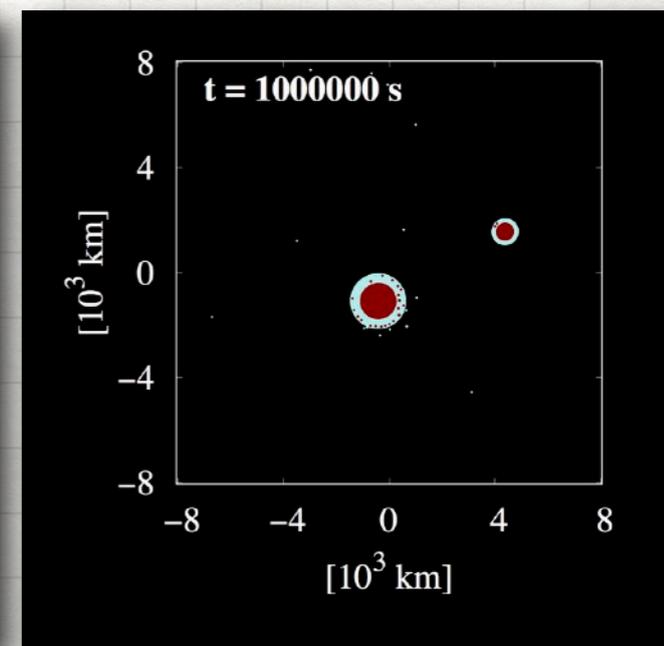
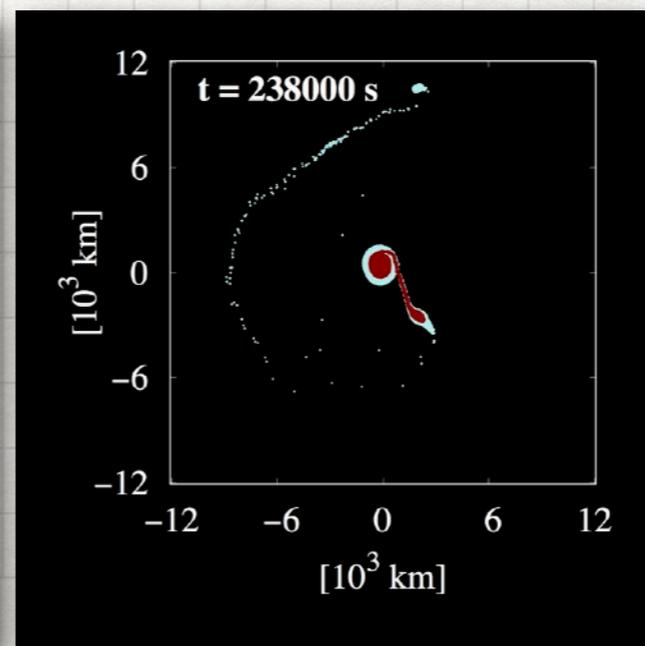
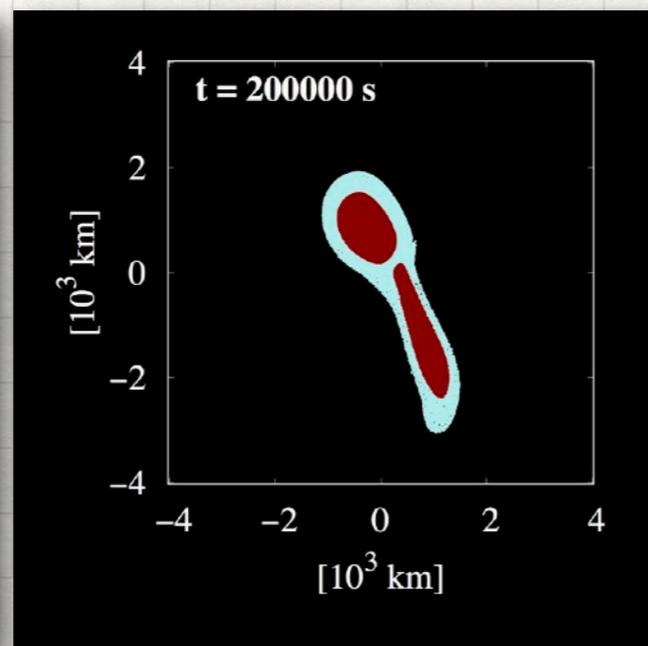
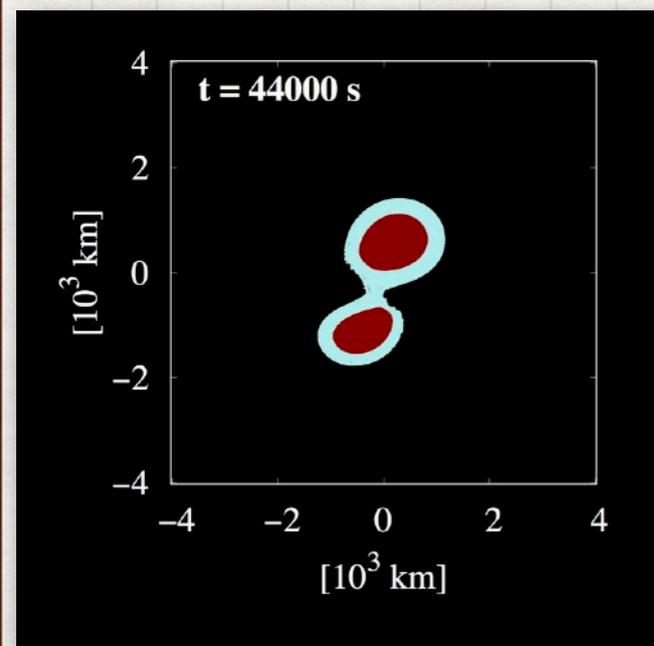


巨大衝突による 太陽系外縁天体での衛星形成と その後の潮汐進化

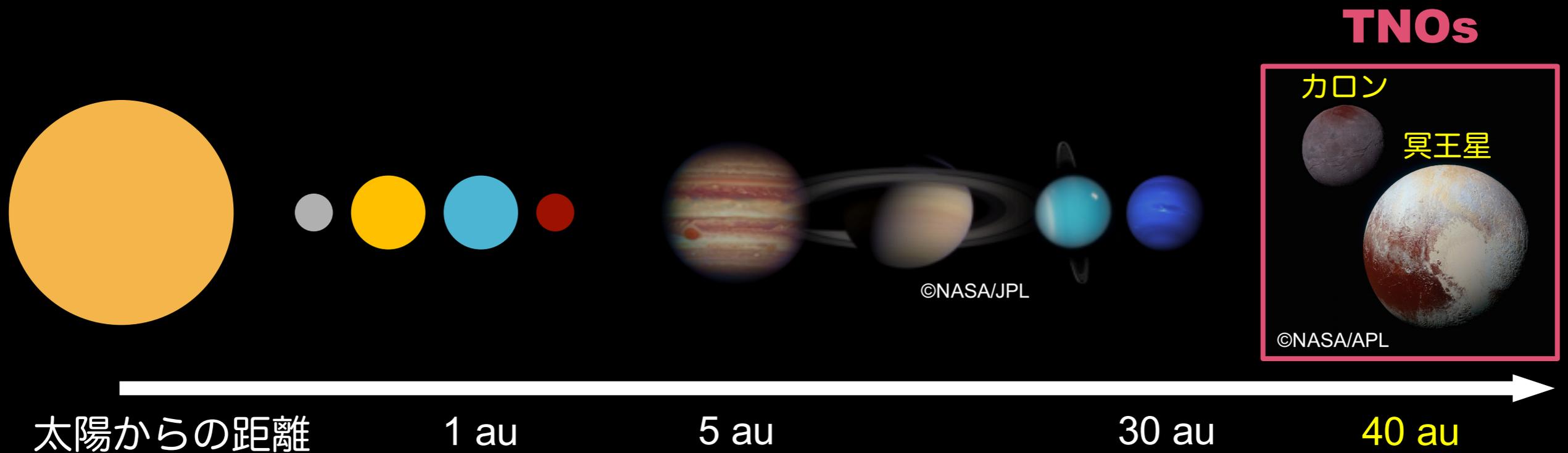
荒川創太¹、兵頭龍樹²、玄田英典²

¹東工大地惑, ²東工大ELSI



太陽系外縁天体

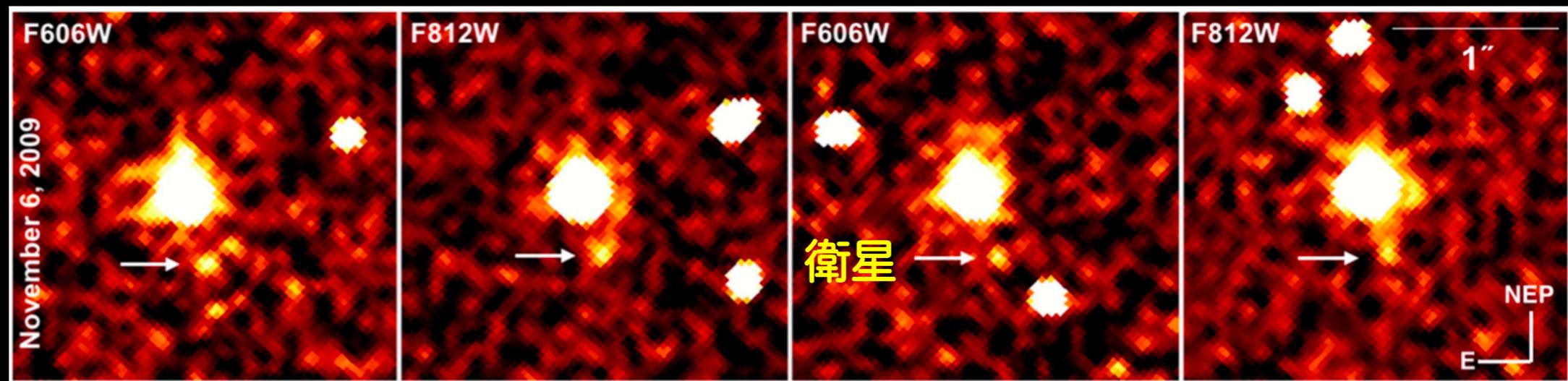
- 太陽系外縁天体：海王星より外側にある天体
(Trans-Neptunian Objects, TNOsとも呼ばれる)



