

不規則衛星の起源

末次竜

産業医科大学



Io



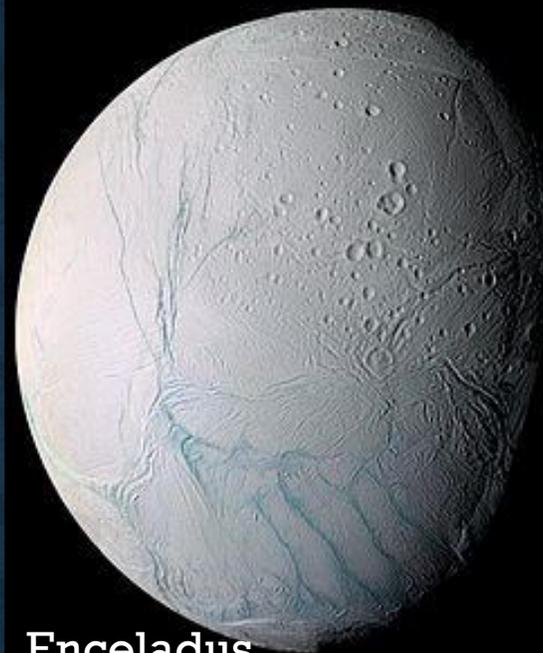
Europa



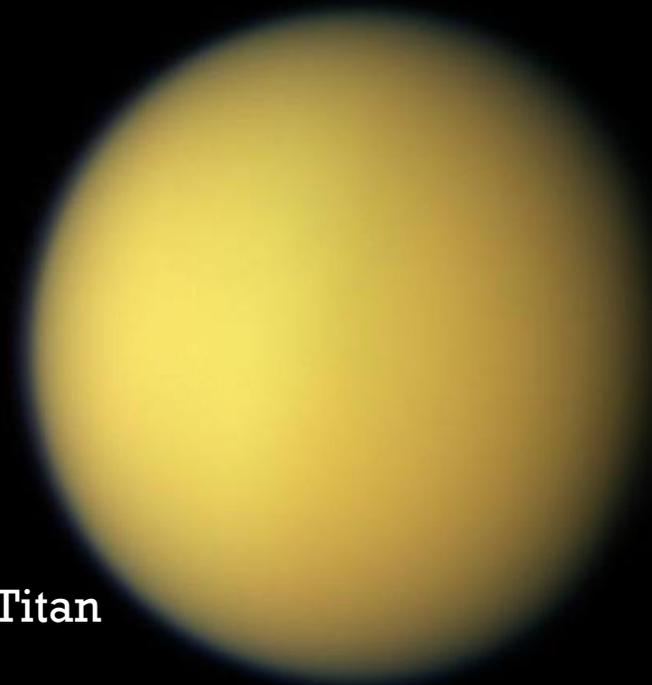
Ganymede



Callisto



Enceladus

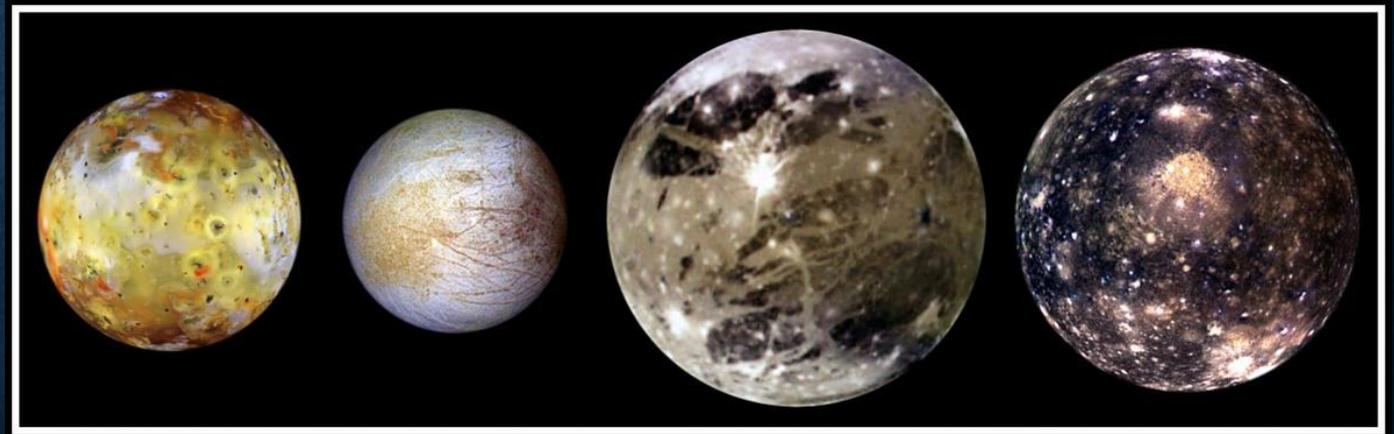


Titan



規則衛星

- 巨大惑星の衛星の発見
 - * 17世紀初めに木星の4つの衛星が発見
 - * 土星、天王星の主要な衛星も19世紀中ごろまでに発見

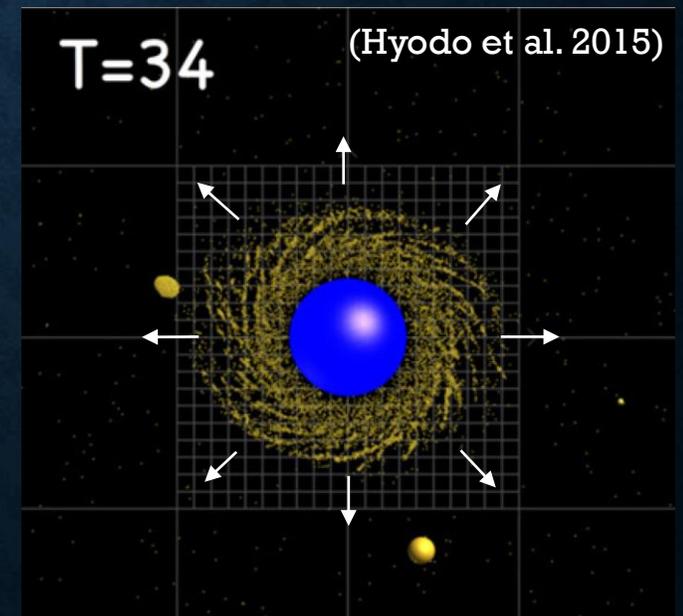
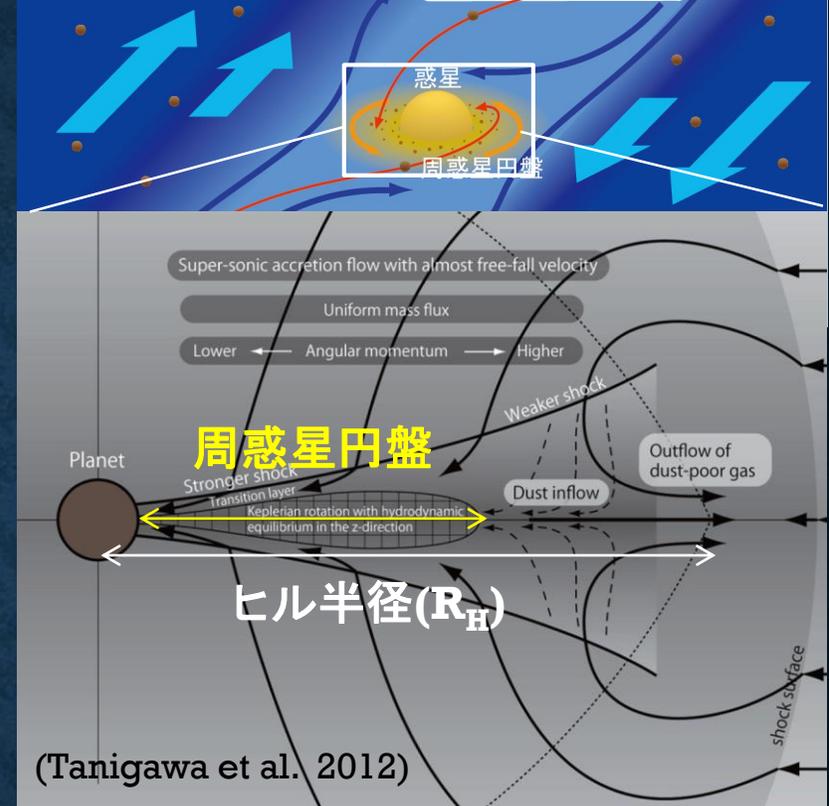


規則衛星

- 巨大惑星の衛星の特徴
 - * 軌道長半径は約 $0.05R_H$ 以下
 - * 円軌道、赤道面を公転
 - * 半径1000kmのサイズの衛星も存在

→ 形成過程を示唆

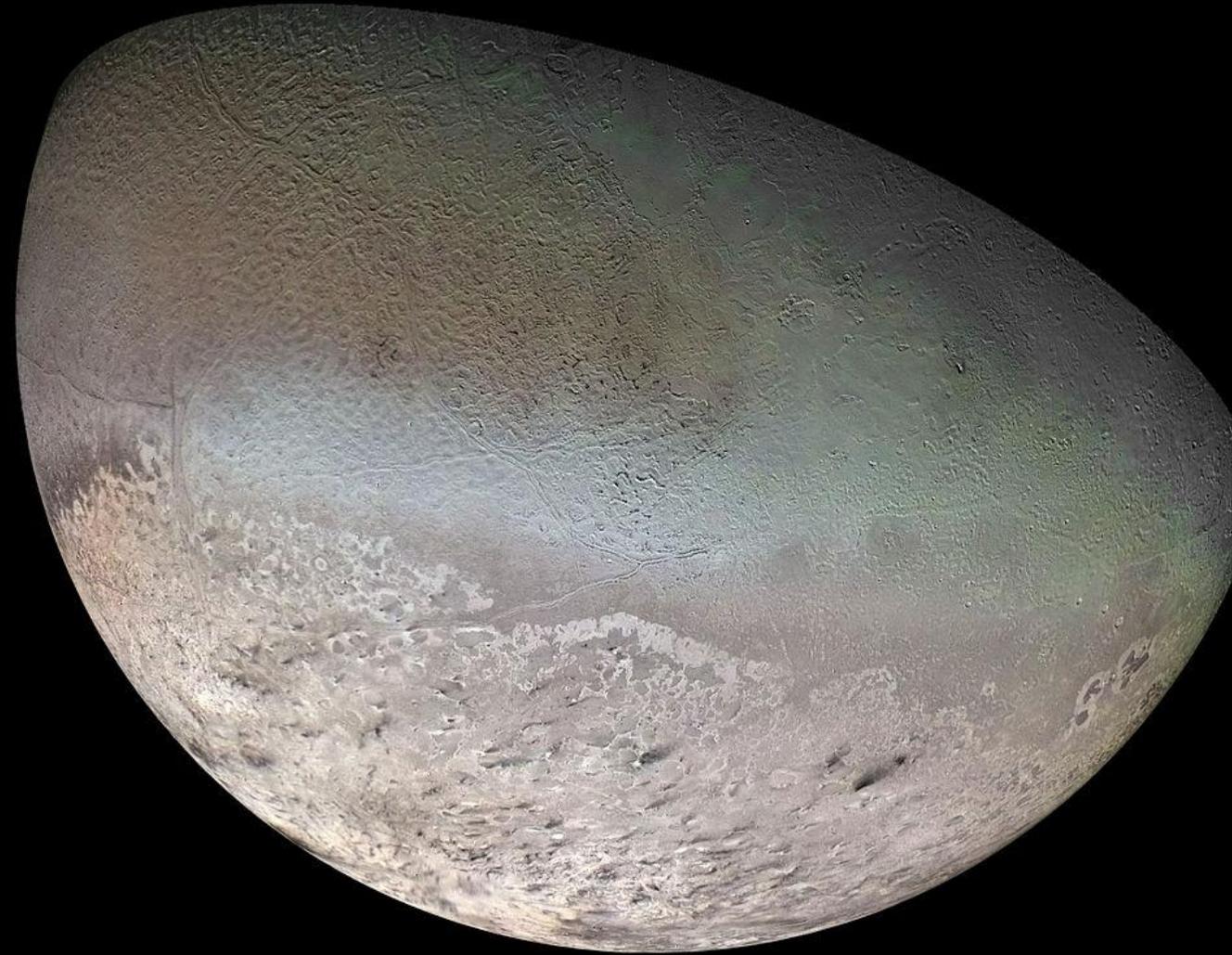
- * 周惑星円盤内での形成 (Canup & Ward 2002)
- * 巨大リングからの形成 (Crida & Charnoz 2012)



Phoebe



Triton



不規則衛星

(Jewitt & Haghhighipour 2007)

- 不規則衛星の発見

- * Tritonを除くと19世紀末から発見

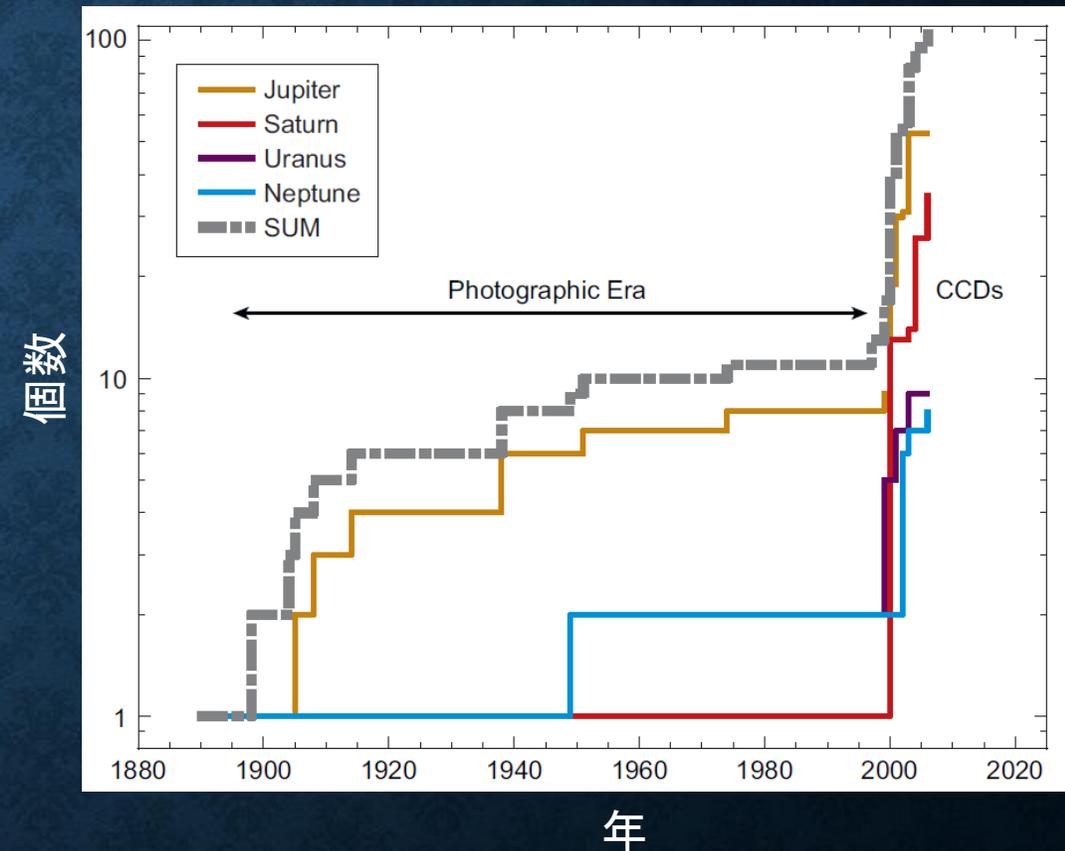
- 木星 Himalia(1904), Elara(1905),

- Pasiphae(1908), Sinope(1914)など

- 土星 Phoebe (1898)

