌道長半径の分布($0.1 < a/R_H < 0.3$)はガスによる捕獲モデルでも説明できるが、離心率、軌道傾斜角が実際よりも大きい

→捕獲後に軌道進化が必要

- ・逆行の不規則衛星の軌道長半径の分布($0.2 < a/R_H < 0.5$)を説明することが難しい

→三体相互作用などの別の捕獲メカニズムが必要