大型の外縁天体における衛星の発見

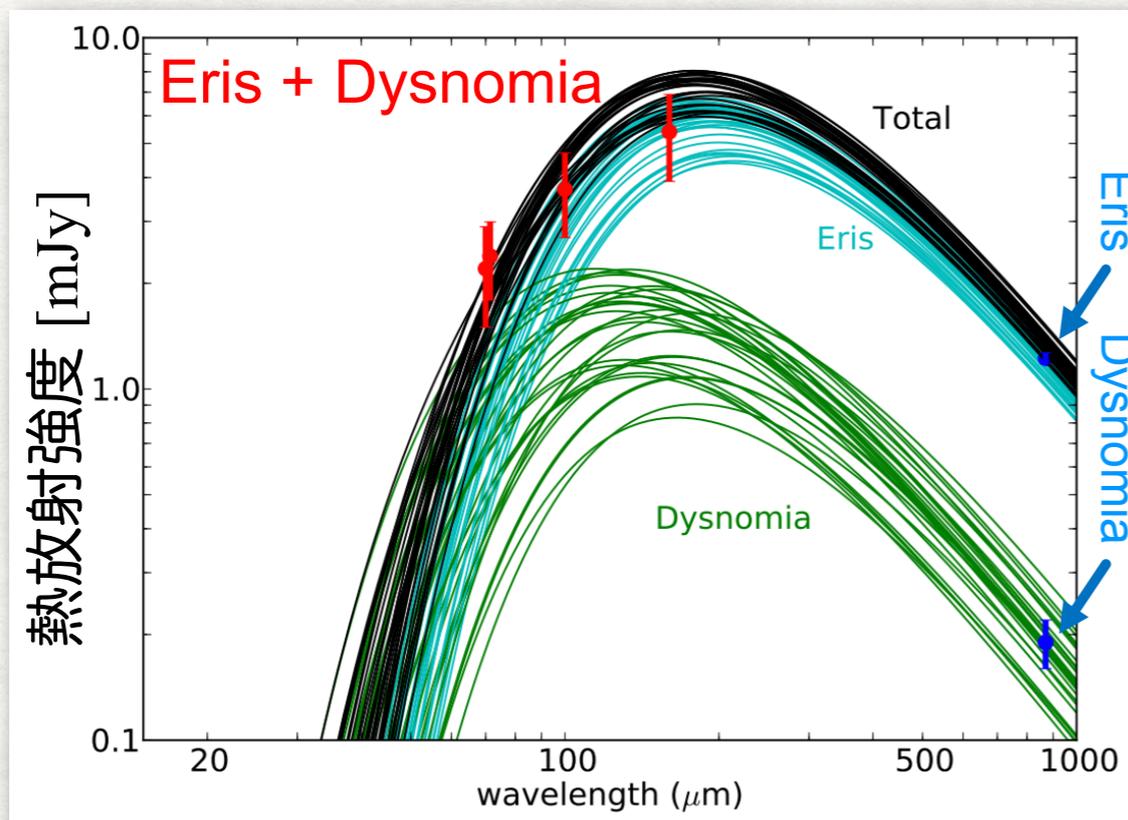
- 近年の観測、データ解析によって、直径1000 km以上のTNOsは全て衛星を持つことが明らかになった
(Pluto, Eris, Haumea, Makemake, 2007 OR₁₀, Quaoar)

アーカイブデータの再解析による2007 OR₁₀の衛星の発見 (Kiss et al. 2017)

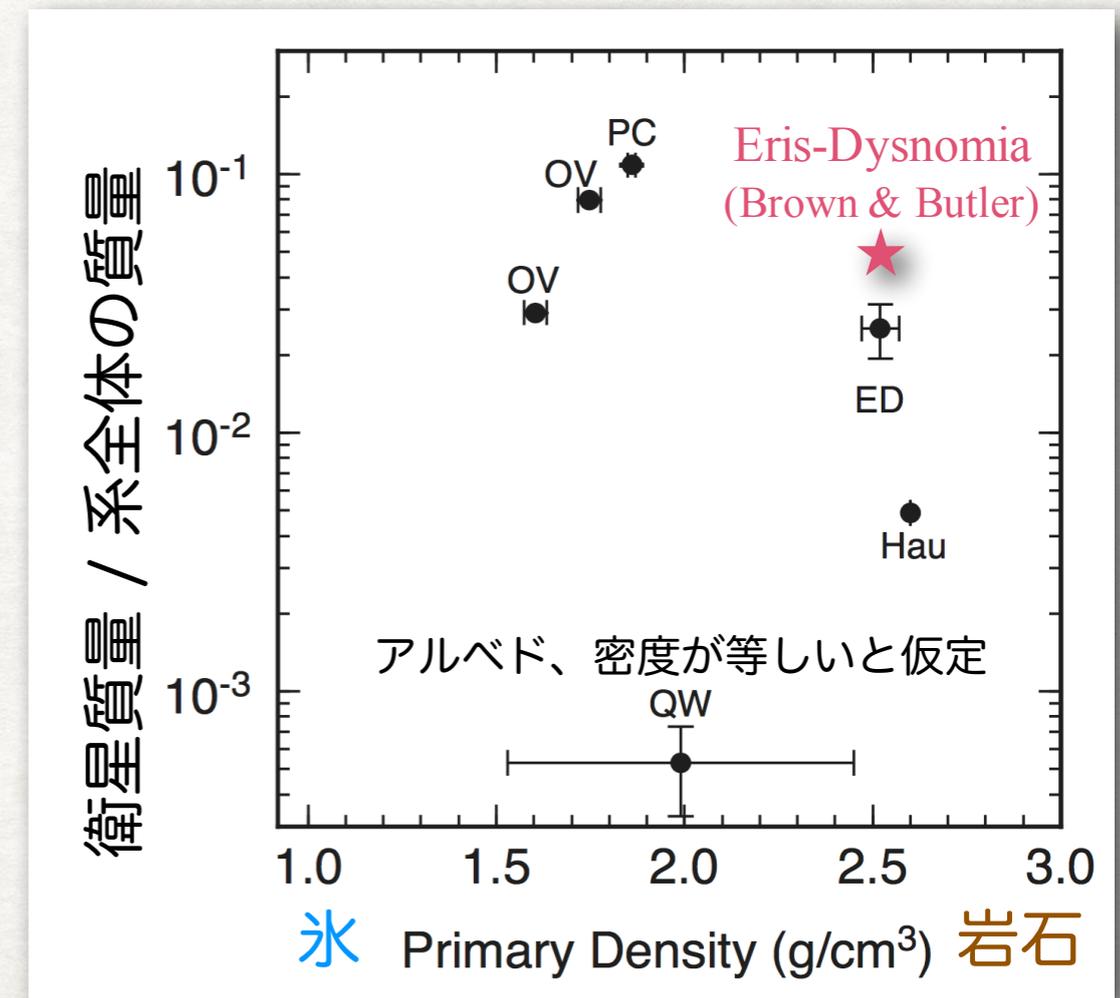


大型の外縁天体とその衛星の質量比

- ・ (一番大きな) 衛星の質量は本体の1/10から1/1000程度
- ・ ただし、密度やアルベドが精度よく求まっていない天体については、質量比にも大きな不定性がある
- ・ 熱放射観測によるサイズ比の制約も可能



Brown & Butler (2018)



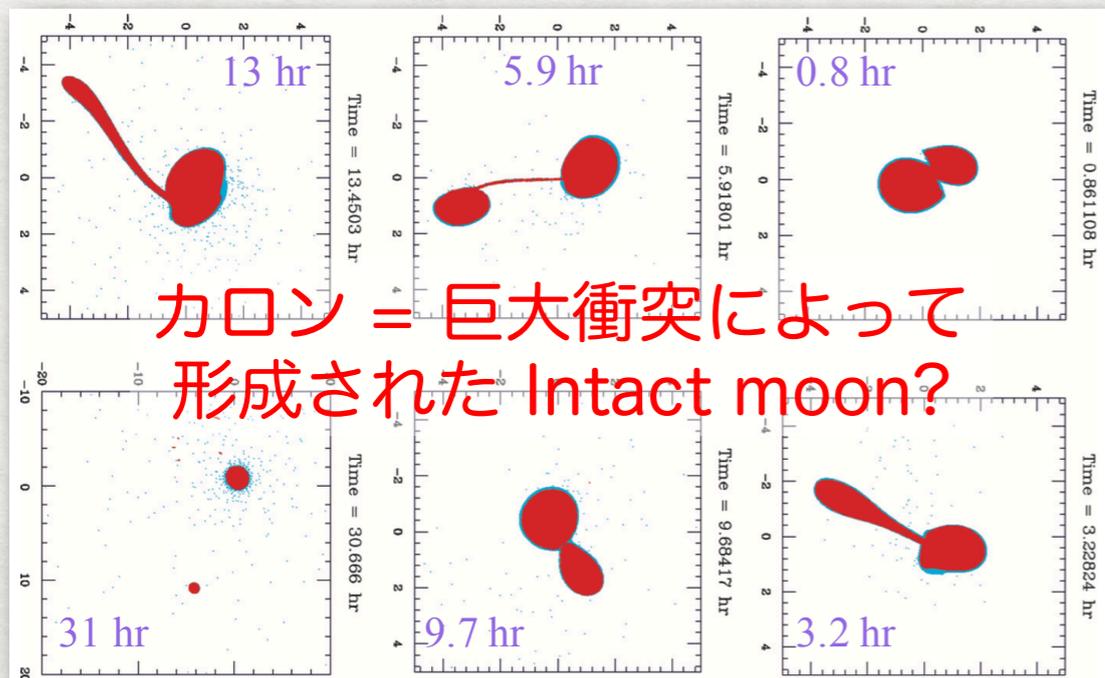
Barr & Schwamb (2016)