- * 数は増加し続けている

- 木星:71個、土星:58個、天王星:9個、海王星:7個



不規則衛星

- 不規則衛星の軌道

- * 離心率、軌道傾斜角が大きい

- 逆行も多数

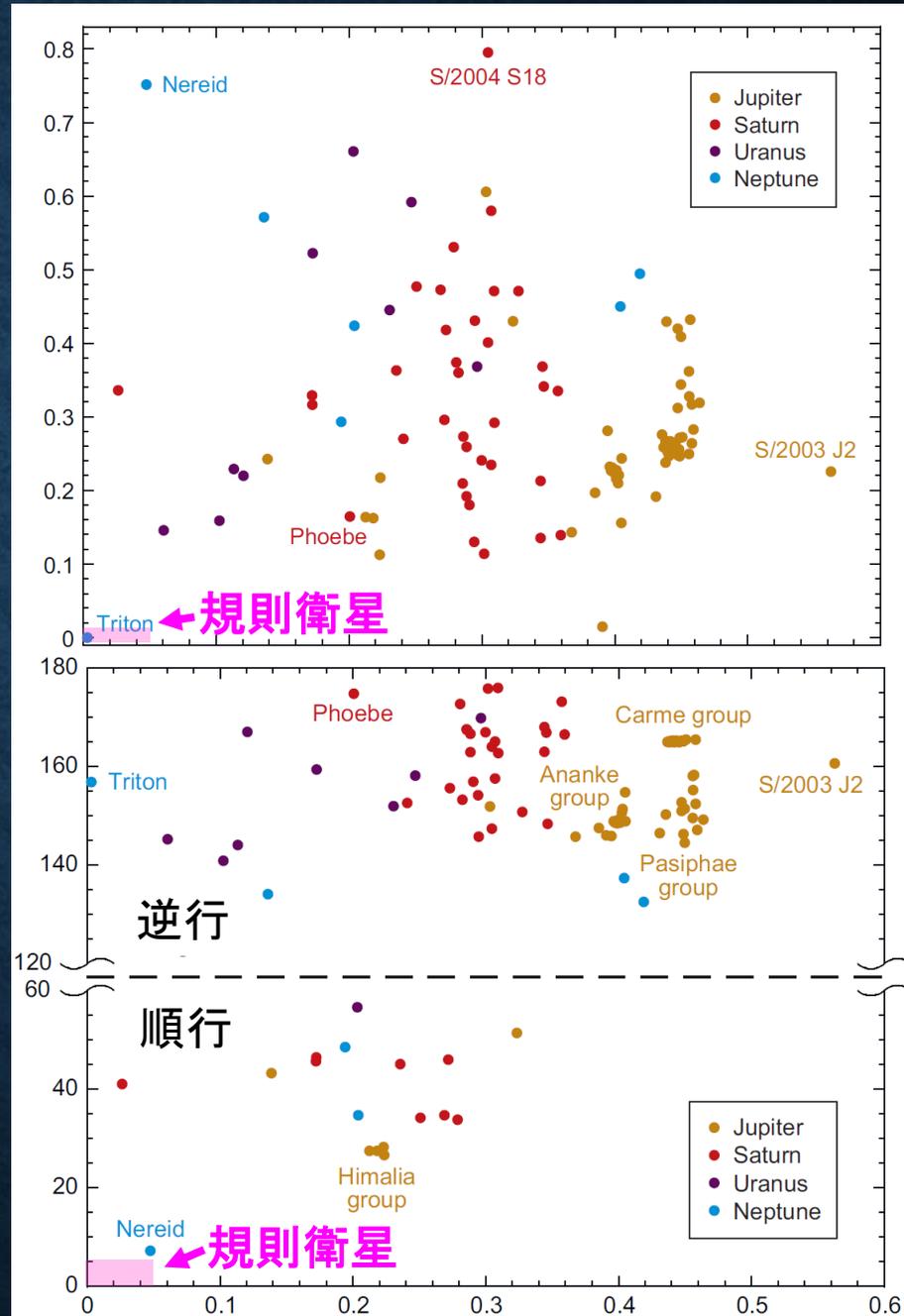
- * 軌道長半径が大きい

- $0.1R_H$ 以上が大半

捕獲された小天体が起源？

離心率

軌道傾斜角



不規則衛星

- 不規則衛星の軌道

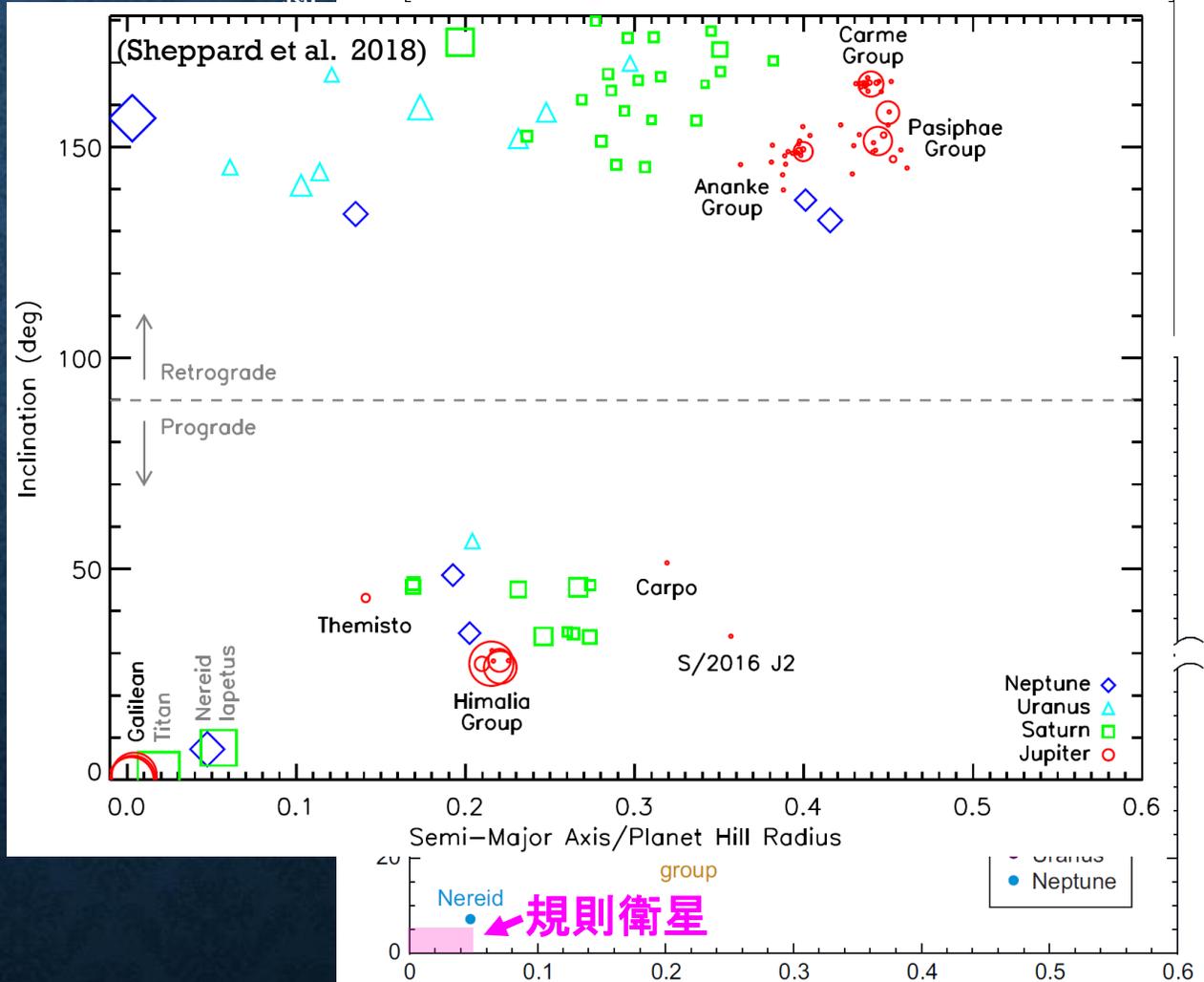
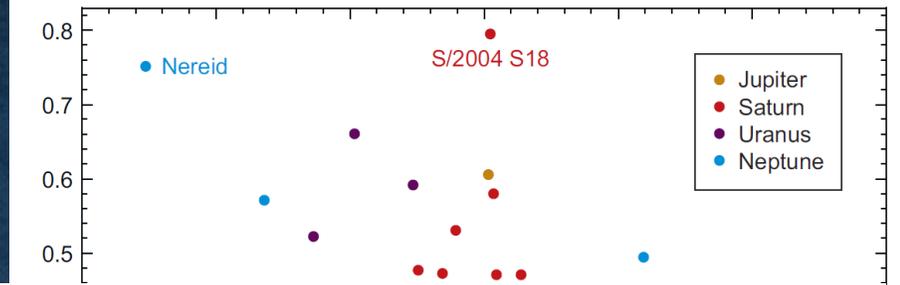
- * 離心率、軌道傾斜角が大きい

- 逆行も多数

- * 軌道長半径が大きい

- $0.1R_H$ 以上が大半

捕獲された小天体が起源？



(Jewitt & Haghighipour 2007) 軌道長半径(R_H)

不規則衛星

- 不規則衛星の特徴

- * サイズが小さい

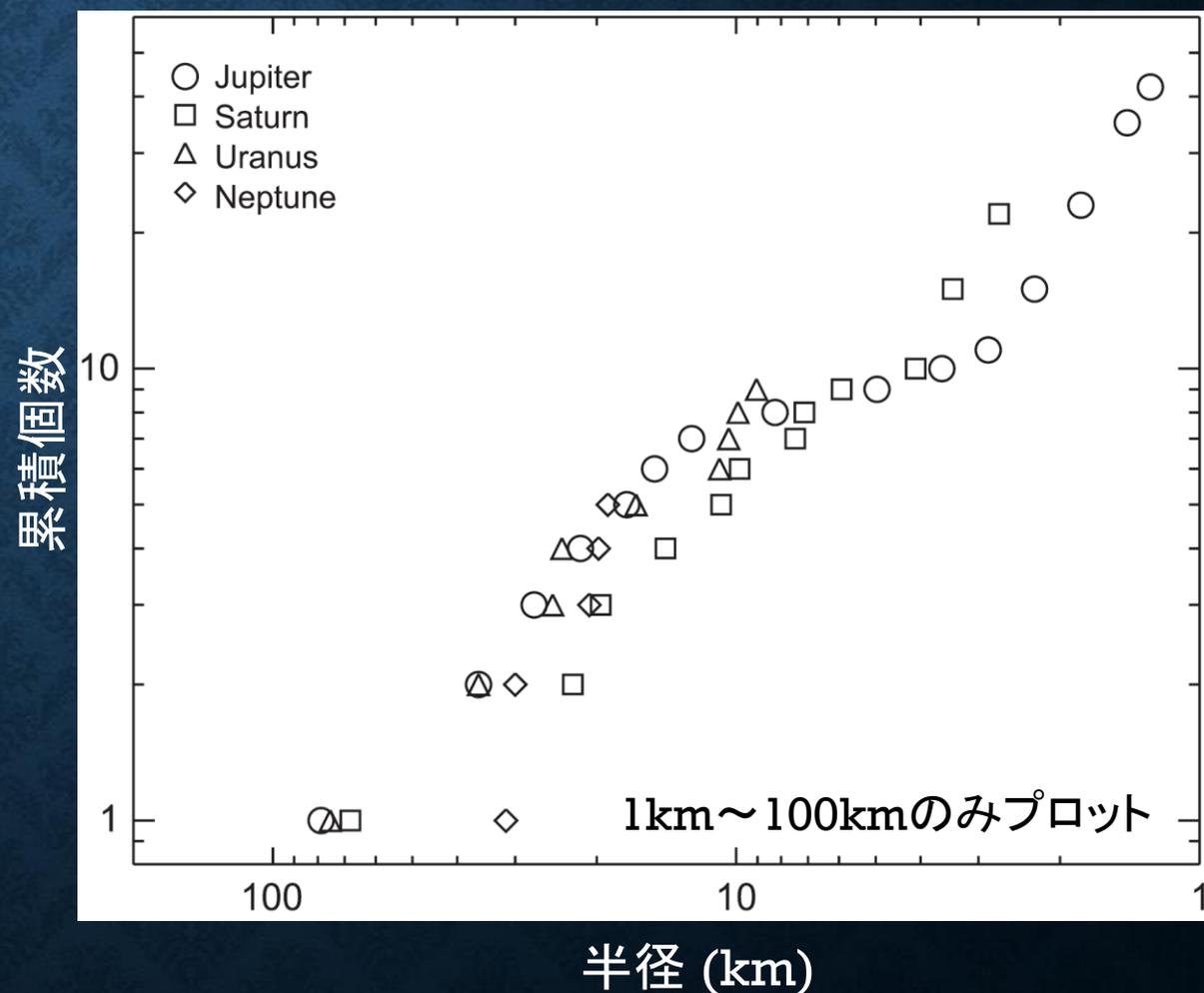
- 最大でも100km程度

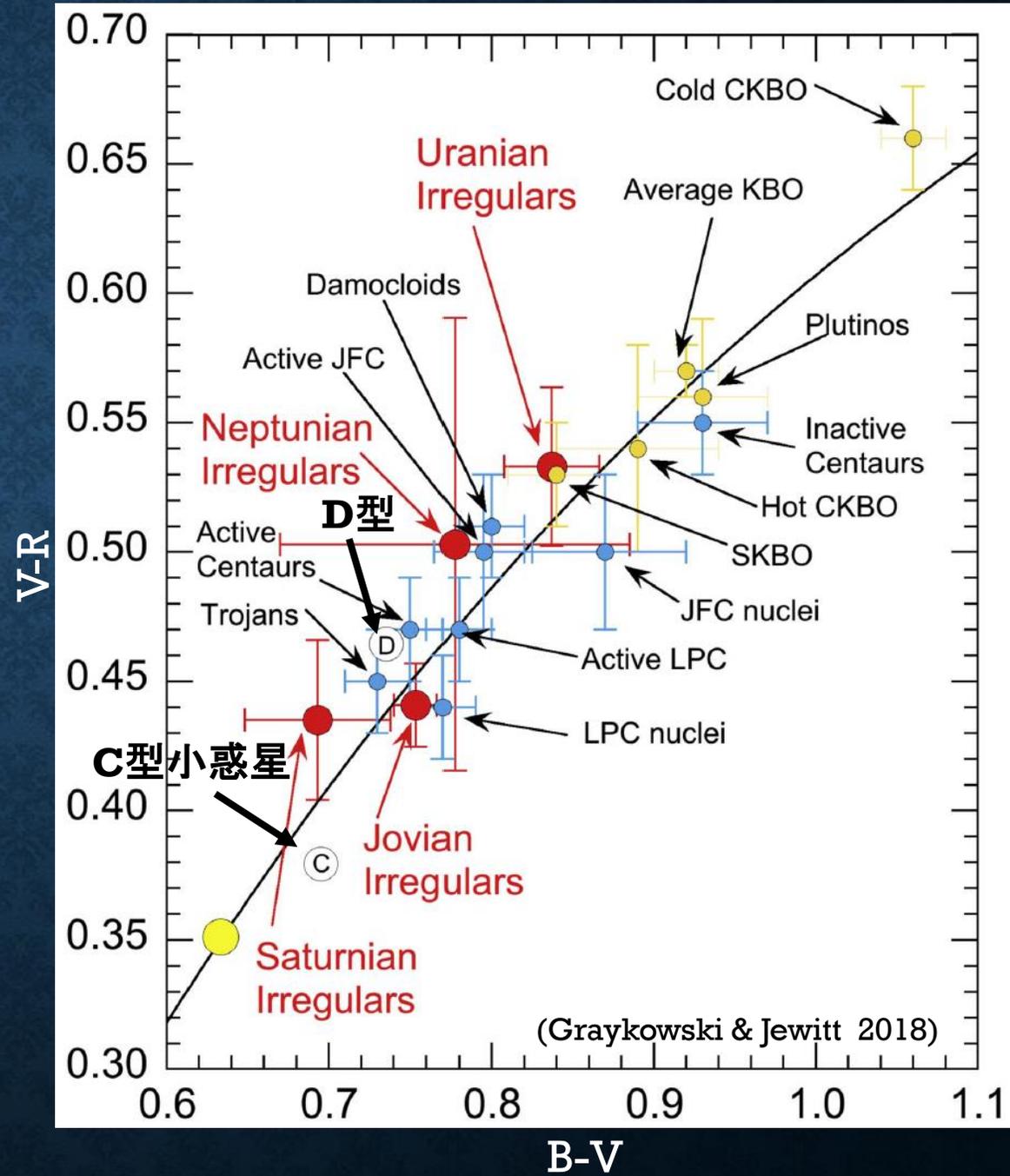
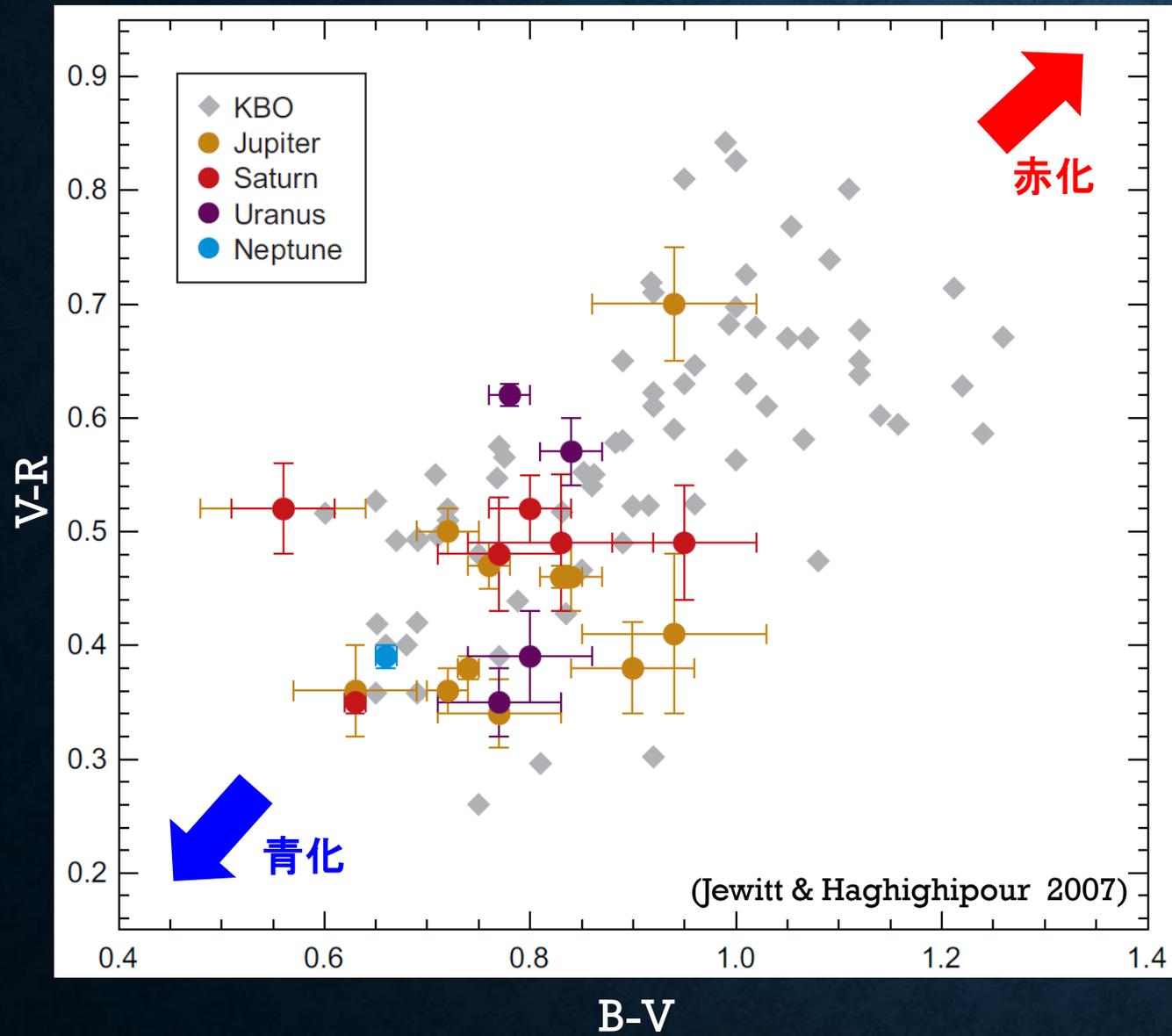
- * べき指数がどの惑星も似てる