巨大衝突による衛星形成

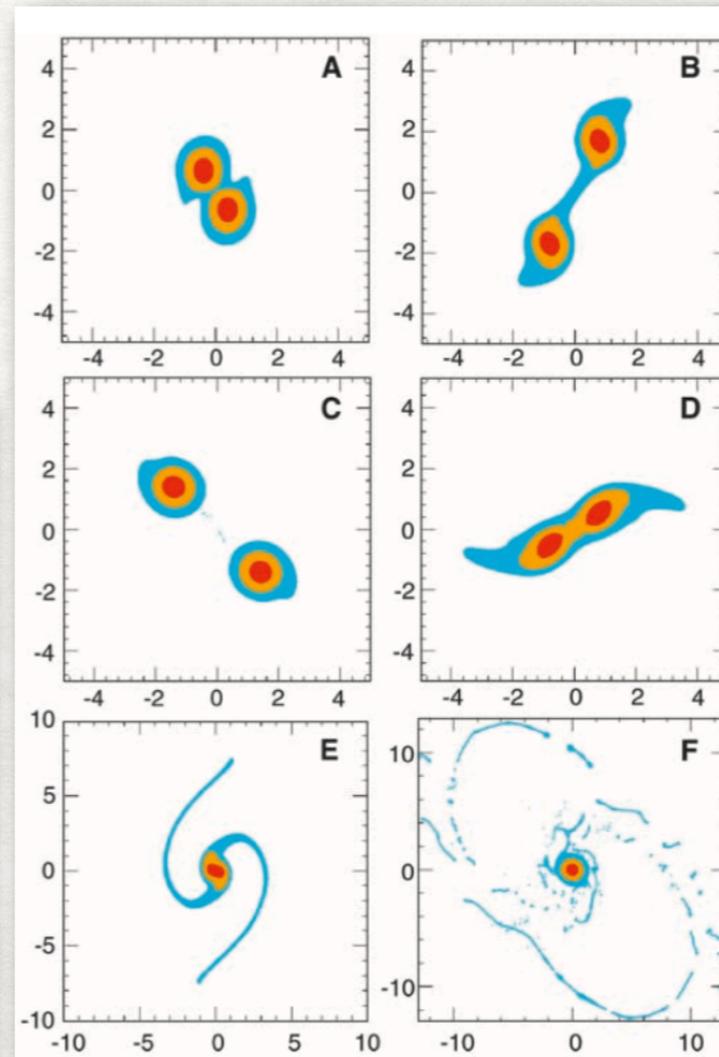
- 巨大衝突による衛星形成プロセス：
Intact and/or Disk-origin

Disk-origin Moon

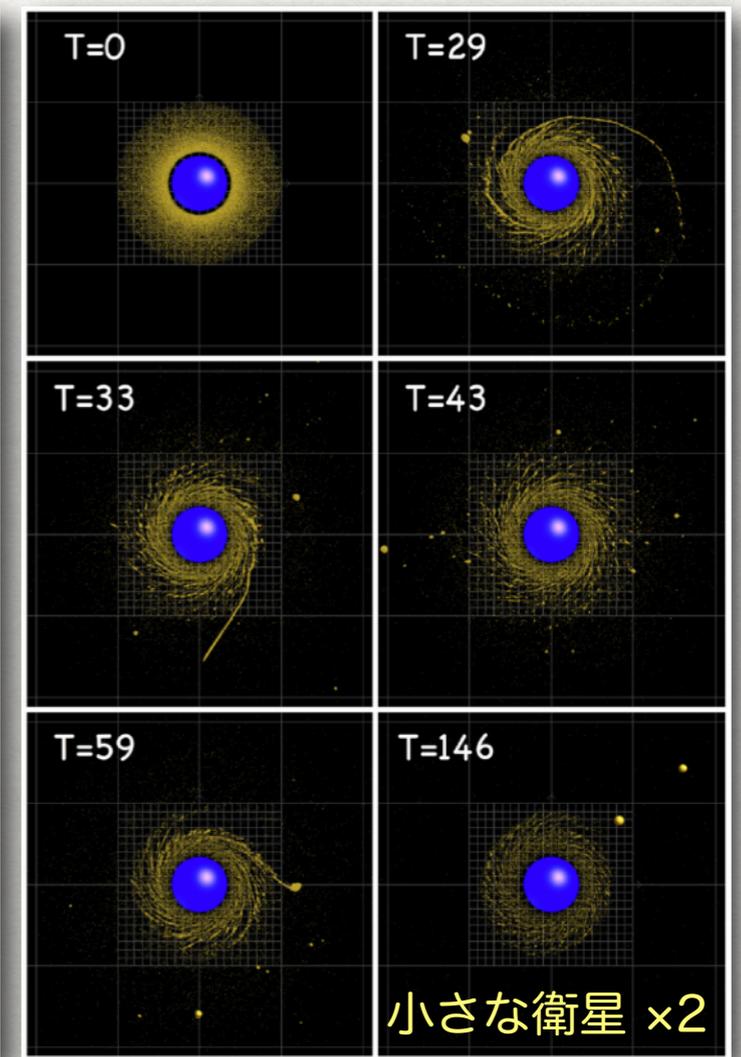
- 質量比0.1程度の大きな衛星は Intact moonとして形成？
- より小さな衛星の起源は？



Canup (2011)



Canup (2005)



Hyodo et al. (2015)

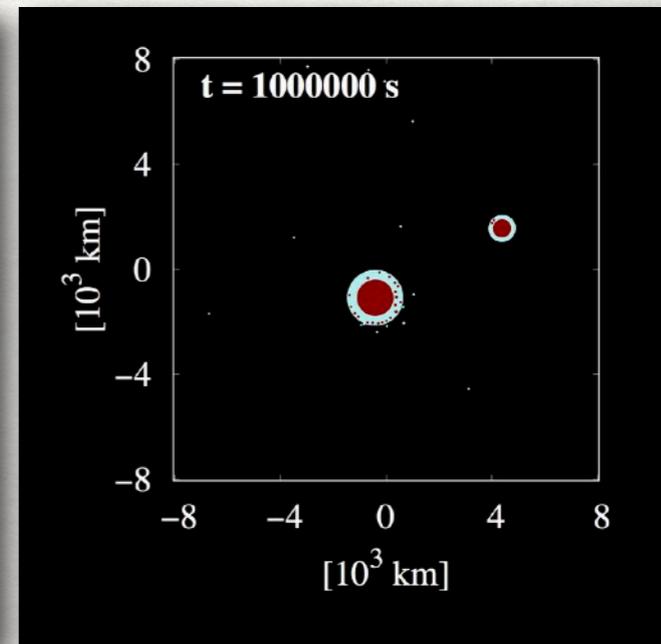
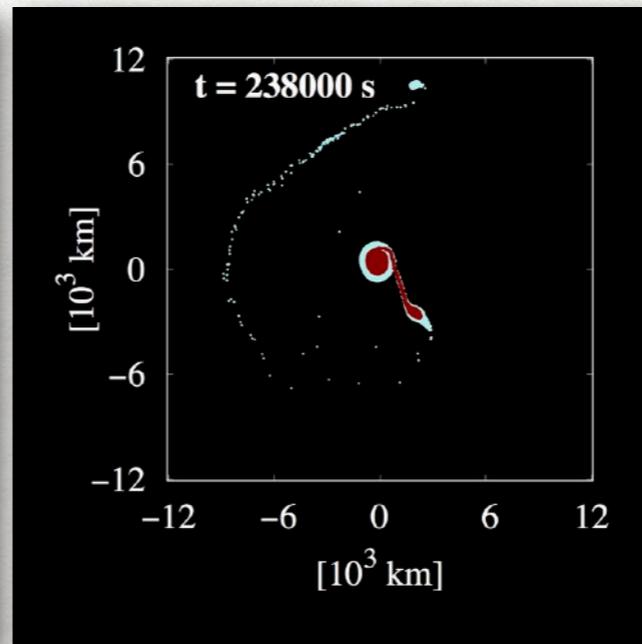
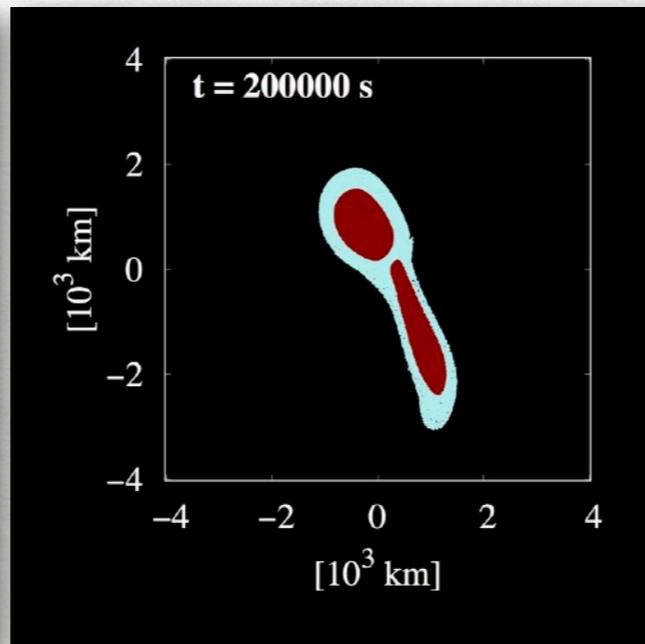
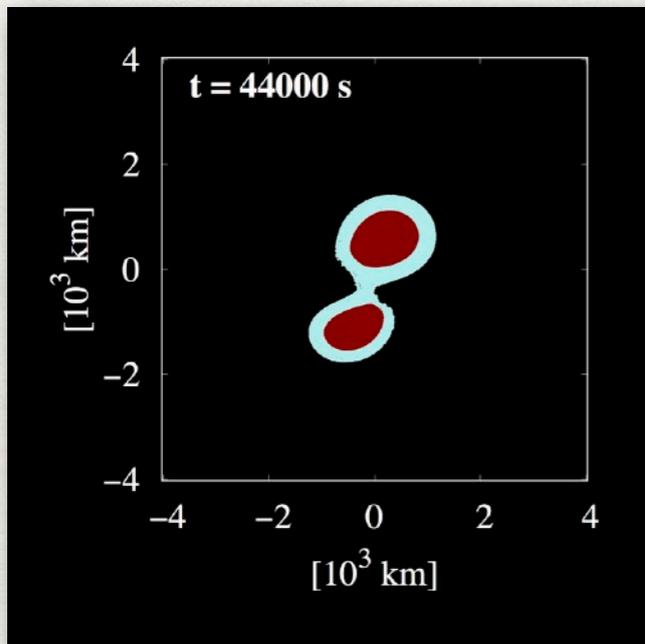
本研究の目的

SA, Hyodo, Genda (submitted)

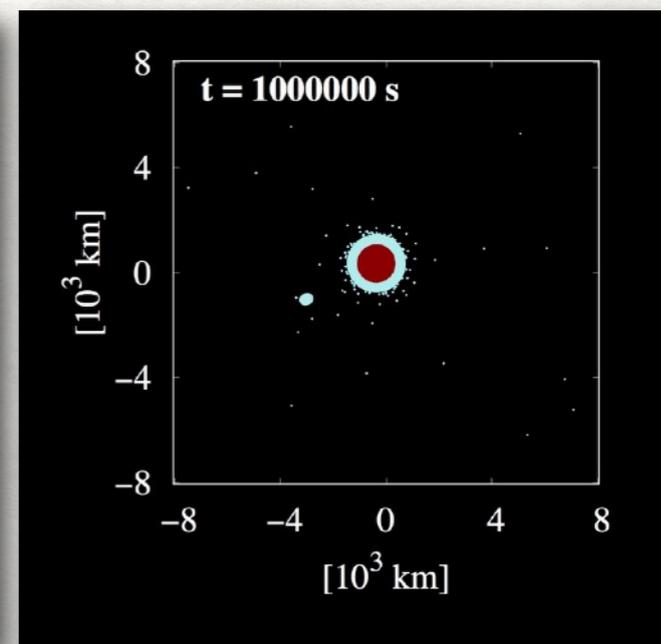
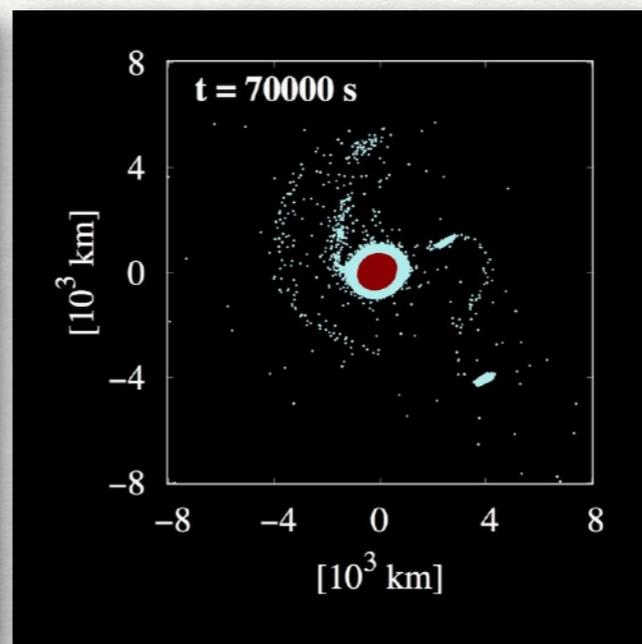
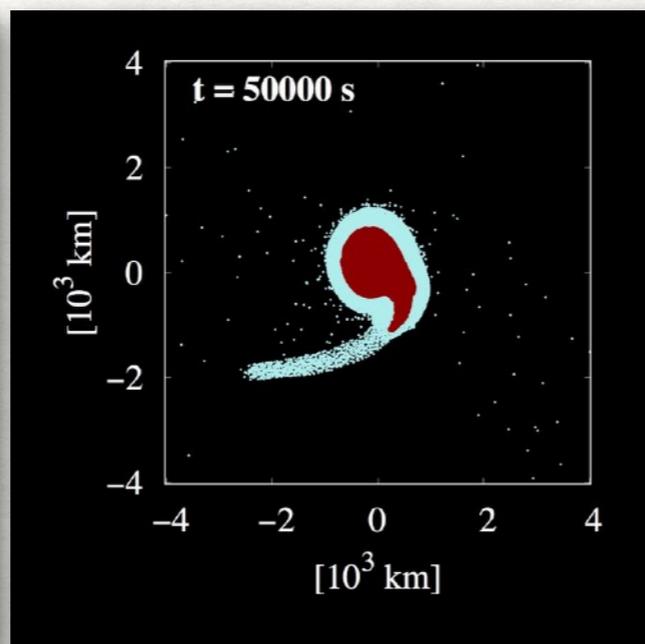
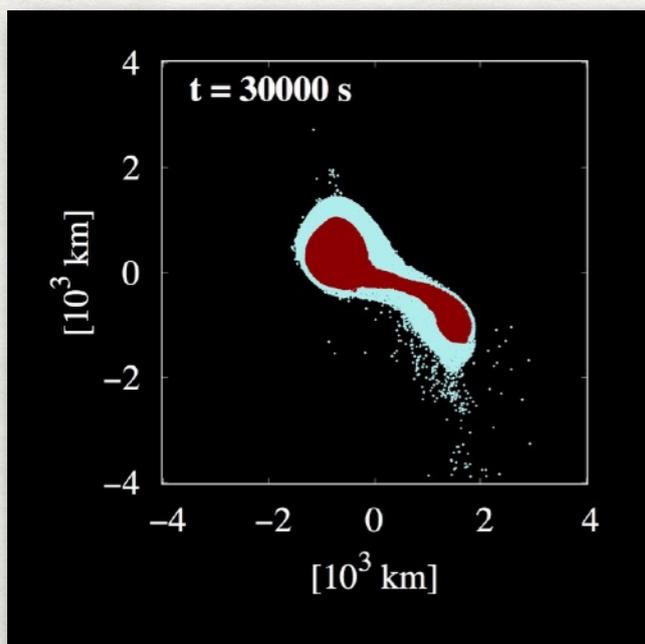
- 近年の観測により、直径が1000 kmを超える大型のTNOsは全て衛星を持つことが明らかになった
- Q. なぜ普遍的に衛星が存在するのか？
 - A. カロンが形成されたような**巨大衝突**を、他のTNOsも経験していても良い？衝突条件の違いで多様性も説明可能？
- SPH法による巨大衝突数値計算のパラメータサーベイと、**形成された衛星系に対して潮汐進化の準解析的計算を行い、観測と比較した（質量比、自転・公転周期、離心率など）**

Outcomes of Giant Impacts

$$M_{\text{tar}} = 4 \times 10^{21} \text{ kg}, M_{\text{imp}} = 2 \times 10^{21} \text{ kg}, v_{\text{imp}} = 1.05v_{\text{esc}}, \theta_{\text{imp}} = 75^\circ$$

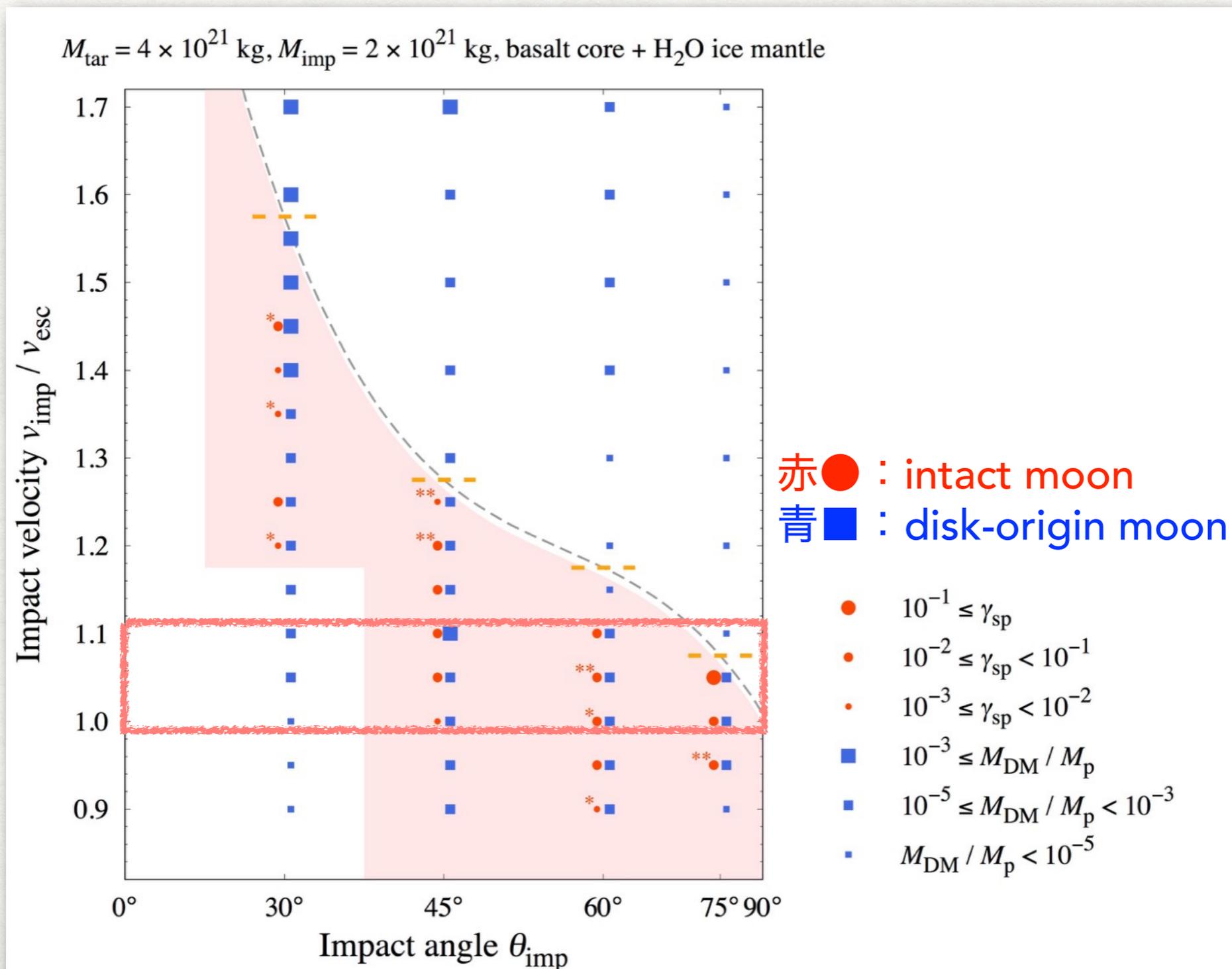


$$M_{\text{tar}} = 4 \times 10^{21} \text{ kg}, M_{\text{imp}} = 2 \times 10^{21} \text{ kg}, v_{\text{imp}} = 1.25v_{\text{esc}}, \theta_{\text{imp}} = 30^\circ$$