- どの惑星でも同じ衝突進化？

- 同じ場所から捕獲？

(Nicholson et al. 2009)





- Himalia

木星最大(半径80km程度)の不規則衛星で順行方向に公転

反射スペクトルはC型小惑星のEuropaと似ている (Bhatt et al. 2017)

- Phoebe

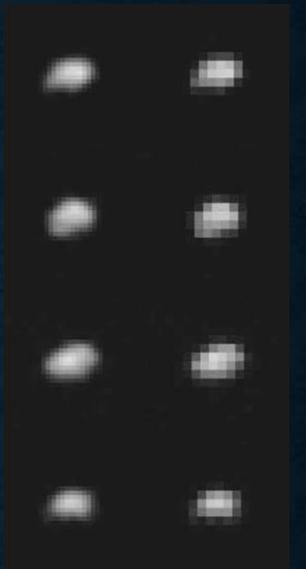
土星最大(半径107km)の不規則衛星で逆行方向に公転

捕獲されたカイパーベルト天体がおそらく起源

- Triton

太陽系最大の捕獲天体(半径1350km)

海王星の傍($0.003R_H$)を円軌道で逆行方向公転

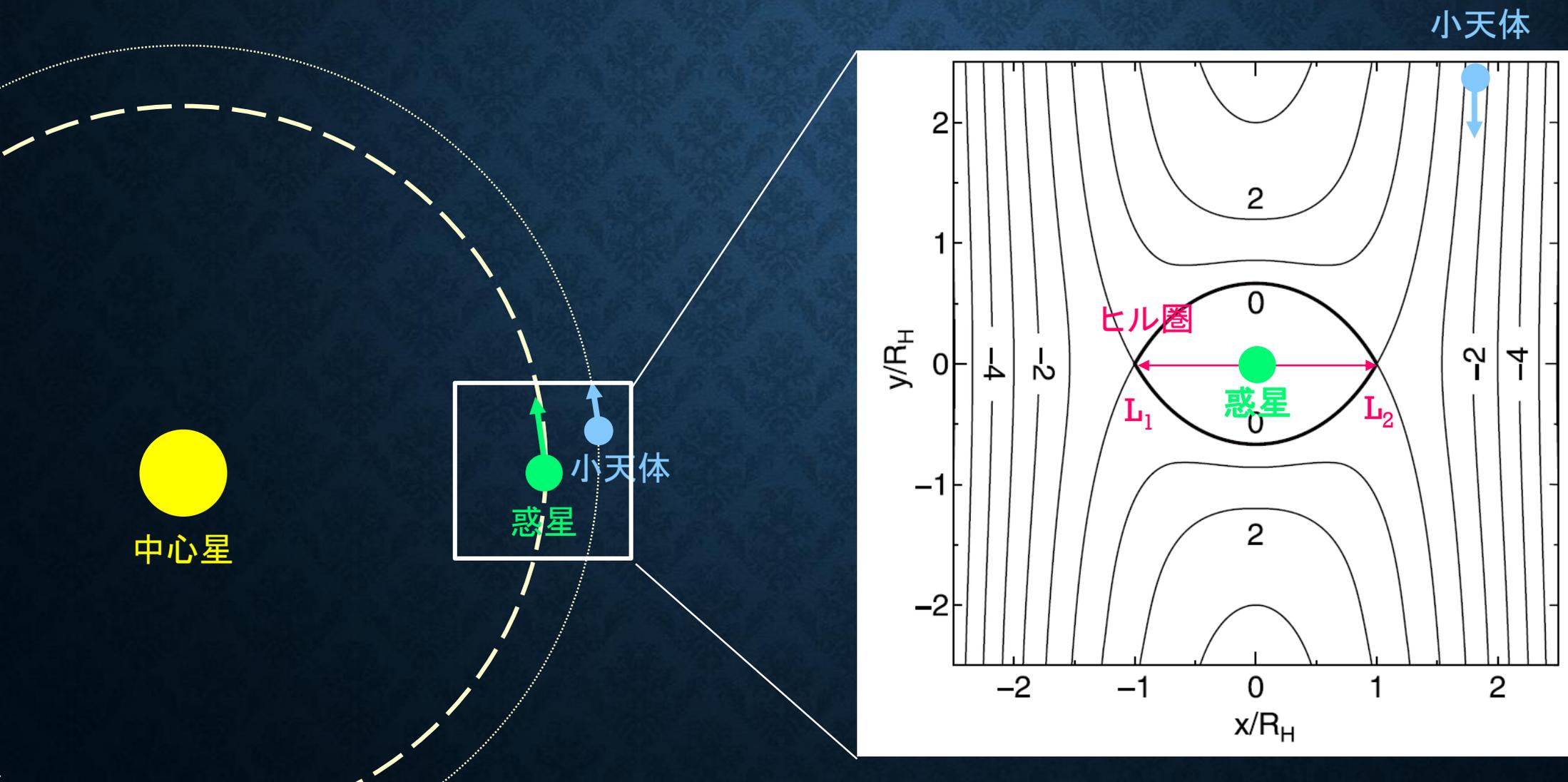


ここまでのまとめ

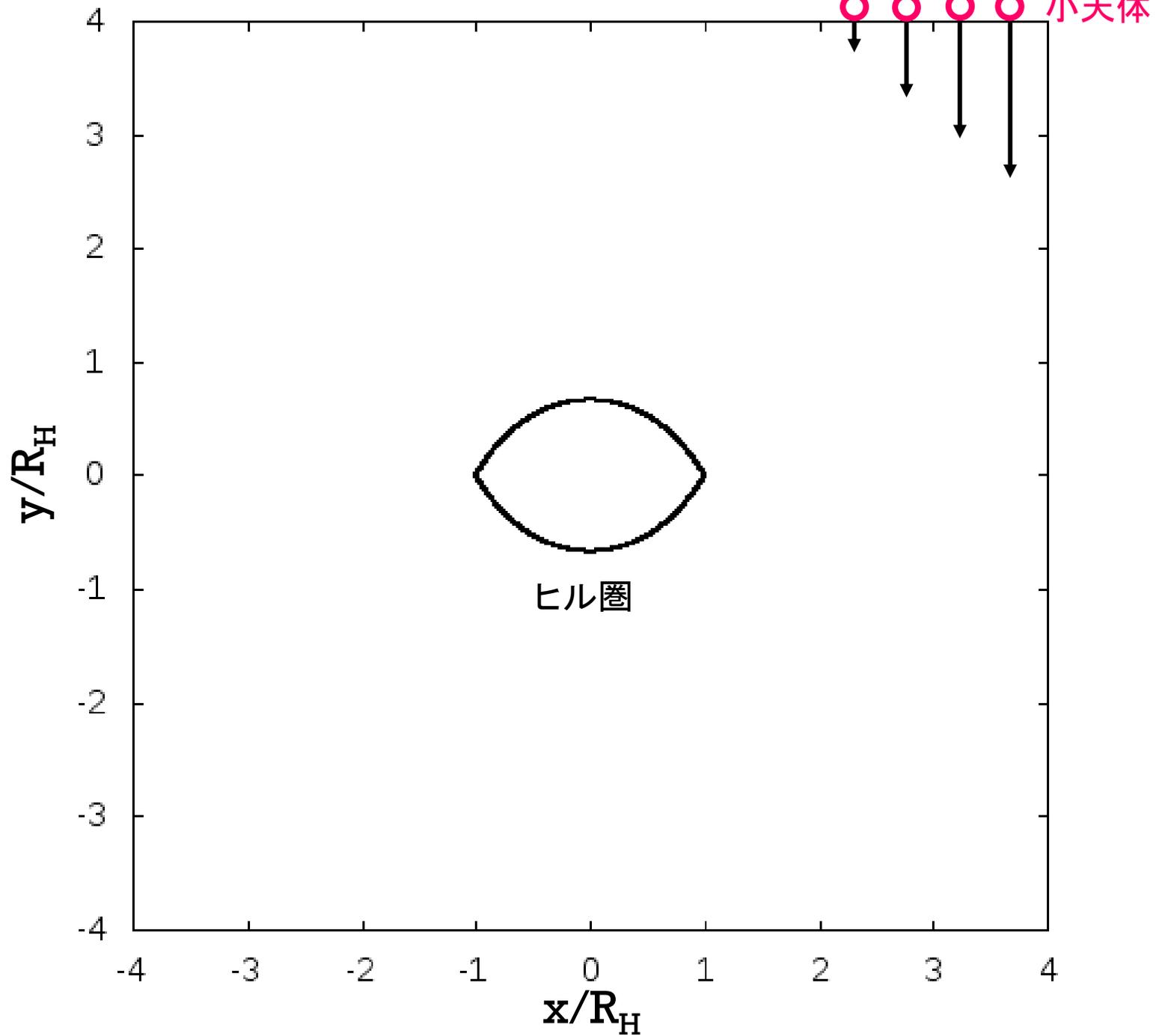
	規則衛星	不規則衛星
離心率	ほぼ円軌道	0.1 - 0.7
軌道傾斜角	ほぼ赤道面	逆行も多い
軌道長半径	$0.05R_H$ 以下	$0.1 - 0.6R_H$
サイズ	1000kmも存在	大半が100km以下
起源	ガス円盤、リング	捕獲

不規則衛星の捕獲モデル

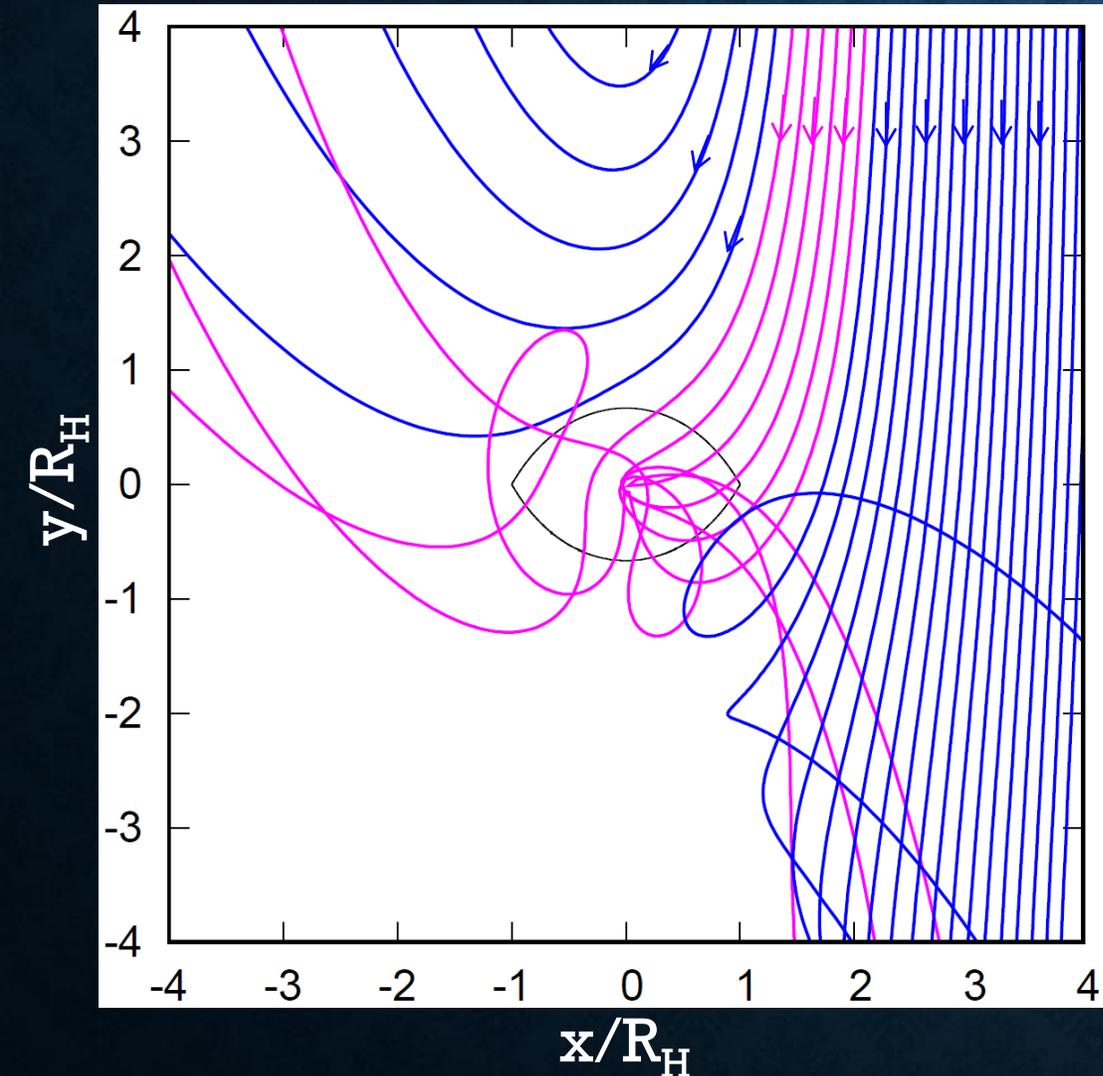
天体の捕獲



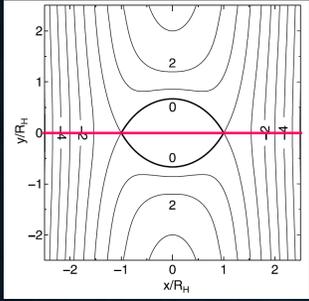
←
中心星方向



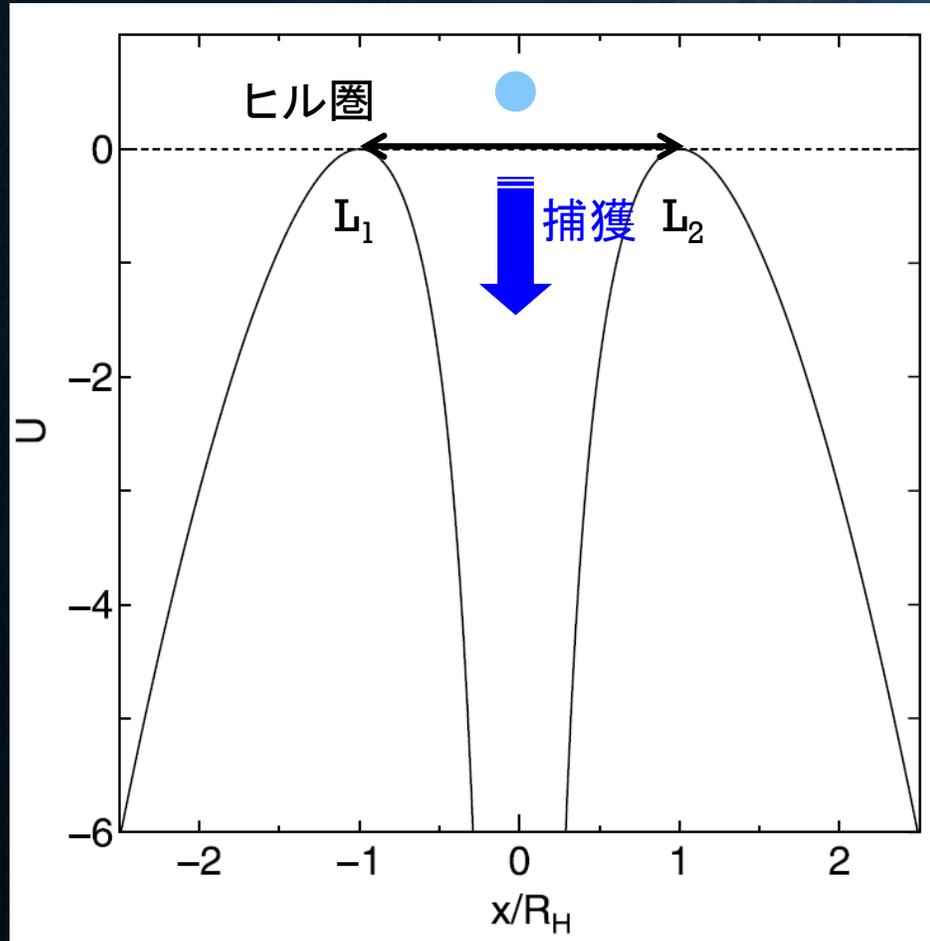
天体の捕獲



- ヒル圏に入る軌道は限られる
 - *惑星の軌道長半径 $\pm 1.9R_H \sim 2.5R_H$
ただし離心率、軌道傾斜角で変化
- ヒル圏に入った小天体
 - 通過(散乱)、衝突、一時捕獲のどれか