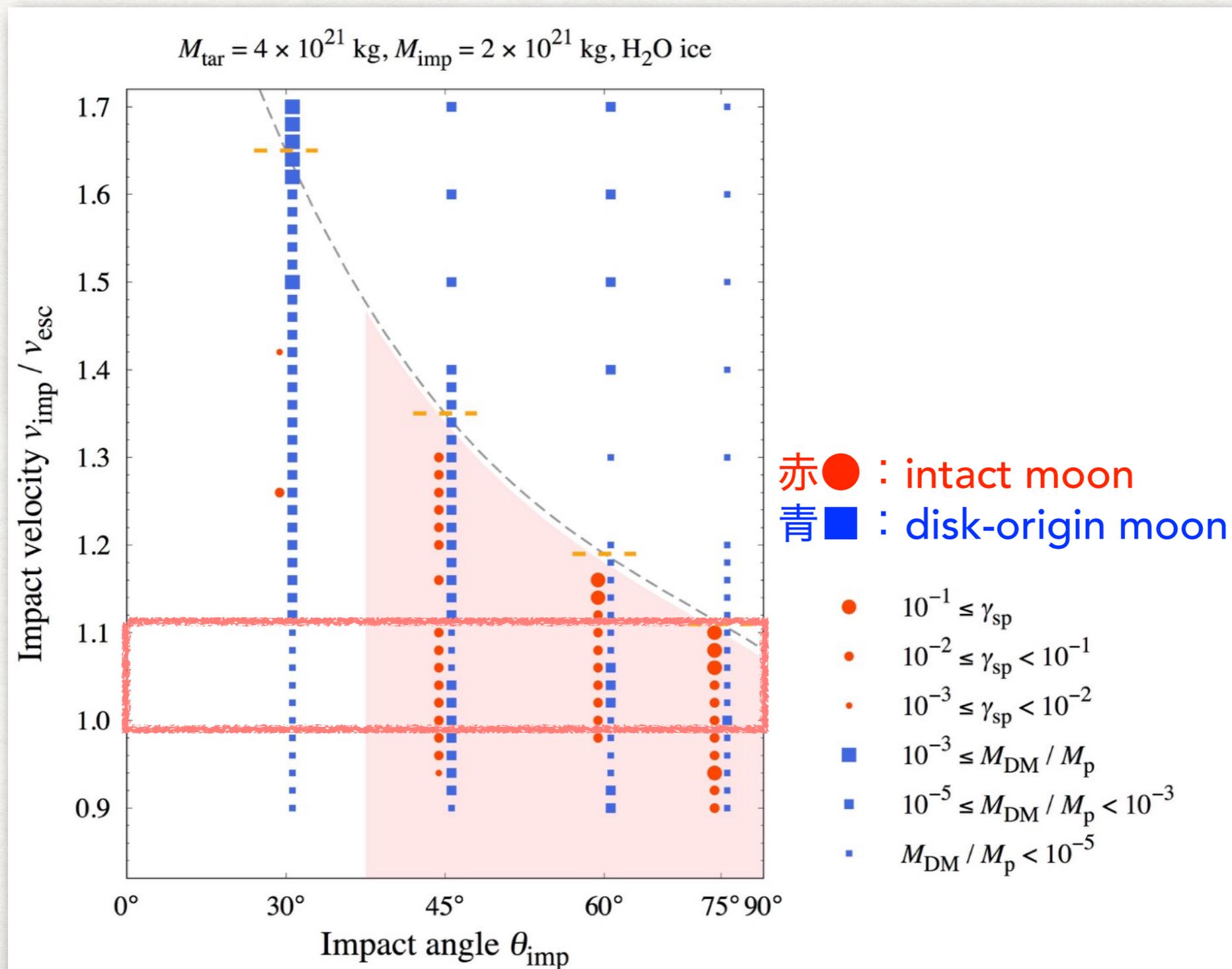
巨大衝突により形成される衛星のサイズ

岩石コア + 氷マントルの天体同士の場合



巨大衝突により形成される衛星のサイズ

氷未分化天体同士の場合



巨大衝突の計算結果まとめ

- 1000 kmサイズのTNOsの巨大衝突パラメータサーベイを行い、観測されているようなサイズの衛星が形成されるかどうか調べた
- 衝突角度が約45°以上のかすり衝突であれば観測されるサイズのIntact Moonが形成された（系の質量比 ~ 0.001–0.1）
- 衝突速度が脱出速度程度であったならば、衝突後に形成される円盤から形成される衛星は観測されるサイズより小さくなる
 - ただし、円盤質量（及び形成される衛星の質量）の見積もりには大きな不定性が存在（衛星質量 \propto 円盤質量の2乗; Hyodo+ 2015）
 - 今後、大粒子数での衝突計算&再集積のN体計算を実施したい

ここから本題：

形成された衛星の潮汐進化

大型TNOsの衛星系

本体と衛星の半径, 質量比, 自転・公転周期 P , 離心率 e

primary (R_p)	secondary (R_s)	M_s/M_p	$P_{\text{spin,p}}$ (h)	$P_{\text{spin,s}}$ (h)	P_{orb} (h)	e
Pluto (1187 km)	Charon (606 km)	1.2×10^{-1}	153.2	153.2	153.2	5×10^{-5}
Eris (1163 km)	Dysnomia (350 km)	3×10^{-2}	25.9	(unknown)	379.0	$< 4 \times 10^{-3}$
Haumea (816 km)	Hi'iaka (150 km)	4.5×10^{-3}	3.91	9.8	1187	5×10^{-2}
Makemake (715 km)	(no name) (90 km)	2×10^{-3}	7.77	(unknown)	300–16000	(unknown)
2007 OR ₁₀ (770 km)	(no name) (180 km)	1×10^{-2}	44.8	(unknown)	840–2400	(unknown)
Quaoar (535 km)	Weywot (40 km)	4×10^{-4}	8.84	(unknown)	289.0	~ 0.15

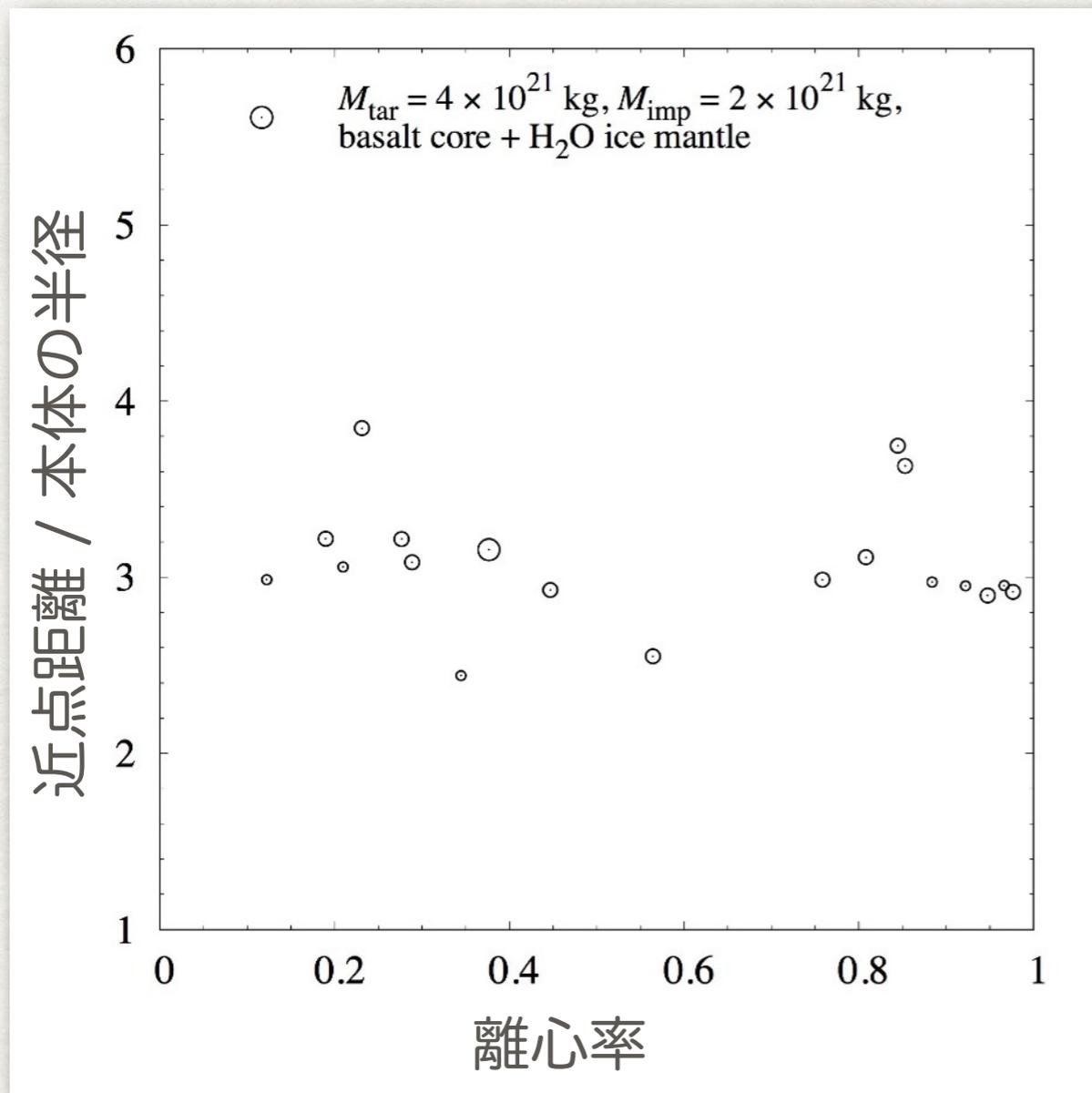
観測されている衛星の離心率は小さい ($e < 0.1$)