天体の捕獲



ヒル圏に入った小天体を永久捕獲するには
エネルギーの散逸が必要

ラグランジュ点でのポテンシャル
エネルギー以下になると永久捕獲

天体の捕獲

- 天体の捕獲過程

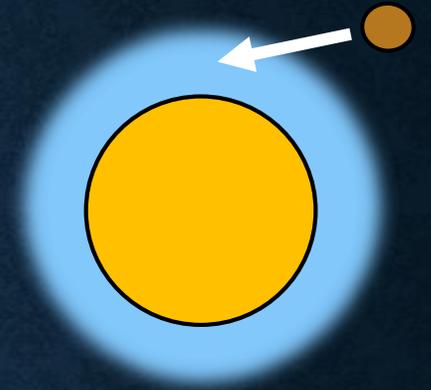
1. ラグランジュ点でのエネルギーよりも高いエネルギーの天体が惑星のヒル圏に入る

2. ヒル圏に入った後、天体のエネルギーを下げ永久に捕獲

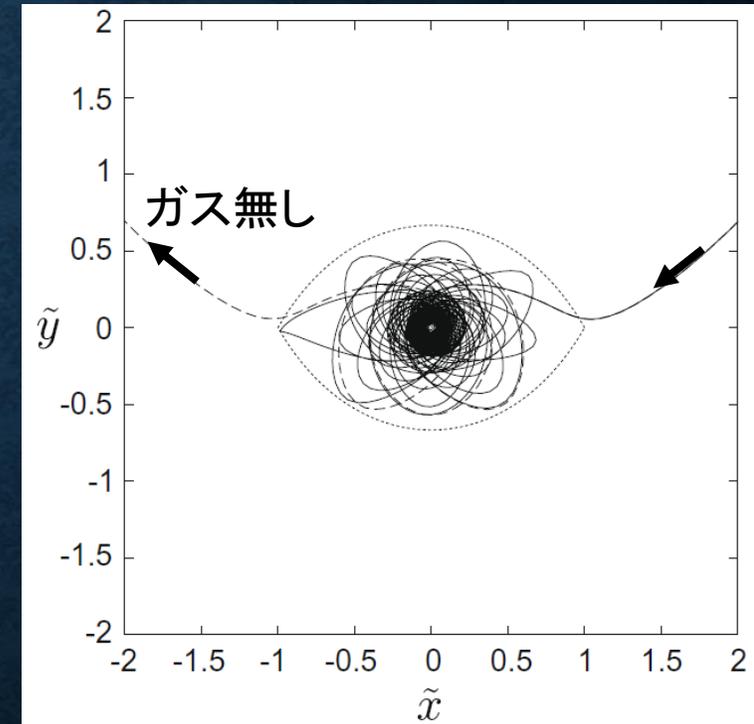
不規則衛星の捕獲モデル違いはエネルギー散逸過程の違い

- ガス抵抗による捕獲
- 惑星同士の近接遭遇時の捕獲
- バイナリー天体との相互作用による捕獲

ガス抵抗による捕獲



- ガス抵抗による微惑星の捕獲
 - * 惑星と遭遇した時に、ガス抵抗によって捕獲
- 惑星大気の場合
 - * 惑星の成長に寄与 (Inaba & Ikoma 2003, Tanigawa & Ohtsuki 2010, Kobayashi et al. 2011)
 - * 一部、衛星になる (火星など)? (Hunten 1979, Sasaki 1990)



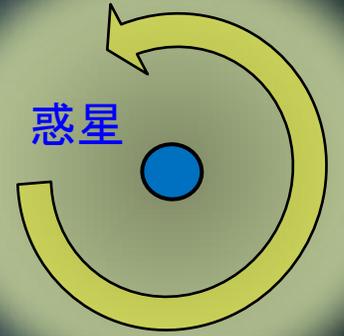
(Tanigawa & Ohtsuki 2010)

周惑星円盤からのガス抵抗で小天体は捕獲できるか？

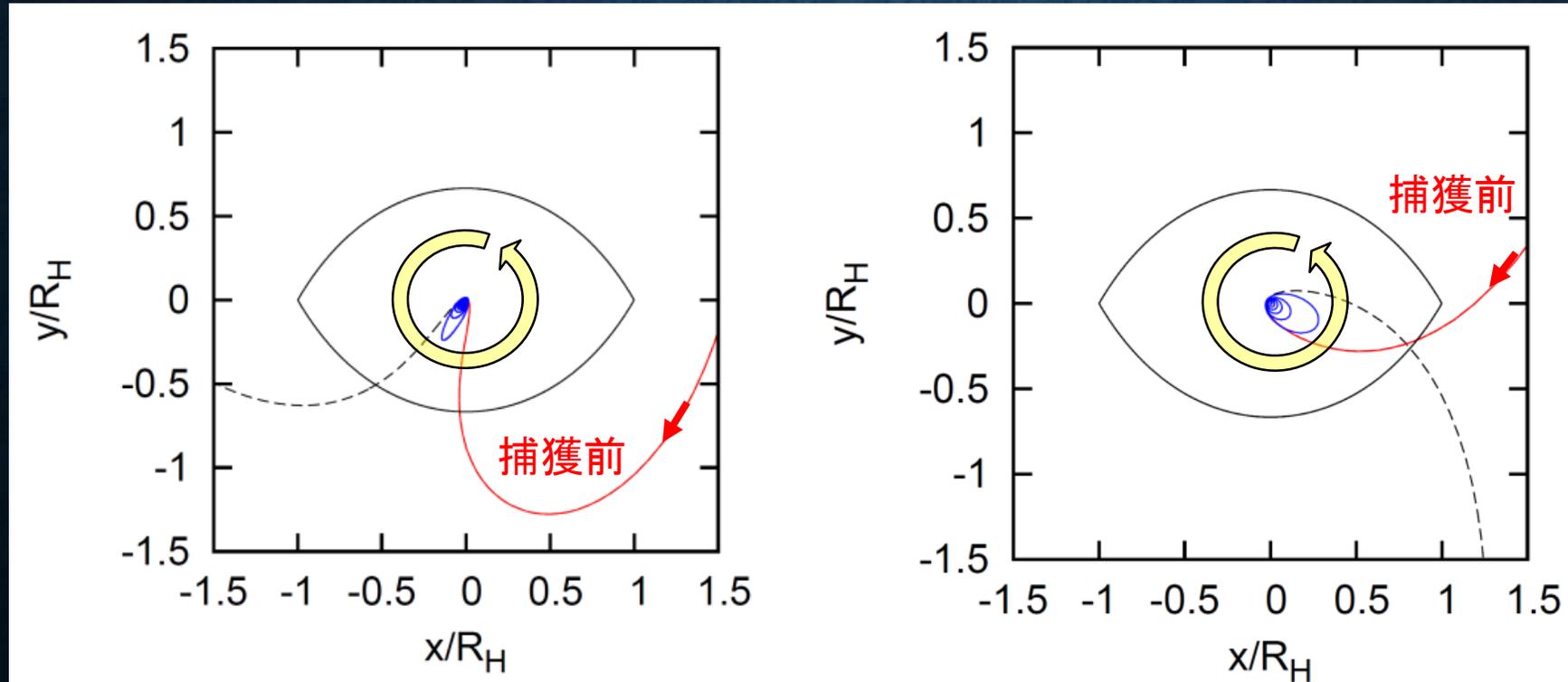
ガス抵抗による捕獲

- 周惑星円盤による微惑星の捕獲

捕獲軌道は周惑星円盤の回転方向に大きく影響を受ける



ガスの回転方向

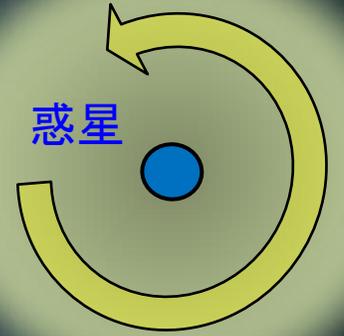


(Fujita et al. 2013, Suetsugu et al. 2016)

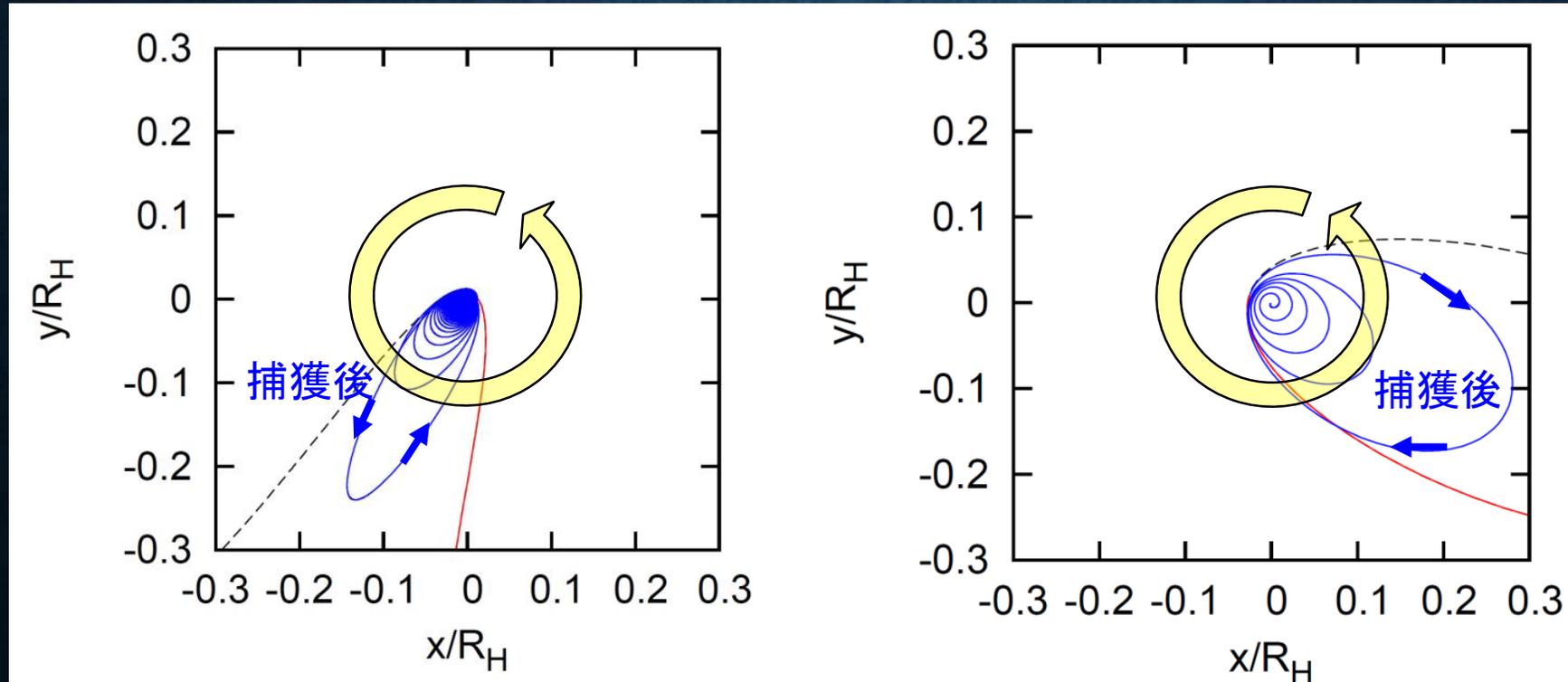
ガス抵抗による捕獲

- 周惑星円盤による微惑星の捕獲

捕獲軌道は周惑星円盤の回転方向に大きく影響を受ける



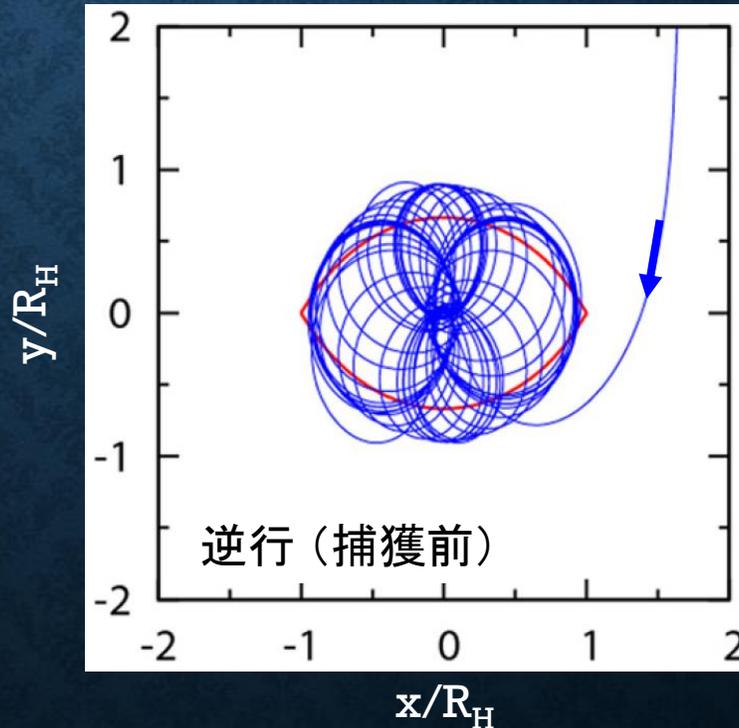
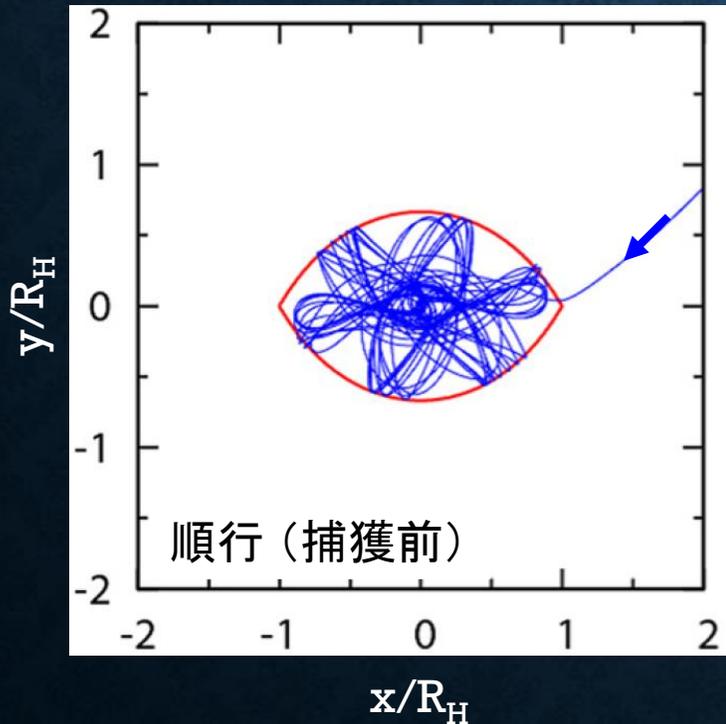
ガスの回転方向



(Fujita et al. 2013, Suetsugu et al. 2016)

ガス抵抗による捕獲

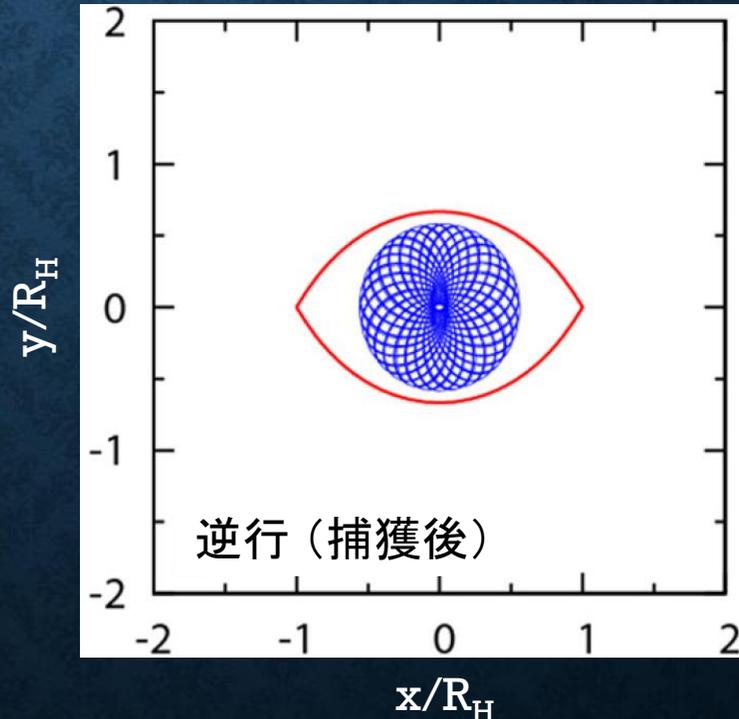
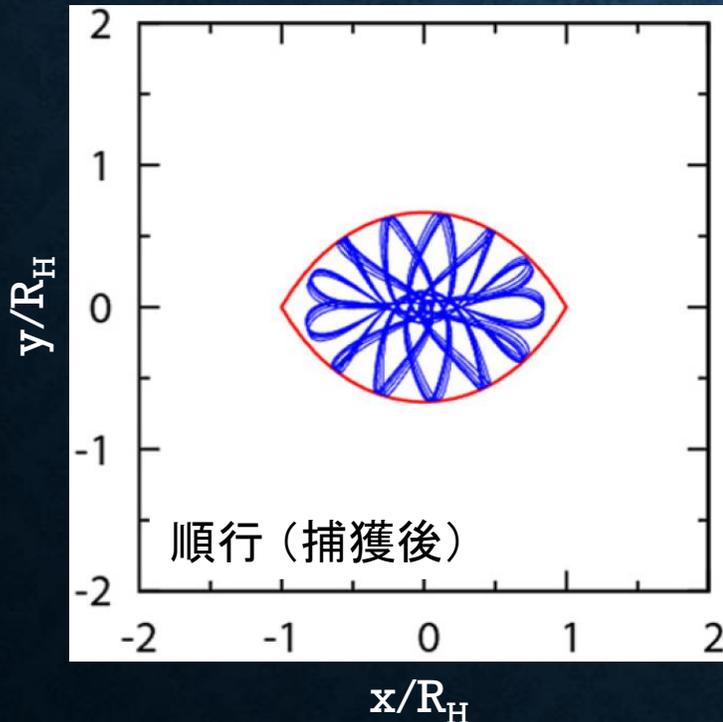
- 散逸前の周惑星円盤による弱いガス抵抗による捕獲
一時的捕獲の間にゆるやかにエネルギーが減少し捕獲
→ 長いもので惑星の公転周期の $10^4 \sim 10^5$ 倍程度、公転