衛星の自転周期については観測が少ない

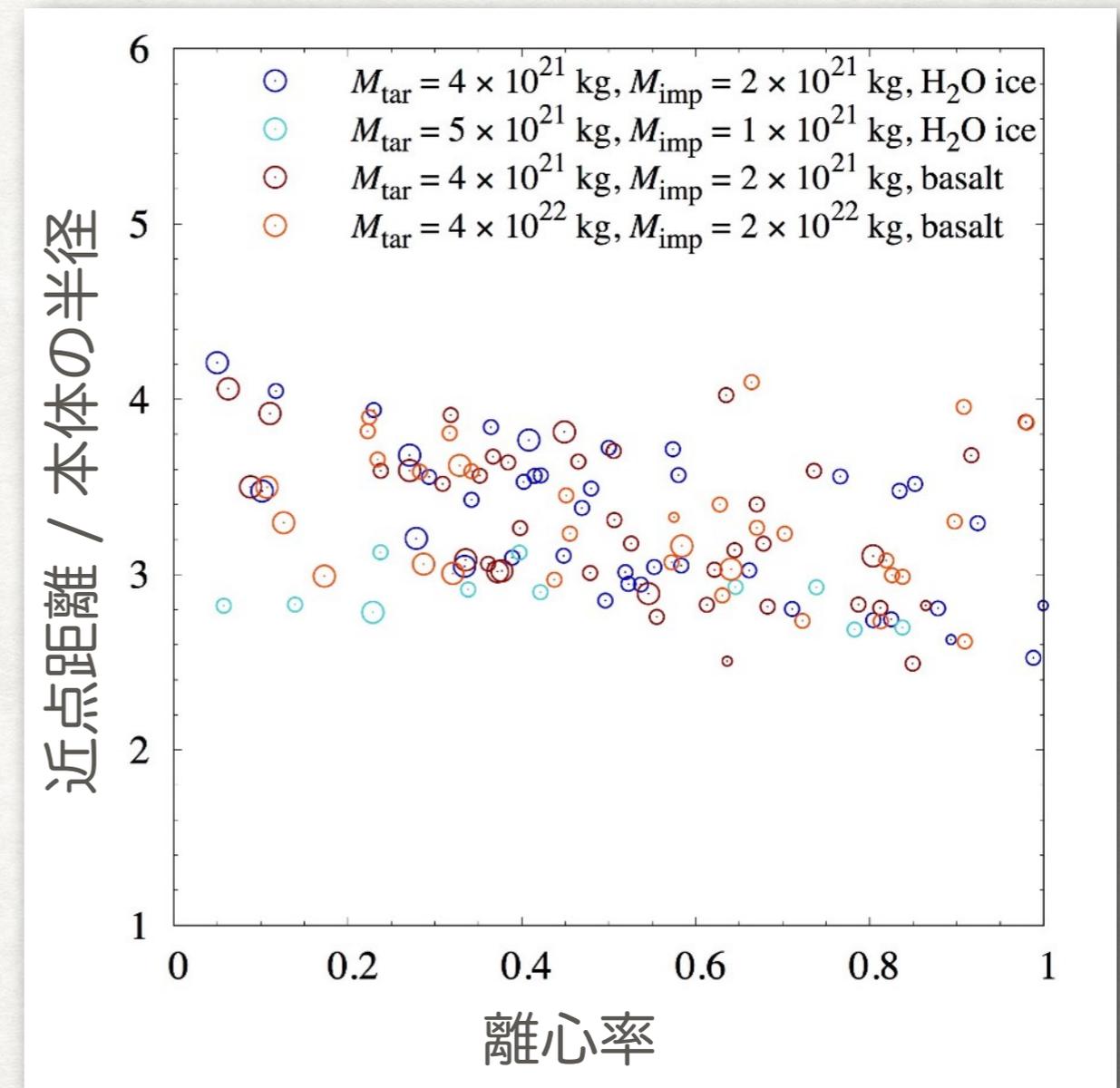
(ただし、衛星が本体の近傍で形成され、その後潮汐によって外側に移動したならば衛星の自転と公転は同期するはず; Hastings+ 2016)

INTACT MOONたちはエキセントリック

分化天体



未分化天体



形成直後の衛星の離心率： [0, 1) の範囲で幅広くばらつく（離心率が大きい）、

衛星のサイズ（丸の大きさ）にあまり依存しない

衛星の近点距離： 3-4 R_p 程度、こちらも衛星のサイズにあまり依存しない

潮汐進化の基礎方程式

本体・衛星の自転角速度 Ω_p, Ω_s , 軌道長半径 a , 離心率 e

$$-\frac{1}{n} \frac{d\Omega_p}{dt} = \frac{15n}{4} \frac{M_s^2}{(M_p + M_s) M_p} \left(\frac{R_p}{a}\right)^3 \frac{k_{2,p}}{Q_p} \sum_{i=-3}^{+3} E_{2,i}^2(e) \operatorname{sgn}[2\Omega_p - (2-i)n],$$

$$-\frac{1}{n} \frac{d\Omega_s}{dt} = \frac{15n}{4} \frac{M_p^2}{(M_p + M_s) M_s} \left(\frac{R_s}{a}\right)^3 \frac{k_{2,s}}{Q_s} \sum_{i=-3}^{+3} E_{2,i}^2(e) \operatorname{sgn}[2\Omega_s - (2-i)n],$$

$$\frac{1}{a} \frac{da}{dt} = \frac{3n}{2} \frac{M_s}{M_p} \left(\frac{R_p}{a}\right)^5 \frac{k_{2,p}}{Q_p} \sum_{i=-3}^{+3} (2-i) E_{2,i}^2(e) \operatorname{sgn}[2\Omega_p - (2-i)n]$$

$$+ \frac{3n}{2} \frac{M_p}{M_s} \left(\frac{R_s}{a}\right)^5 \frac{k_{2,s}}{Q_s} \sum_{i=-3}^{+3} (2-i) E_{2,i}^2(e) \operatorname{sgn}[2\Omega_s - (2-i)n],$$

$$-\frac{1}{e} \frac{de}{dt} = \frac{3n}{4e^2} \frac{M_s}{M_p} \left(\frac{R_p}{a}\right)^5 \frac{k_{2,p}}{Q_p} \sum_{i=-3}^{+3} \left[2\sqrt{1-e^2} - (2-1)(1-e^2)\right] E_{2,i}^2(e) \operatorname{sgn}[2\Omega_p - (2-i)n]$$

$$+ \frac{3n}{4e^2} \frac{M_p}{M_s} \left(\frac{R_s}{a}\right)^5 \frac{k_{2,s}}{Q_s} \sum_{i=-3}^{+3} \left[2\sqrt{1-e^2} - (2-1)(1-e^2)\right] E_{2,i}^2(e) \operatorname{sgn}[2\Omega_s - (2-i)n],$$

平均運動 n , ラブ数 k_2 , 散逸係数 $Q = 100$, the eccentricity function $E_{2,i}(e)$

潮汐進化の状態依存性

剛性 (rigidity) μ に対するラブ数 k_2 の依存性

$$k_{2,i} = \frac{3}{2} \left(1 + \frac{38\pi}{3} \frac{\mu_i R_i^4}{GM_i^2} \right)^{-1},$$

ラブ数 k_2 は天体の剛性 μ に依存

天体が固化している場合： $k_2 \propto R^2$

天体が溶融している場合： $k_2 \sim \text{const.}$

衛星の自転と公転が同期した後の離心率進化

$$\frac{1}{e} \frac{de}{dt} \simeq \frac{33n}{4} \frac{M_s}{M_p} \left(\frac{R_p}{a} \right)^5 \frac{k_{2,p}}{Q_p} \left(1 - \frac{25}{22} A \right),$$

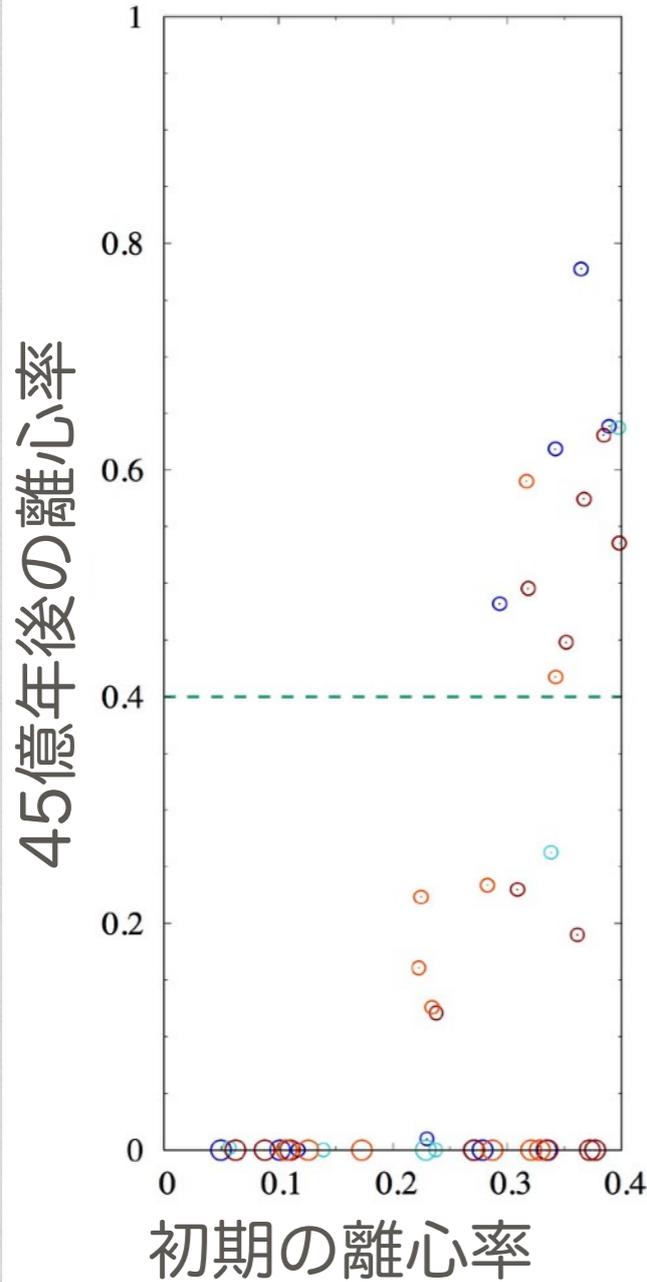
$$A = \frac{k_{2,s}}{k_{2,p}} \left(\frac{Q_s}{Q_p} \right)^{-1} \left(\frac{M_s}{M_p} \right)^{-2} \left(\frac{R_s}{R_p} \right)^5,$$