(Suetsugu & Ohtsuki 2016)

ガス抵抗による捕獲

- 散逸前の周惑星円盤による弱いガス抵抗による捕獲
一時的捕獲の間にゆるやかにエネルギーが減少し捕獲
→ 長いもので惑星の公転周期の $10^4 \sim 10^5$ 倍程度、公転



(Suetsugu & Ohtsuki 2016)

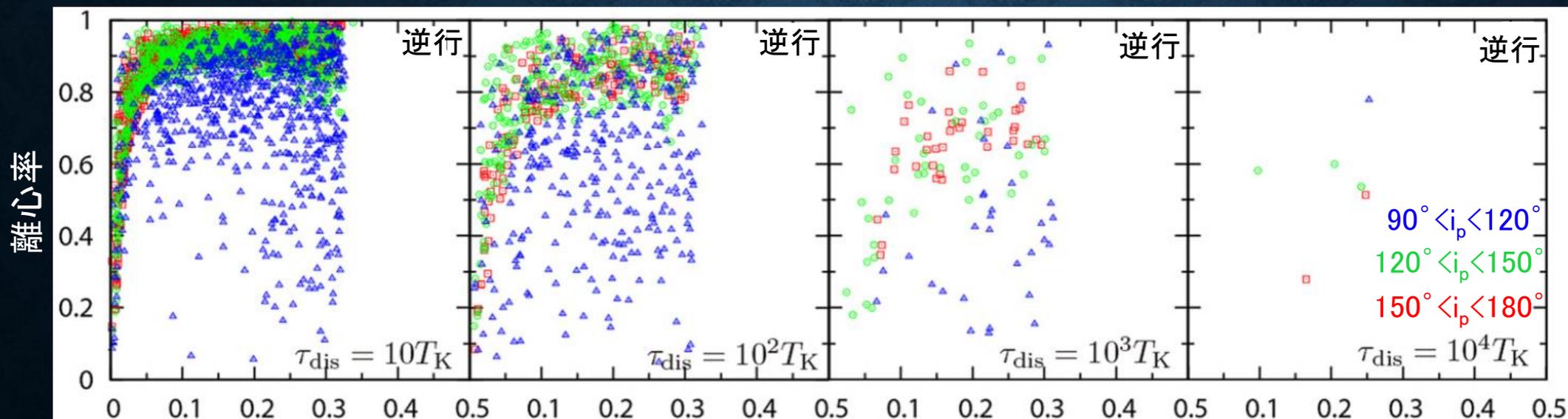
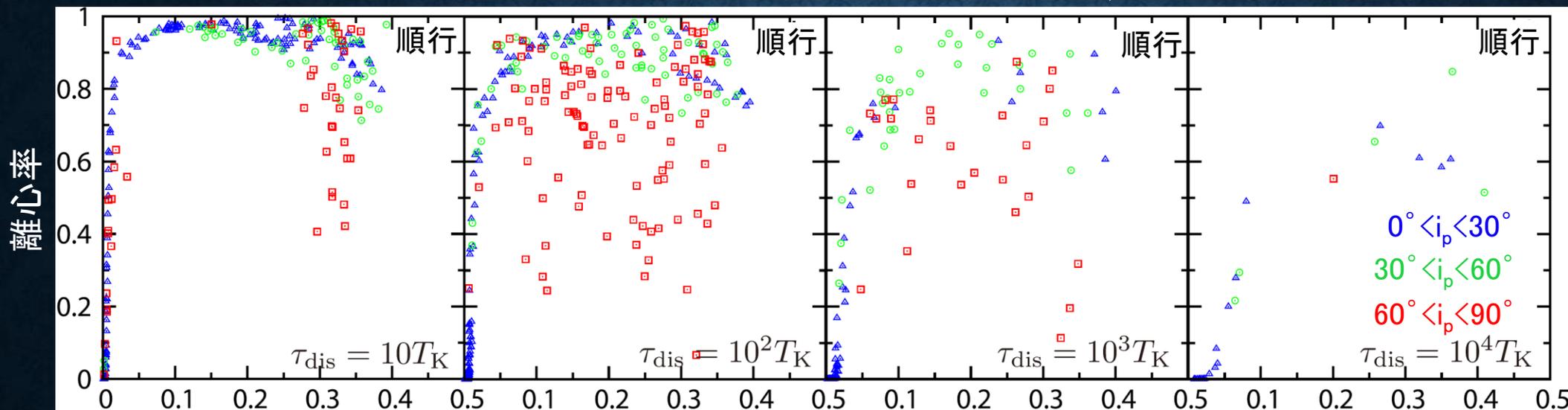
$$\Sigma = \Sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{dis}}}\right)$$

散逸時間

急速に円盤が散逸



ゆっくりと円盤が散逸



軌道長半径 (R_H)

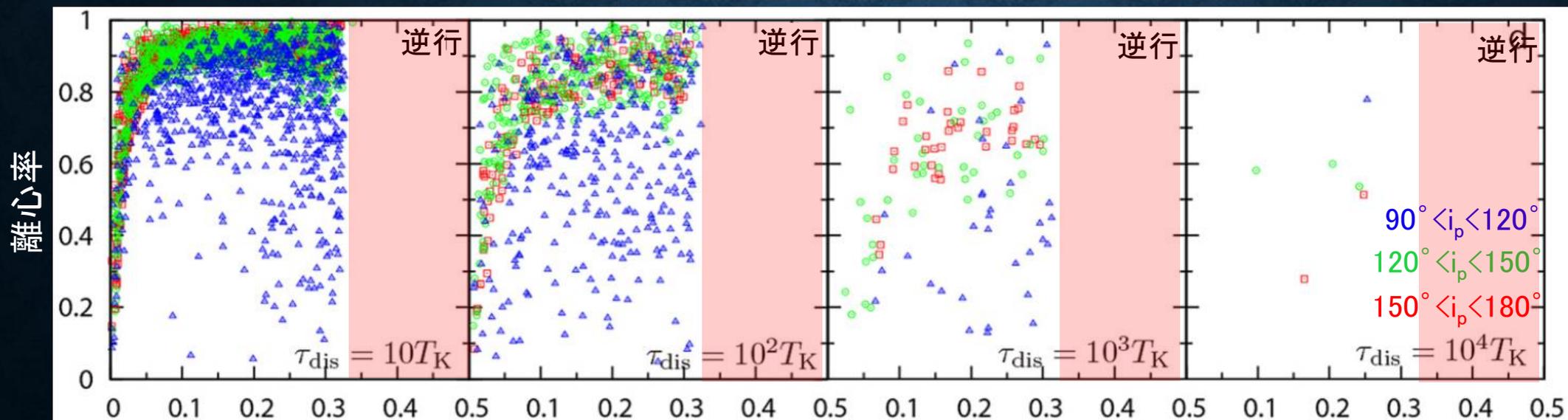
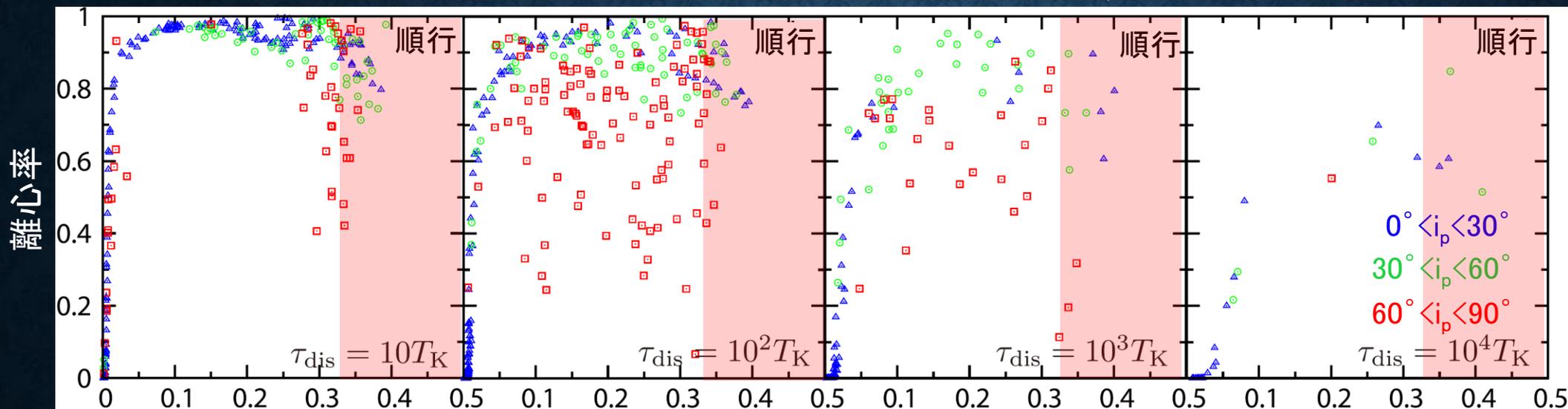
$$\Sigma = \Sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{dis}}}\right)$$

散逸時間

急速に円盤が散逸

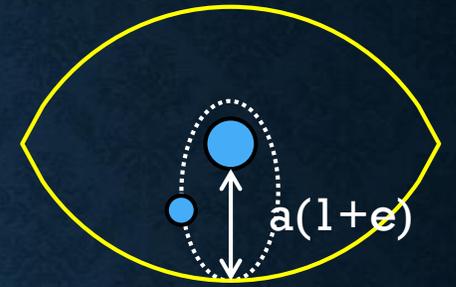


ゆっくりと円盤が散逸



軌道長半径 (R_H)

ガス抵抗による捕獲



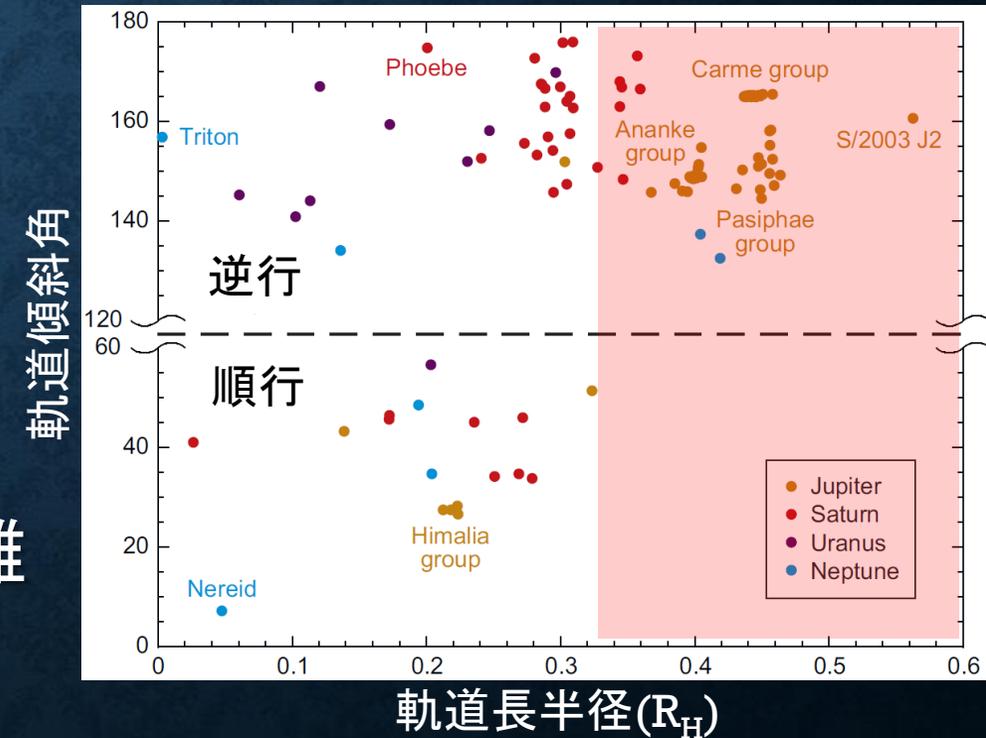
- $0.33R_H$ 以下の軌道長半径を持つものが大半
→ 捕獲後の遠点をヒル圏内部にとどめるため

• ガス抵抗による捕獲モデルの寄与

- 順行のものには寄与した可能性あり

→ HimaliaはHilda群起源？ (Cuk & Burns 2004)

- 逆行で $0.33R_H$ 以上のものへの寄与は困難



ガス抵抗による捕獲のまとめ

- 捕獲過程

- * 周惑星円盤の散逸時期

- 惑星周りをしばらく公転している間に次第にエネルギーを失い捕獲

- ガス抵抗が弱いので長時間生存可能

- 周惑星円盤散逸後の軌道要素

- * 離心率、軌道傾斜角の分布は幅広い

- * 軌道長半径は $0.33R_H$ 以下に制限

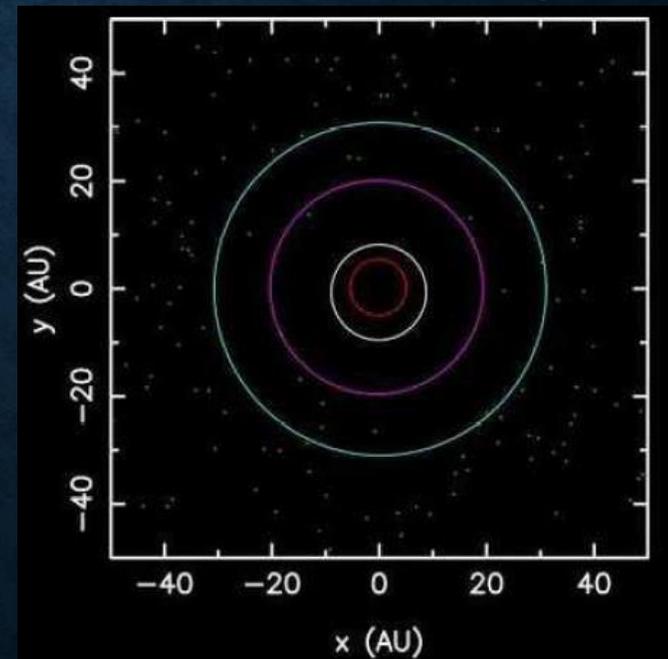
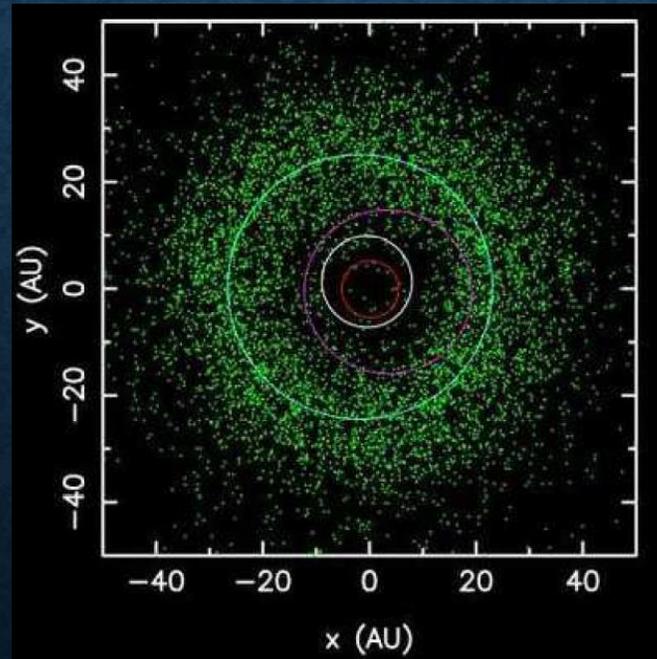
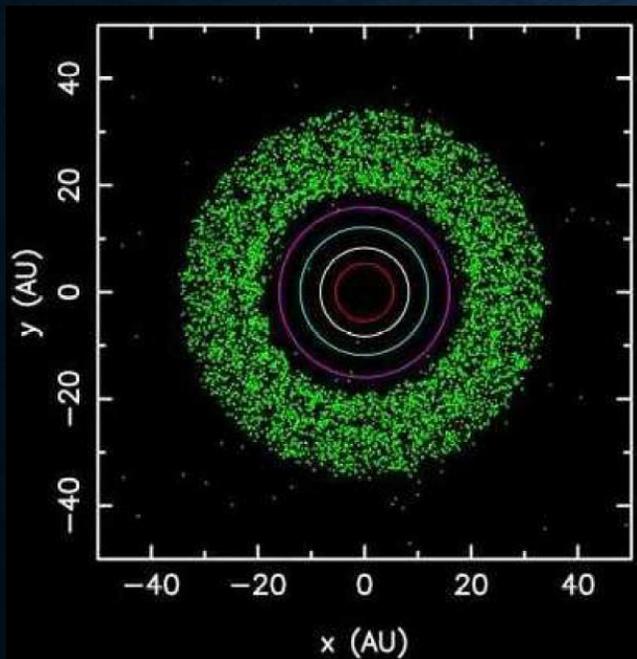
惑星同士の近接遭遇時の捕獲

- ニースモデル (Tsiganis et al. 2005)

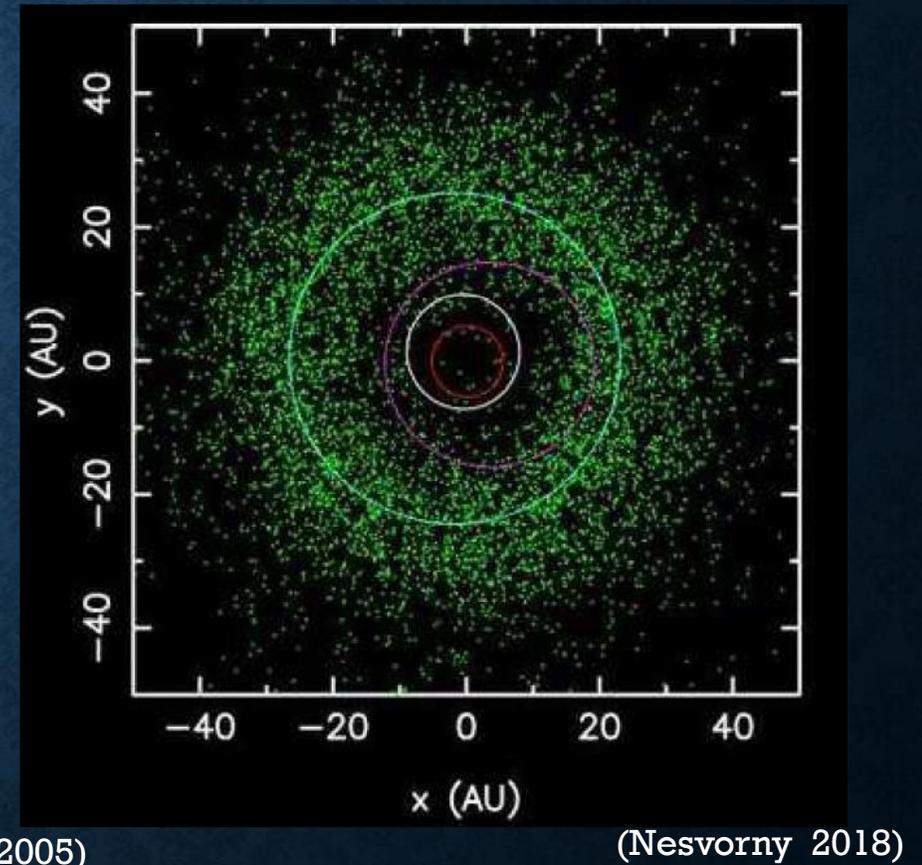
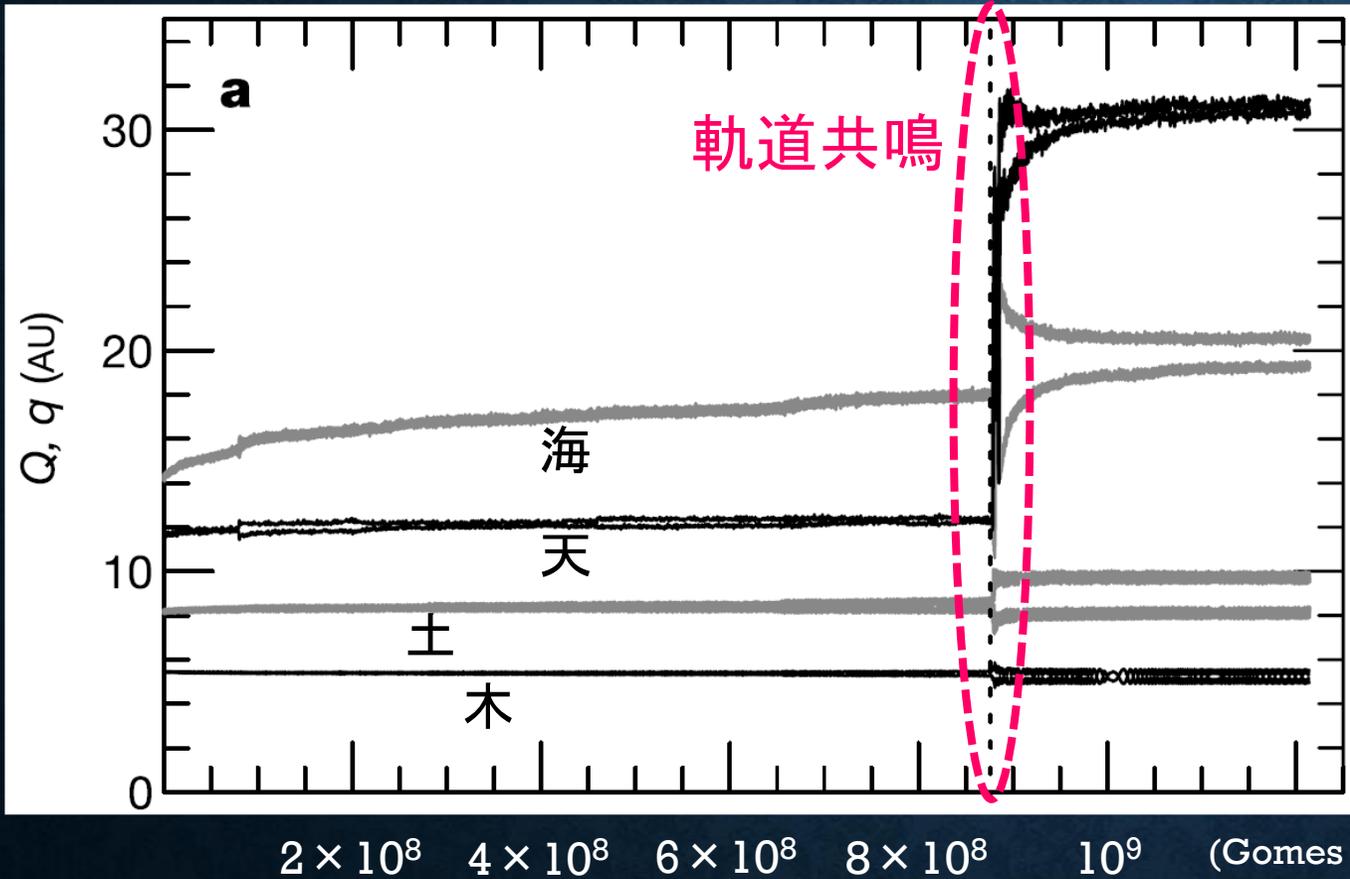
* 形成直後の太陽系が現在よりも小さくまとまっていたと仮定

* 木星と土星の軌道共鳴により太陽系の天体が移動

(Nesvorny 2018)



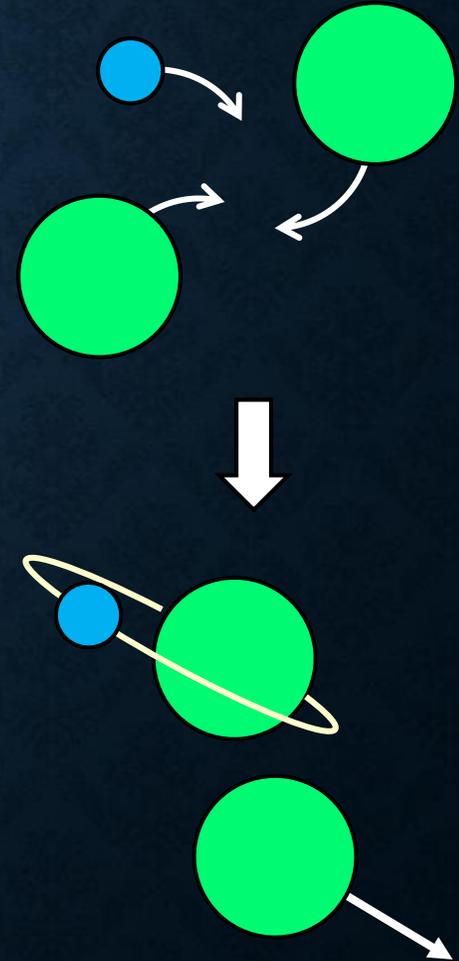
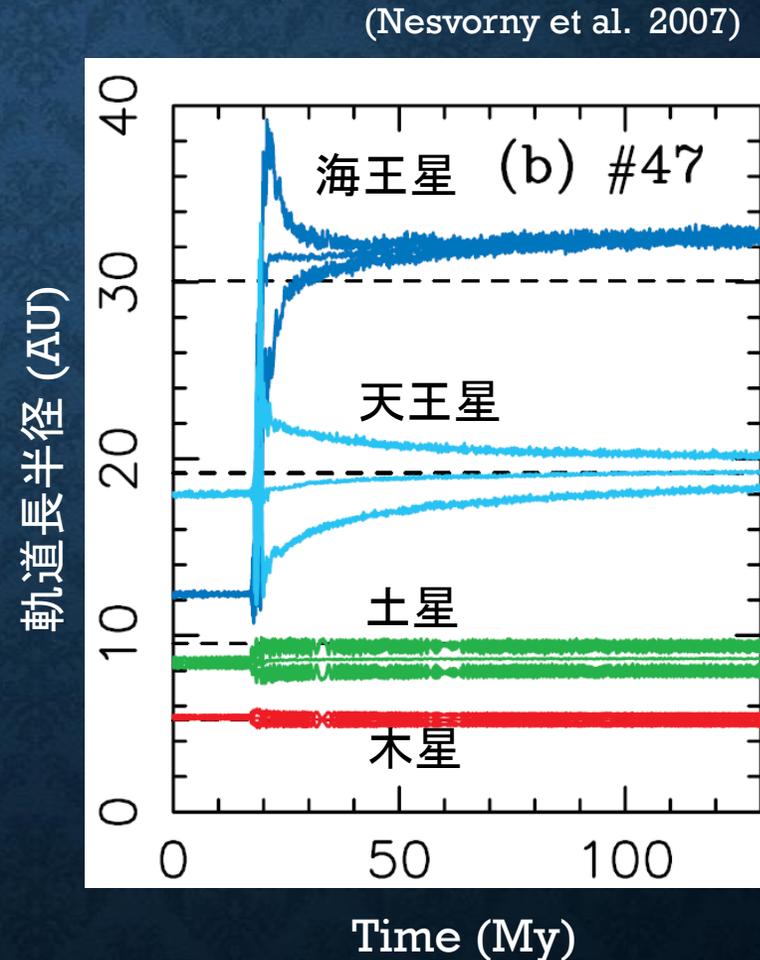
惑星同士の近接遭遇時の捕獲



共鳴時の天体同士の遭遇において小天体を捕獲できるか？

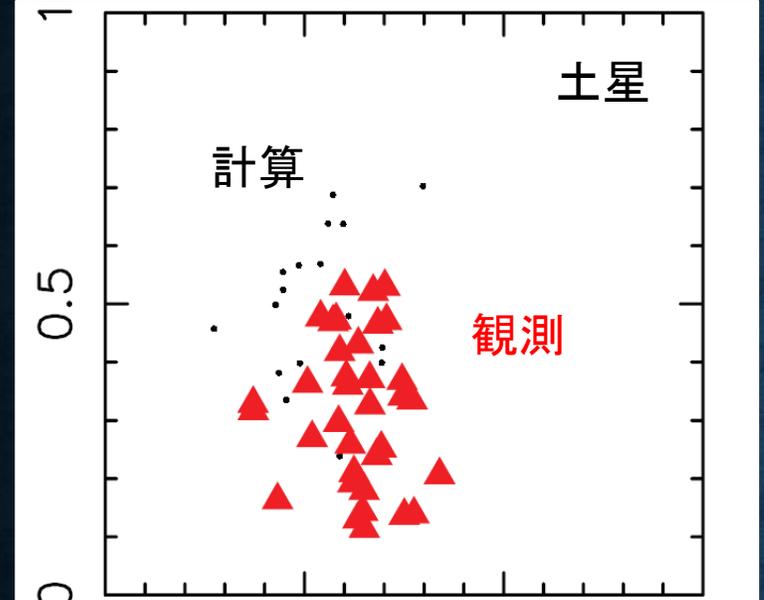
惑星同士の近接遭遇時の捕獲

- 共鳴時に惑星同士が近接遭遇
 - 土星と海王星18回
 - 天王星と海王星407回
- 三体相互作用で小天体を捕獲
 - 土星 18個
 - 天王星 568個
 - 海王星 1368個

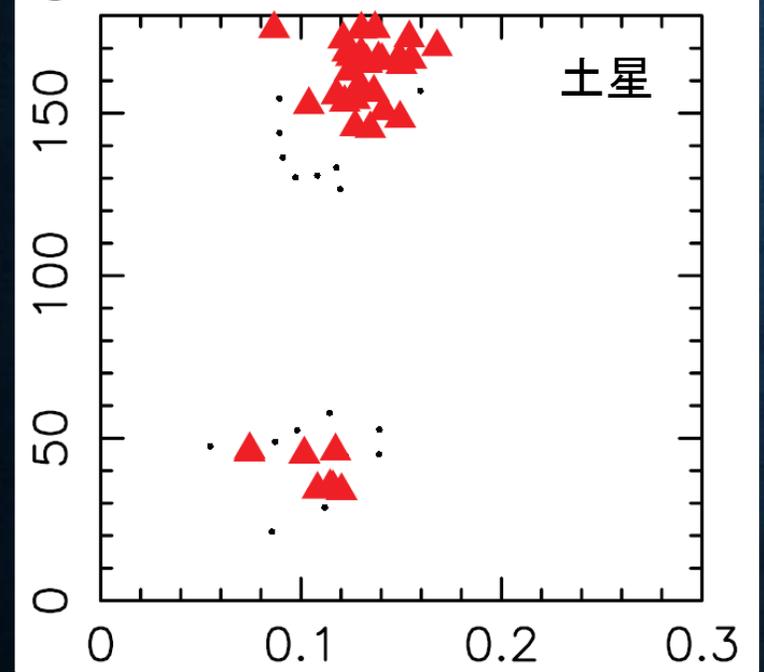


離心率

$0.23R_H$ $0.46R_H$ $0.69R_H$



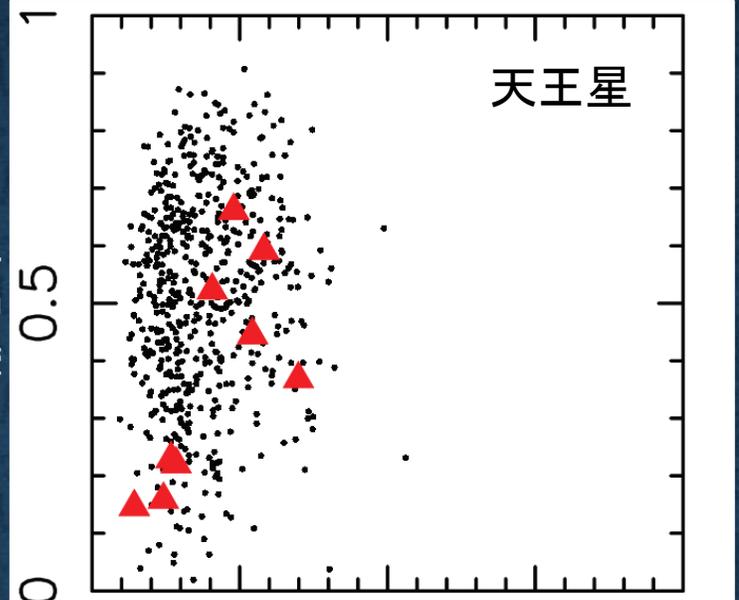
軌道傾斜角



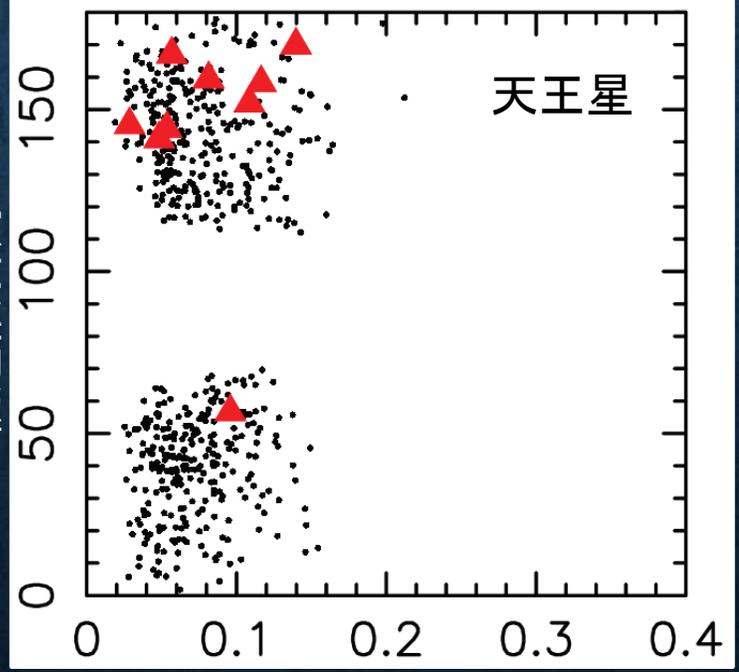
軌道長半徑 (AU)