衛星が固化していると $e \uparrow$, 溶融していると $e \downarrow$

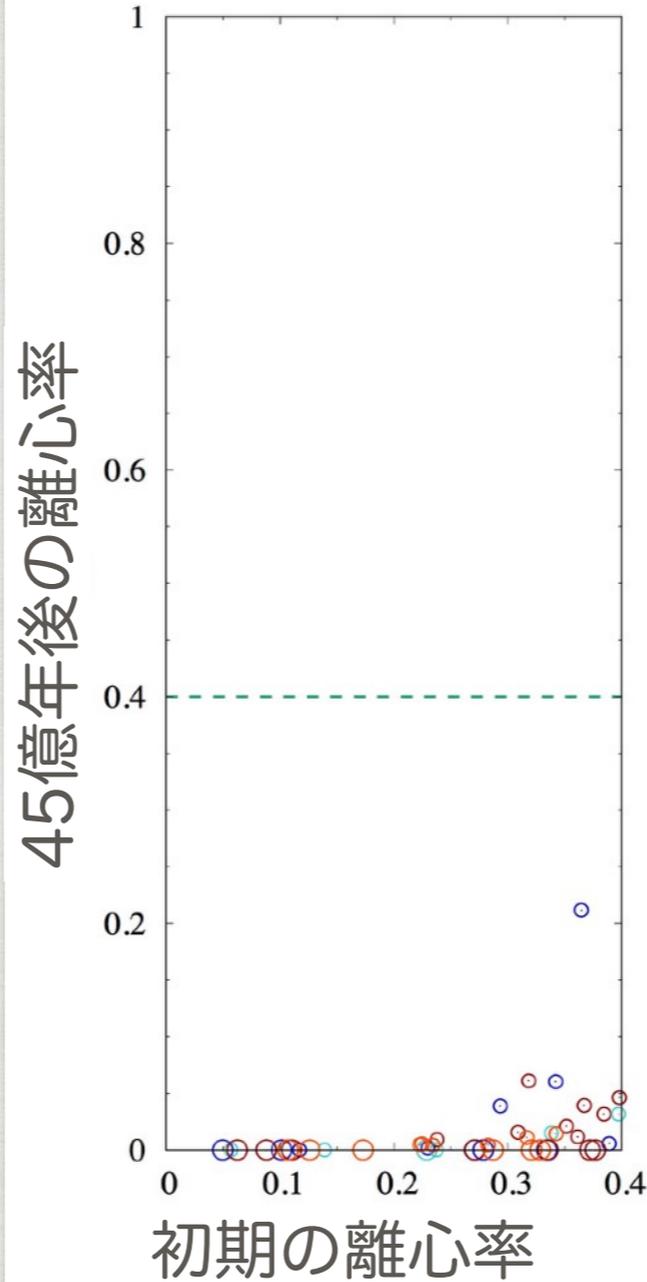
平均運動 n , ラブ数 k_2 , 散逸係数 $Q = 100$, the eccentricity function $E_{2,i}(e)$