離心率

$0.21R_H$ $0.42R_H$ $0.63R_H$ $0.85R_H$



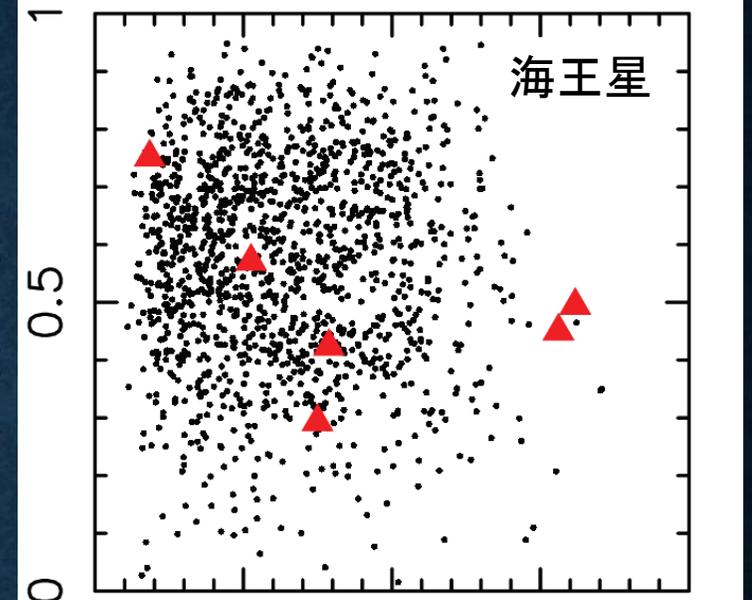
軌道傾斜角



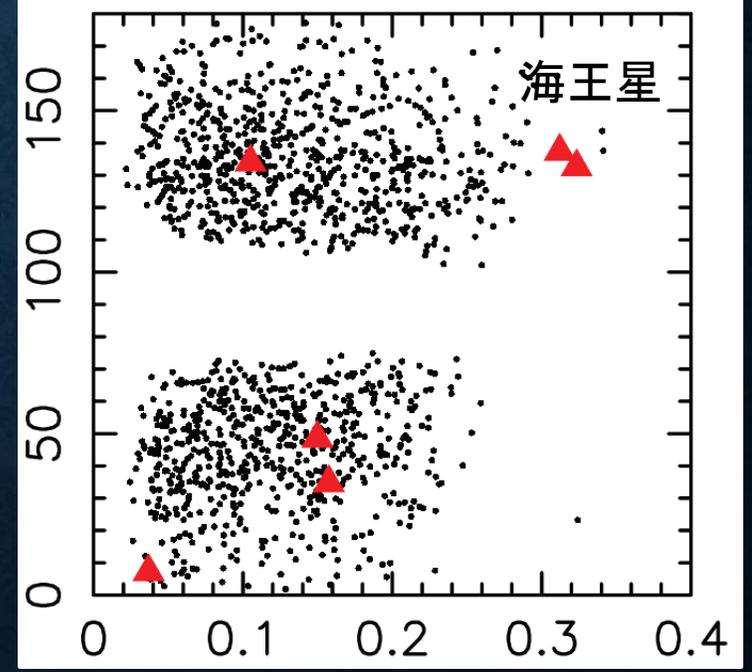
軌道長半徑 (AU)

離心率

$0.13R_H$ $0.25R_H$ $0.38R_H$ $0.51R_H$



軌道傾斜角



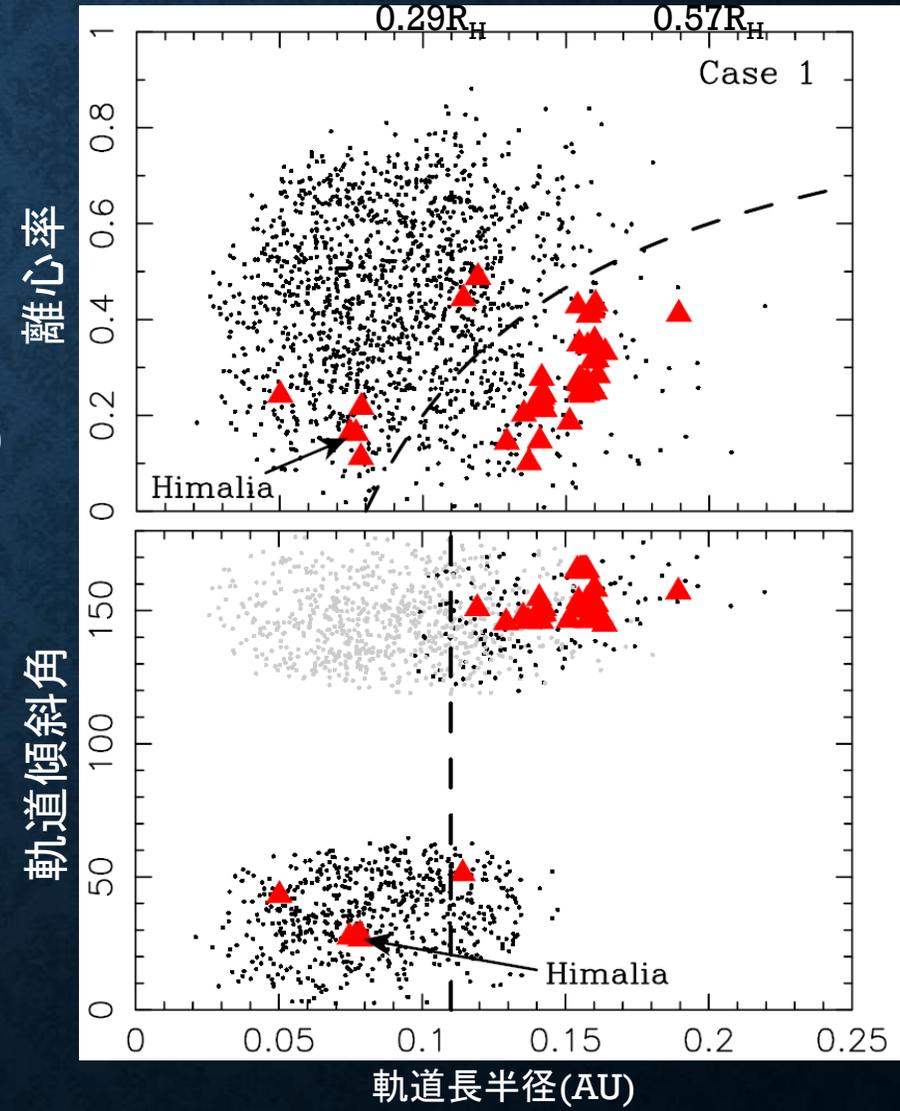
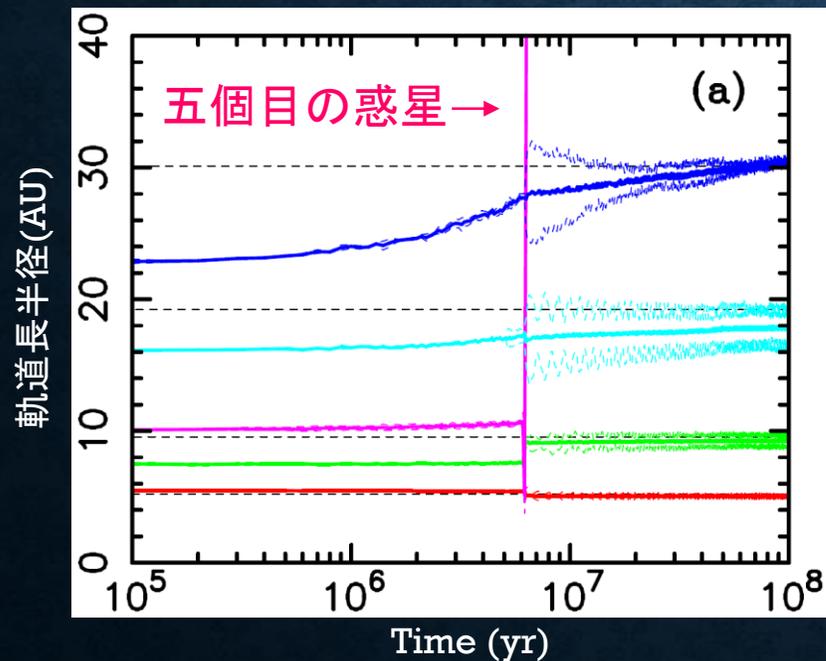
軌道長半徑 (AU)

惑星同士の近接遭遇時の捕獲

(Nesvorny et al. 2014)

- 木星の不規則衛星は？
 - ・天王星サイズの惑星がもう一個あったと仮定
 - ・木星とその惑星が近接遭遇し三体相互作用

(Nesvorny & Morbidelli 2012)



惑星同士の近接遭遇時の捕獲

(Bottke et al. 2010)

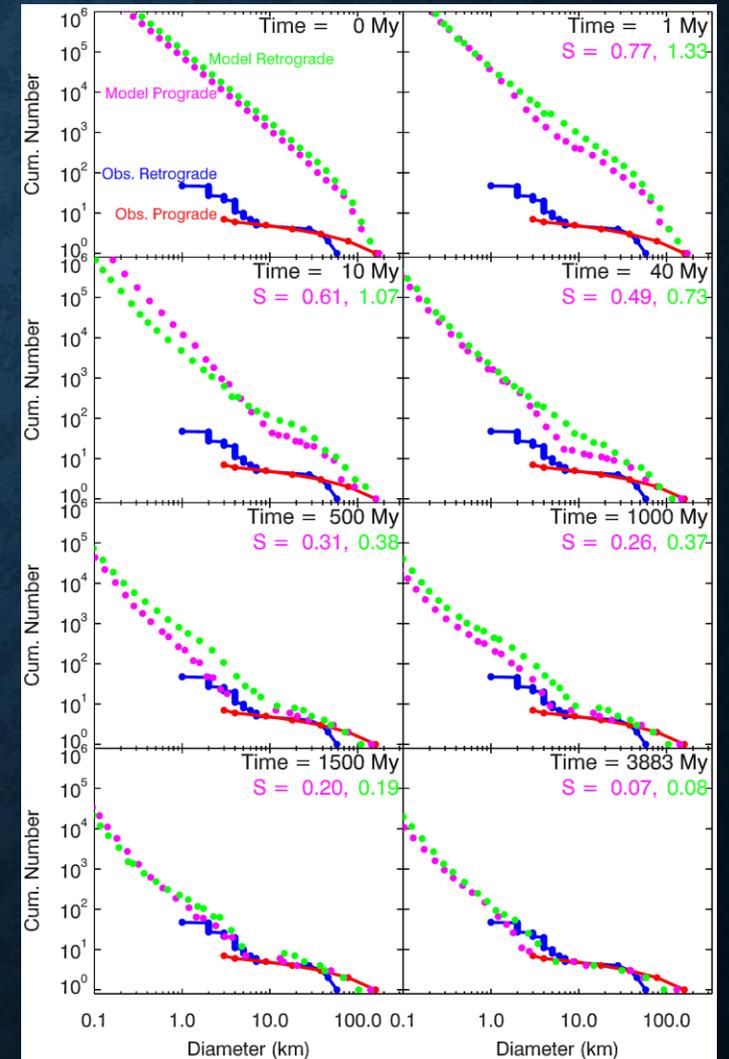
- 捕獲しすぎた不規則衛星の進化

*相互衝突による衝突進化で減少

不規則衛星の族が衝突進化を支持？

衝突で生じたダストは規則衛星表層へ？

(Bottke et al. 2013)



惑星同士の近接遭遇時の捕獲のまとめ

- 捕獲過程

太陽系初期は非常にコンパクトで、もう一つ惑星があったと仮定

→惑星移動時の惑星同士の近接遭遇で小天体と三体相互作用し捕獲

- 捕獲後の軌道要素

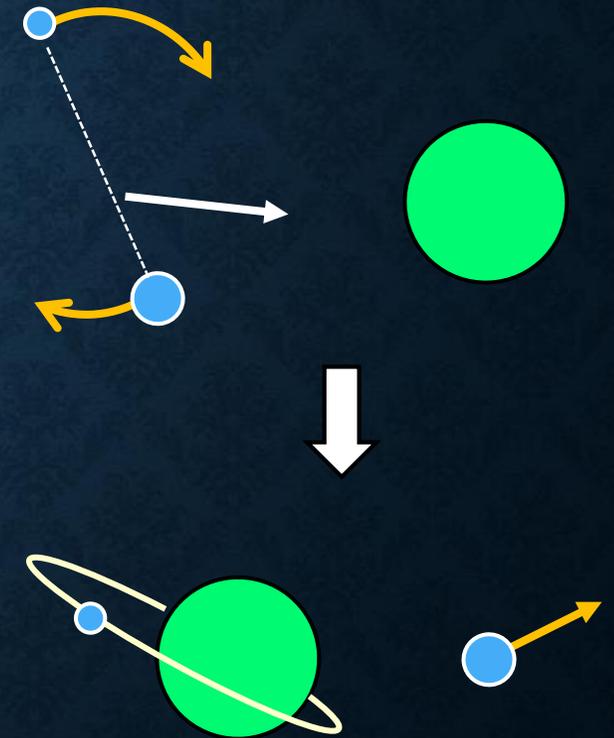
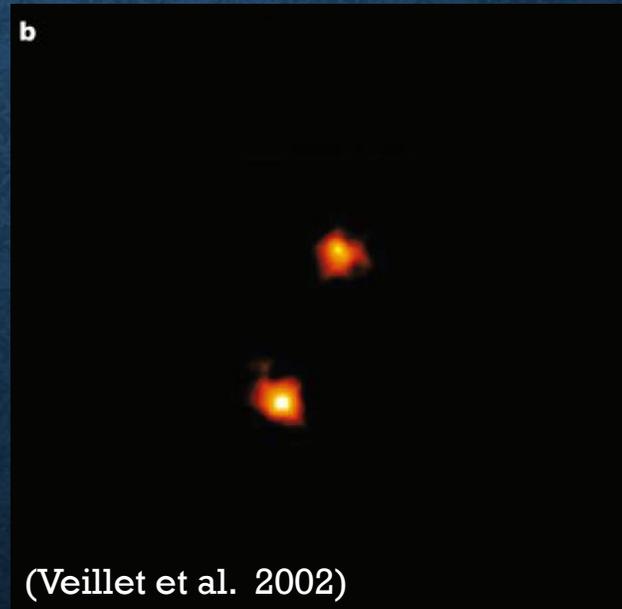
どの惑星でも不規則衛星は捕獲でき、それらの軌道要素の分布は幅広く観測ともおおむね一致している

(ただしHimaliaなどの大型の不規則衛星の捕獲頻度は非常に低く困難)

バイナリー小天体との遭遇による捕獲

- バイナリー小天体

小惑星、カイパーベルト天体には連星系をなすものが存在 (Noll et al. 2009)



バイナリーをなす二天体と惑星の三体相互作用で捕獲できるか？

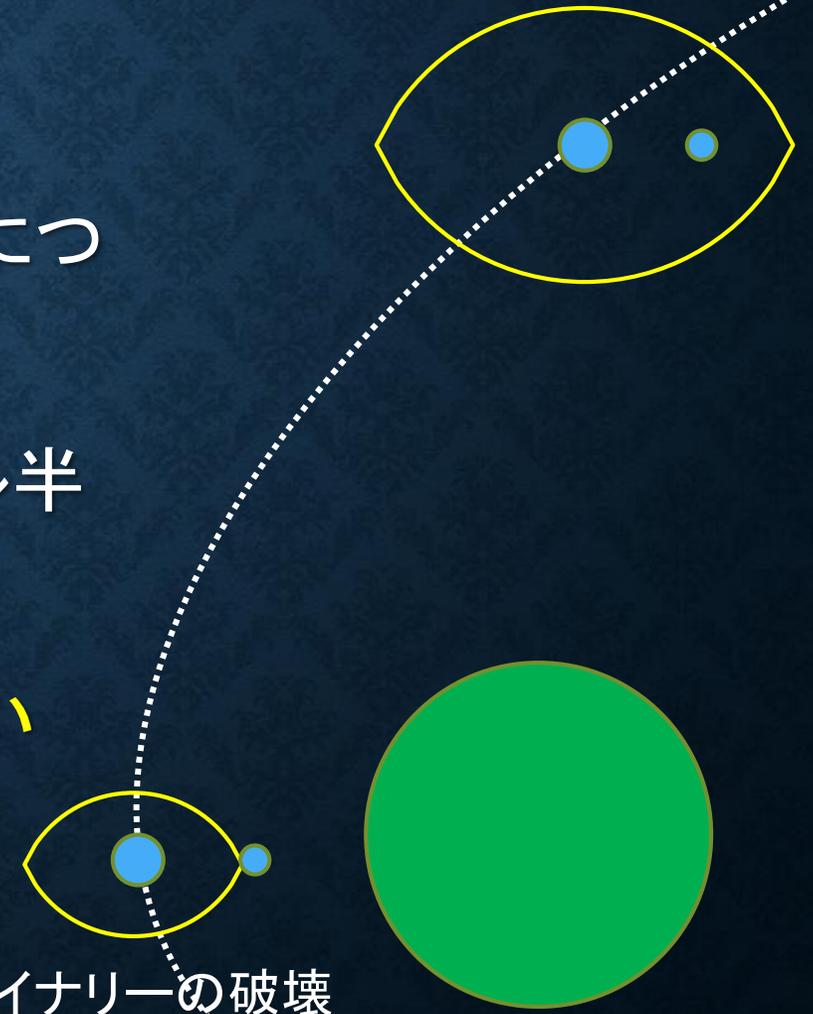
バイナリー小天体との遭遇による捕獲

- 捕獲過程 (Agnor & Hamilton 2006, Philpott et al. 2010)

- * バリナリーのヒル半径は惑星に接近するにつれて減少

- * バイナリーをなす二天体間の距離よりヒル半径が小さくなるとバイナリーは破壊

- 二天体間の距離が大きいと破壊しやすい



バイナリー小天体との遭遇による捕獲

- 捕獲過程

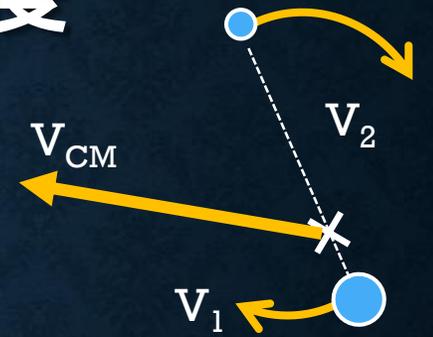
- * 捕獲されるかは破壊時の速度に依存

- * 以下の時、捕獲されやすい

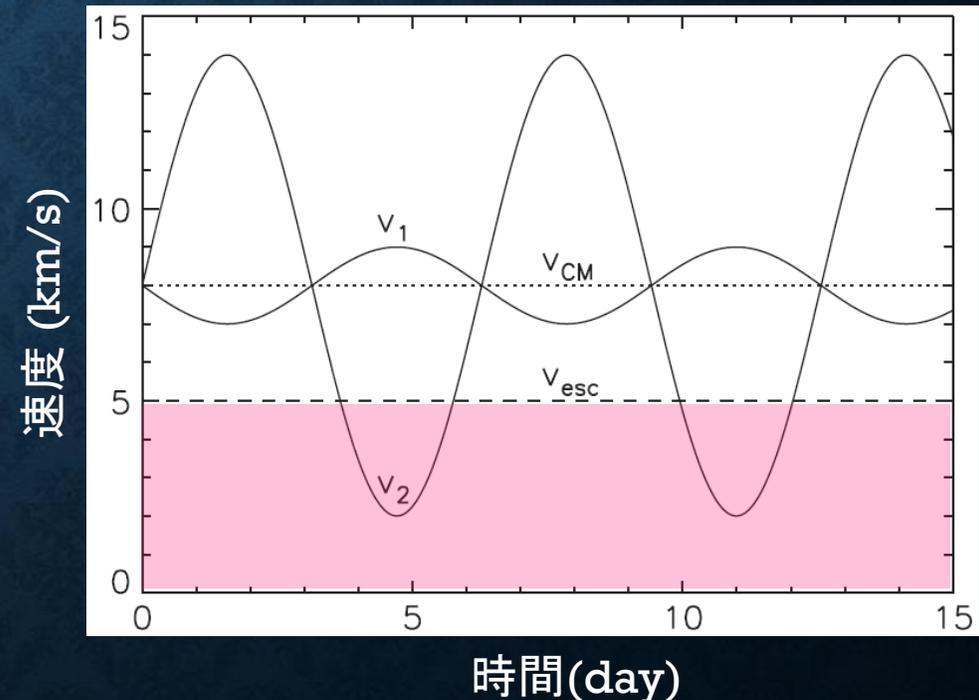
惑星遭遇時の重心の速度が遅い

and/or

小天体の重心周りの公転速度が速い

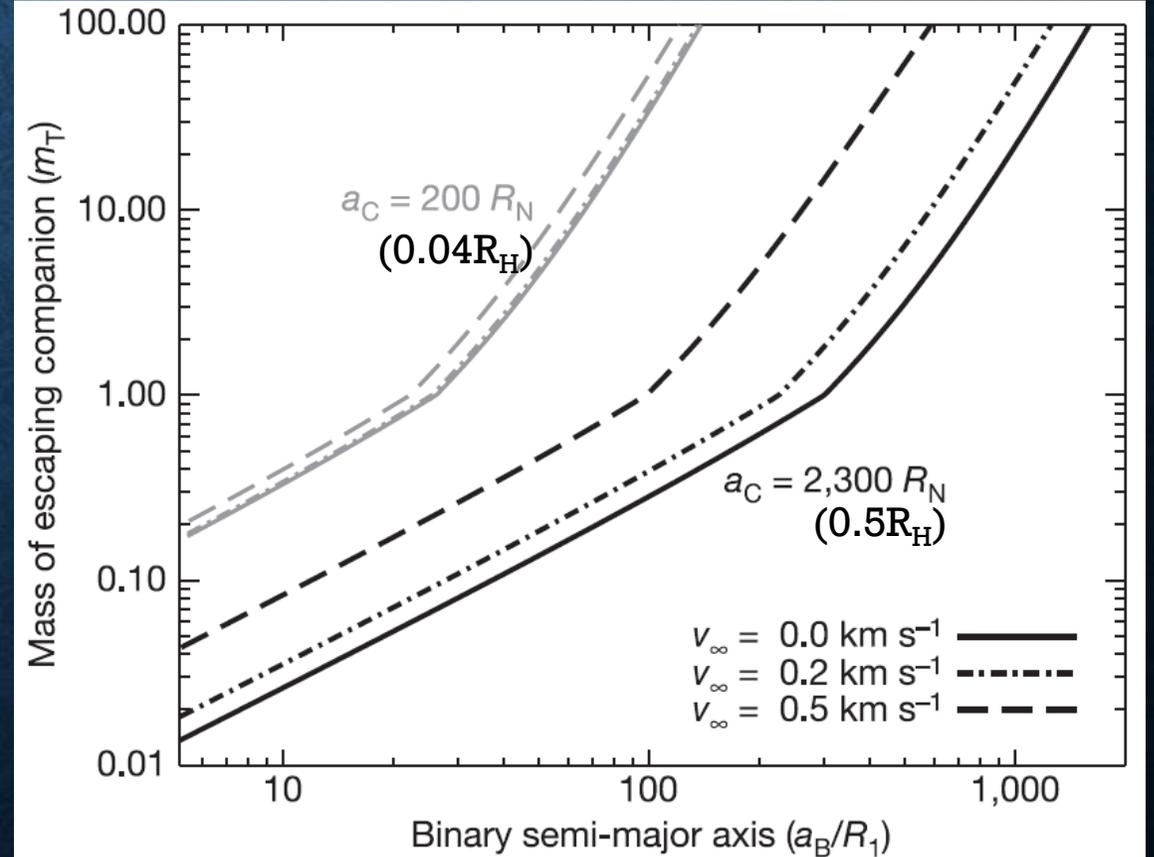
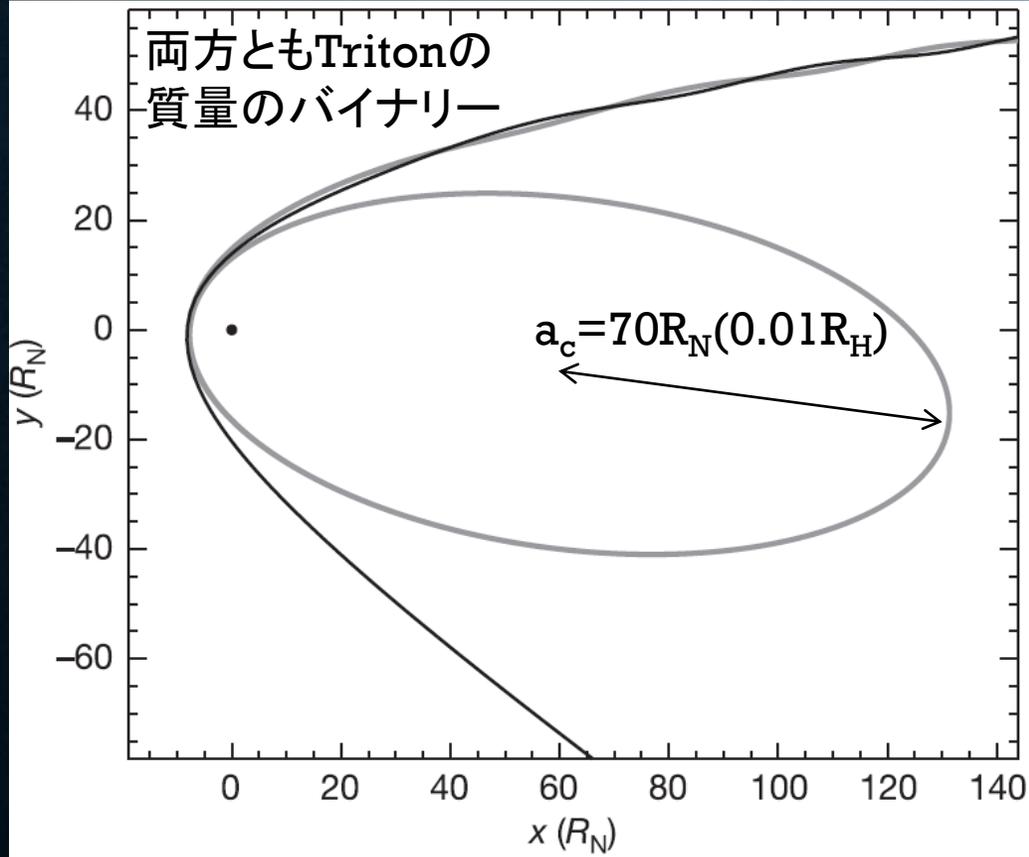


(Philpott et al. 2010)



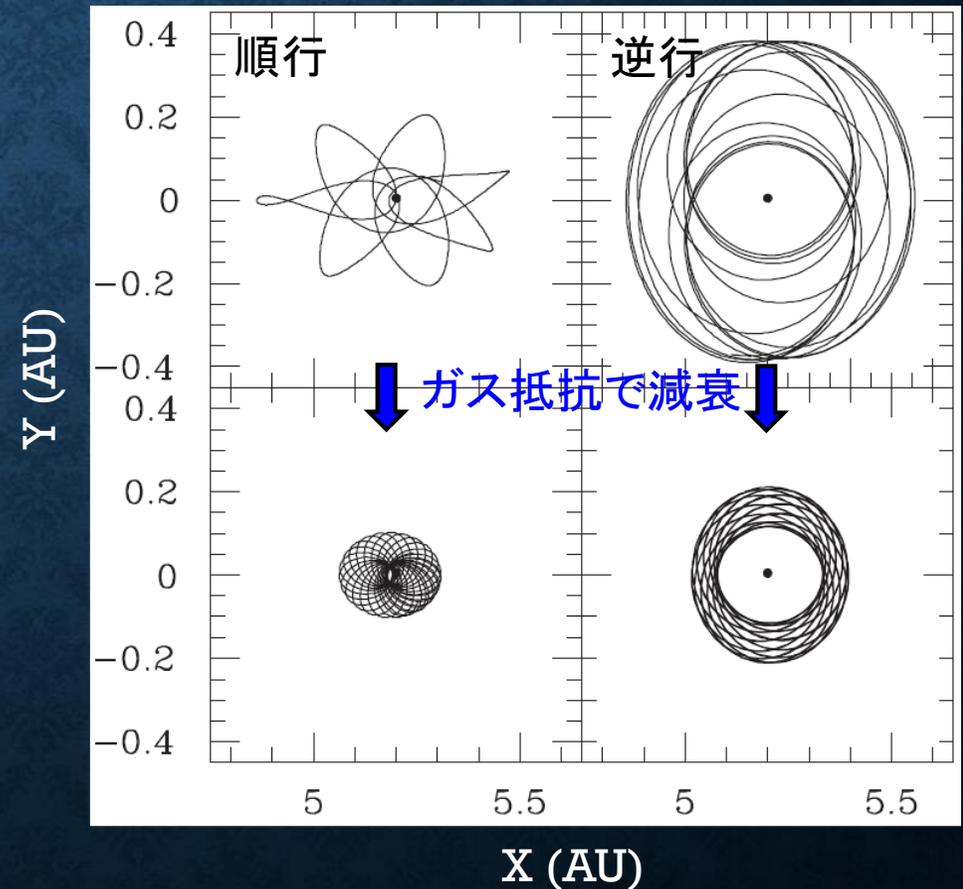
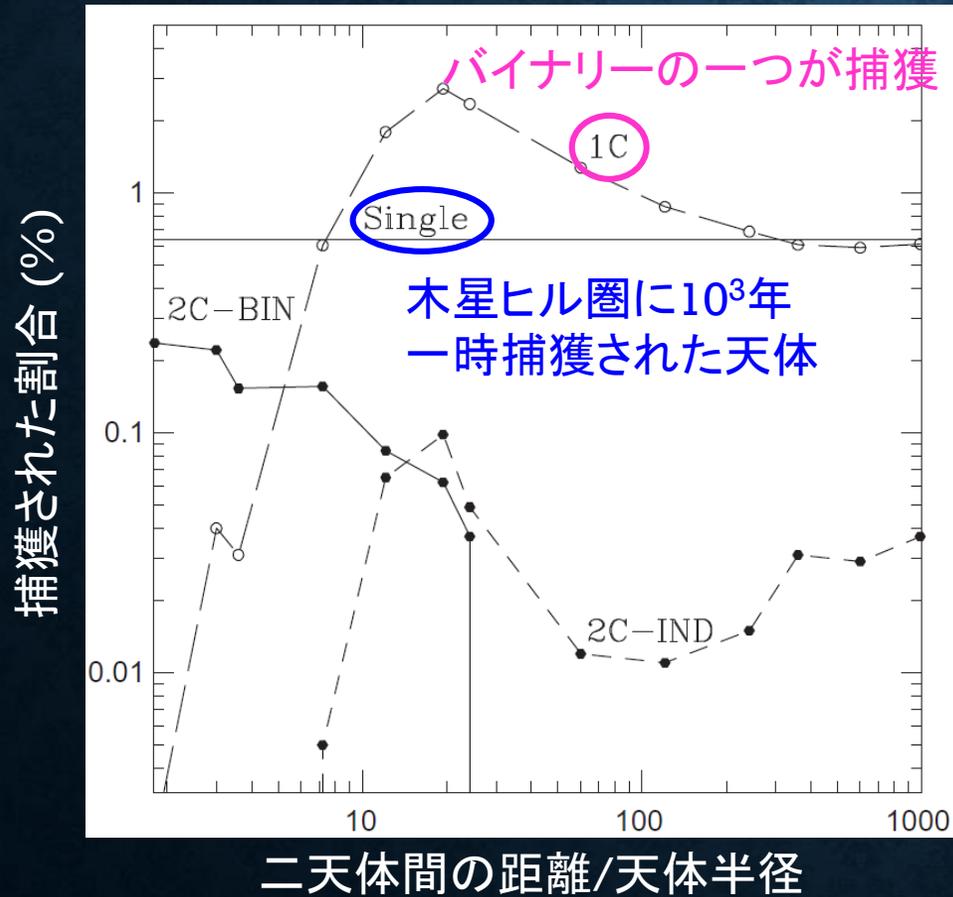
バイナリー小天体との遭遇による捕獲

- Tritonの場合 (Agnor & Hamilton 2006)



バイナリー小天体との遭遇による捕獲

- 木星の不規則衛星の場合 (Philpott et al. 2010)



バイナリー小天体との遭遇による捕獲

- 「バイナリー小天体」+「ニースモデル」 (Vokrouhlicky et al. 2008)

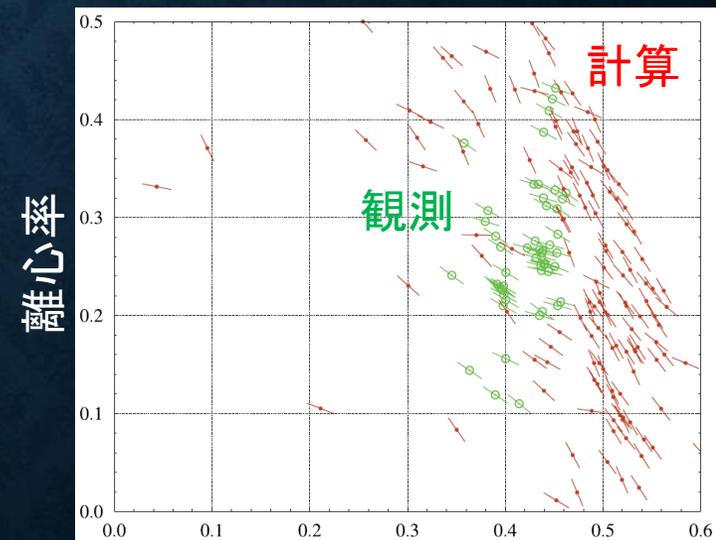
惑星移動後の結果を使用したバイナリー小天体による捕獲

- * バイナリーと惑星の相対速度が大きく捕獲効率が非常に低い
- * 捕獲後の軌道要素も観測とは合わない

- 「バイナリー小天体」+「一時捕獲」 (Gaspar et al. 2011, Gaspar et al. 2013)

長時間惑星周りを一時的に公転する軌道での捕獲

- * 軌道長半径の大きい逆行衛星も形成可能



軌道長半径(R_H)

(Gaspar et al. 2013)

バイナリー小天体との遭遇による捕獲のまとめ

- 捕獲過程

惑星への接近によるヒル圏減少でバイナリーが破壊され、
二つの小天体のうち、どちらか一つを捕獲

→Tritonなどの大きな天体も捕獲可能

- 捕獲後の軌道要素

単純なバイナリー小天体の破壊による捕獲では観測と異なるため、
ガス抵抗や一時捕獲といった他の物理過程が必要

全体のまとめ

- 不規則衛星は軌道や色の特徴から**捕獲された小天体**が起源
- 代表的な三つの捕獲モデルはどれも一長一短あり

ガス抵抗による捕獲: ✖ 大きな軌道長半径の不規則衛星が作れない

○ 特殊な仮定が少ない

惑星移動による捕獲: ✖ 特殊な仮定が多い

○ どの惑星の不規則衛星もおおむね再現できる

バイナリーによる捕獲: ✖ 惑星形成期のバイナリーの割合が不明

○ Tritonなどの大型の不規則衛星を作れる