衛星の離心率進化

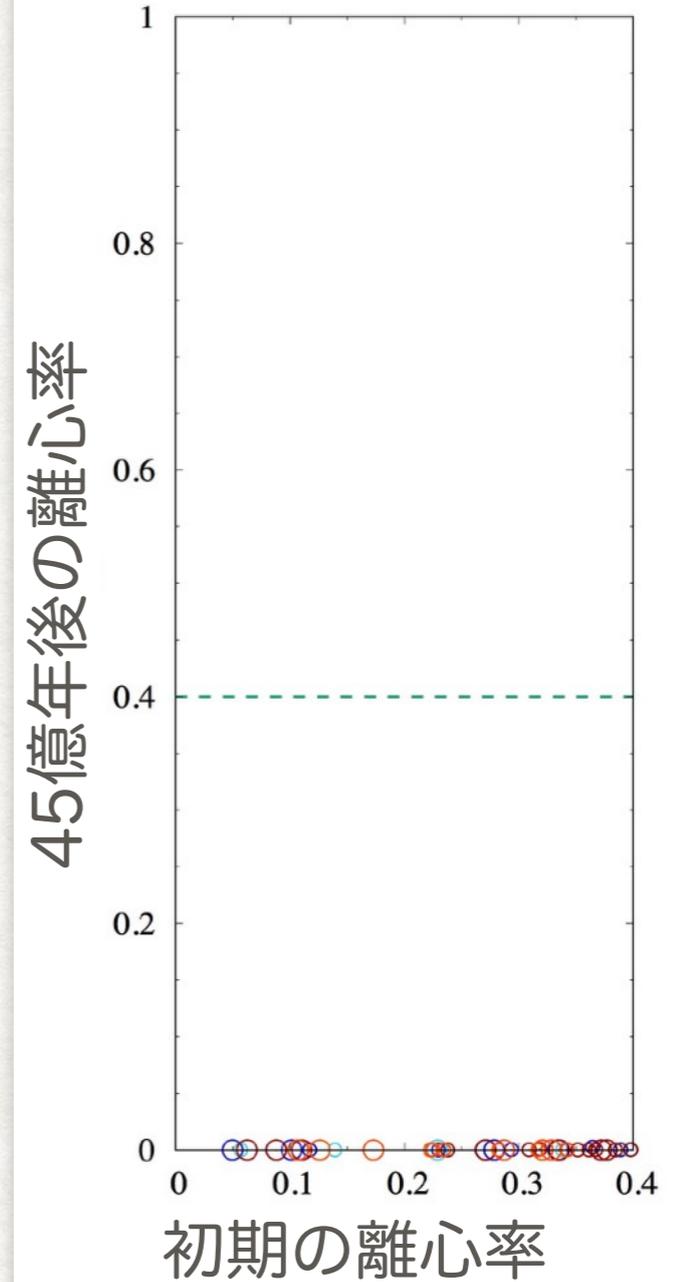
初期 10^3 年のみ溶融



初期 10^4 年のみ溶融



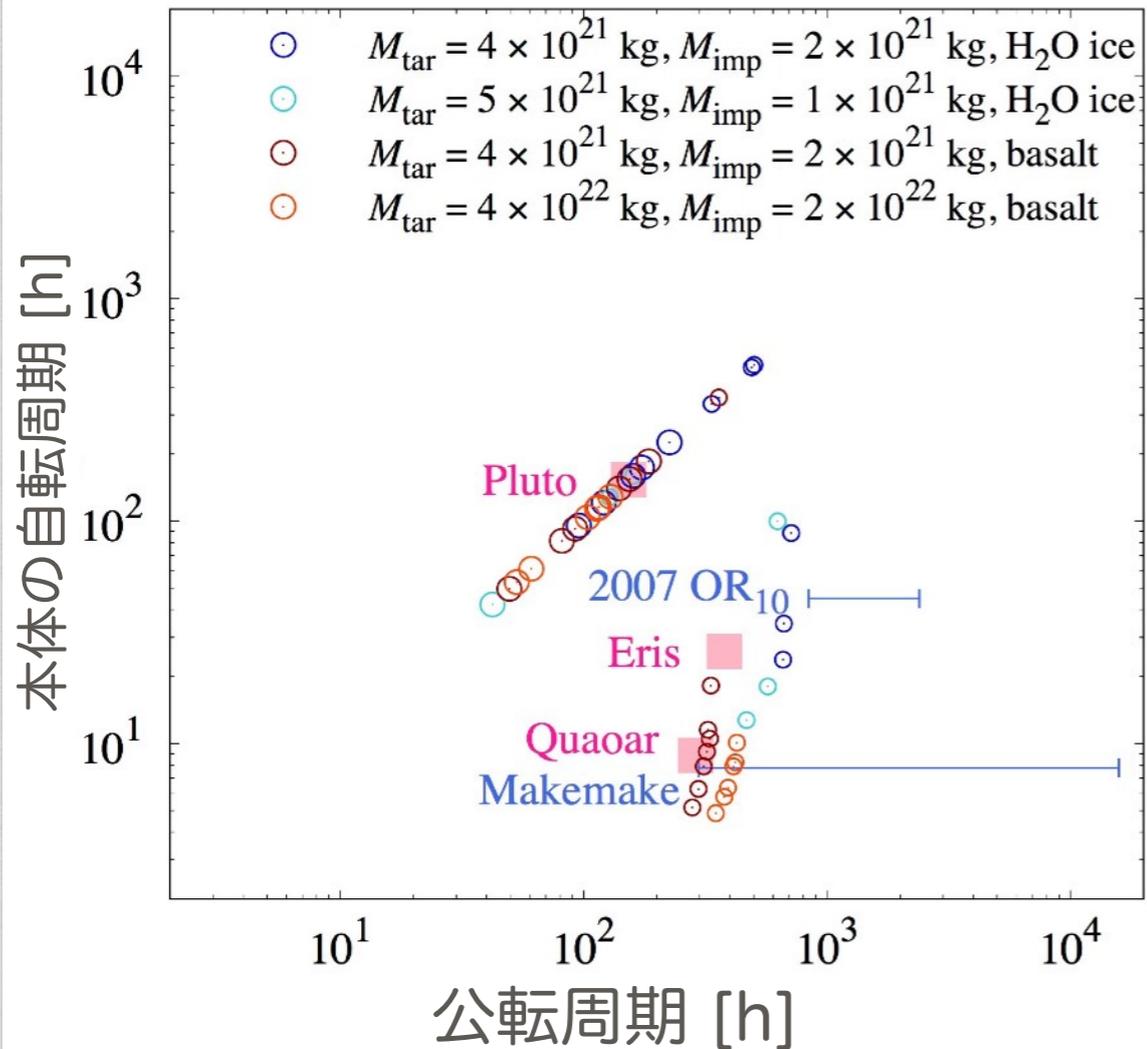
初期 10^6 年のみ溶融



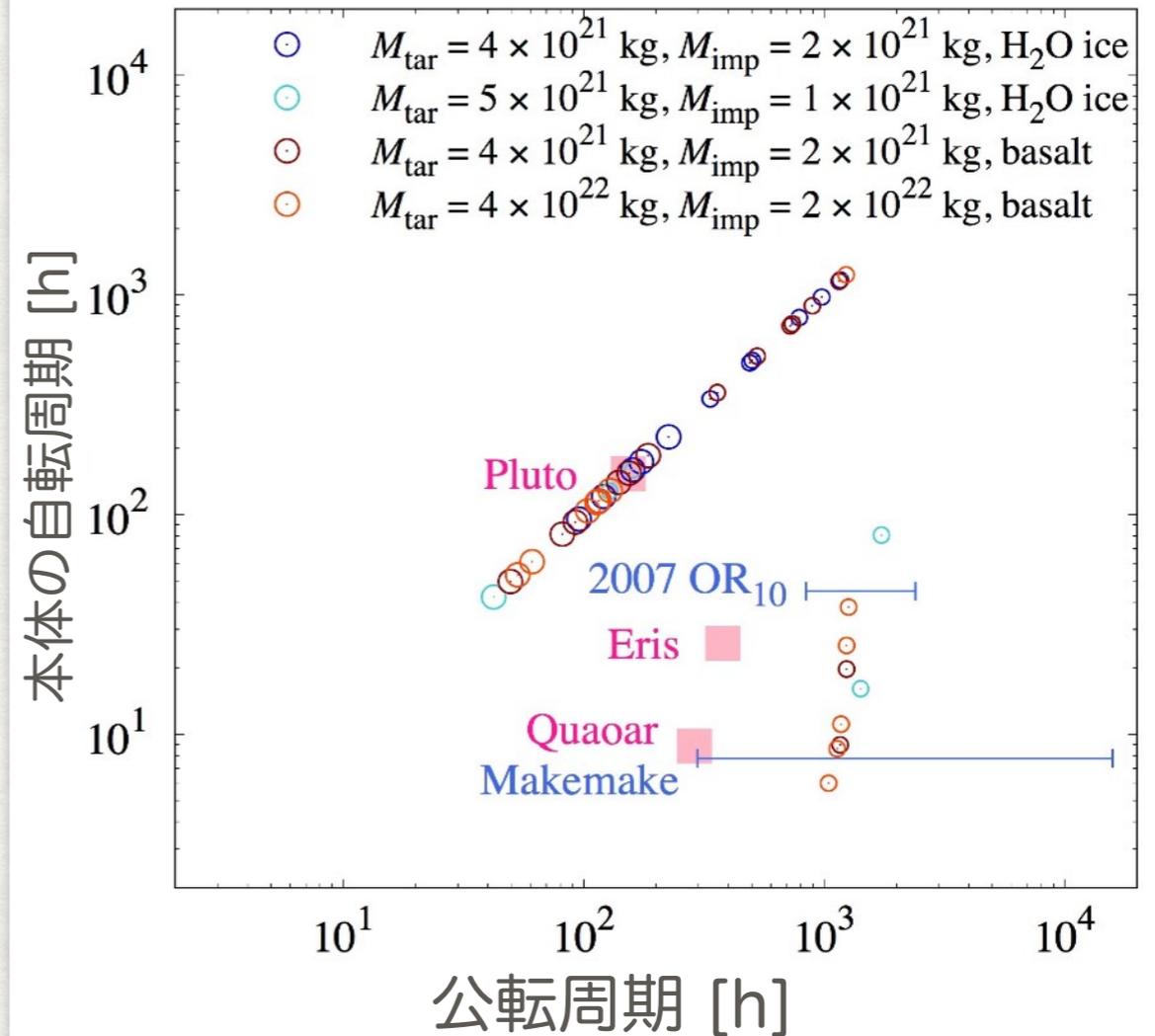
小さな離心率：初期に 10^4 年以上溶融していたことを示唆

自転・公転周期の分布

初期 10^6 年のみ溶融



45億年ずっと溶融



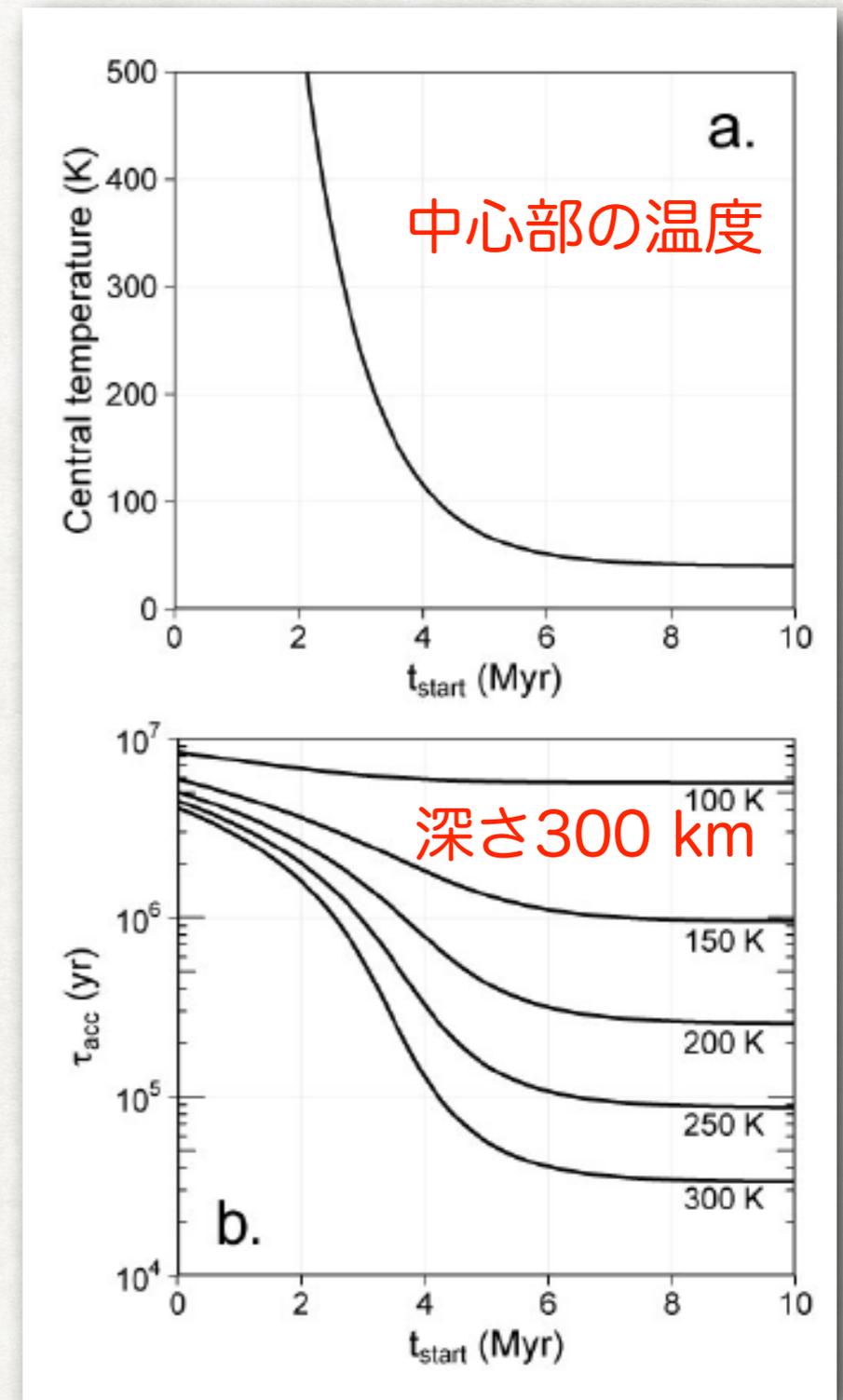
溶融していると潮汐進化のタイムスケールが短くなる：

1000 kmサイズの天体の場合、45億年ずっと溶融していると観測と合わない

議論：TNOsの形成時期、
および巨大衝突の発生時期

いかにして衛星を溶融させるのか？

- ・ 巨大衝突によって完全に溶融させるのは難しい（部分溶融は可能）
- ・ 高離心率の衛星の潮汐散逸も厳しい
- ・ どちらの場合も単位質量あたりの内部エネルギー $\uparrow \sim GM_s / R_p$
- ・ 巨大衝突以前に溶融させるためにはCAI形成後数百万年で内部に熱を保持できるサイズの天体に集積する必要（集積前の物質は低温だと仮定）



衝突のタイムスケール

衛星形成に適した低速衝突がLHBより前に何度も発生する

- 無限遠方での相対速度 v_{rel} が $\sim 10^{-2} v_{\text{esc}}$ より小さい場合は、巨大衝突のタイムスケールは $\sim 10-100$ Myr になり得る？

- $\sim 10^2 \text{ km} \rightarrow 10^3 \text{ km}$ も $\sim \text{Myr}$ で成長できる

- N_e : TNOsの個数,
 R_e : TNOsの半径,

$$f = 1 + (v_{\text{esc}}/v_{\text{rel}})^2$$

- 太陽周りの離心率が $\sim 10^{-3}$ 程度と同義

$$\begin{aligned} \tau_{\text{col}} &\approx \frac{2\pi a \Delta a H}{N_e^2 \pi (R_e + R_e)^2 v_{\text{rel}} \left[1 + \left(\frac{v_{\text{esc}}}{v_{\text{rel}}} \right)^2 \right]} \\ &\sim 10^9 \text{ years} \left(\frac{T_{\text{orb}}}{250 \text{ years}} \right) \left(\frac{50}{N_e} \right)^2 \\ &\quad \times \left(\frac{10^3 \text{ km}}{R_e} \right)^2 \left(\frac{10^2}{f} \right) \end{aligned}$$

Canup (2005)

100 kmサイズの微惑星の形成時間

- ・ 衝突合体成長を考えるととても時間がかかる
 - ・ そもそも落下してしまうかも (Weidenschilling 1977)
- ・ **ペブル集積**なら数百万年で100 kmサイズの微惑星を形成 (e.g., Johansen+ 2012, 2015)
- ・ **ダストクランプの重力崩壊**の可能性も (Nesvorny+ 2010)
 - ・ 100 kmサイズのKuiper Belt Binaryの形成も説明可能

まとめ

- 巨大衝突の数値計算とその後の潮汐進化の準解析的な計算を行い、TNOsの衛星系の特徴を再現できるかどうか調べた
- 巨大衝突によって形成されるIntact Moonの質量：
本体の1/10から1/1000程度で、実際の衛星系とほぼ一致
- 観測される離心率の小さな衛星系を作るためには、形成後少なくとも 10^4 年程度は衛星が溶融した状態で潮汐進化？
- 1000 kmサイズのTNOsは太陽系形成直後 ($\sim 10-100$ Myr) に形成、衛星を形成する巨大衝突も頻繁に発生？

補足スライド

形成される衛星の密度

