



*Long-term dynamical evolution of Haumea's collisional
family in the Kuiper belt*

カイパーベルトのハウメア衝突天体族の長期軌道進化

Patryk Sofia Lykawka (神戸大学), Jonathan Horner (オープン大学・英国)
and
Akiko M. Nakamura, Tadashi Mukai (神戸大学)

時間

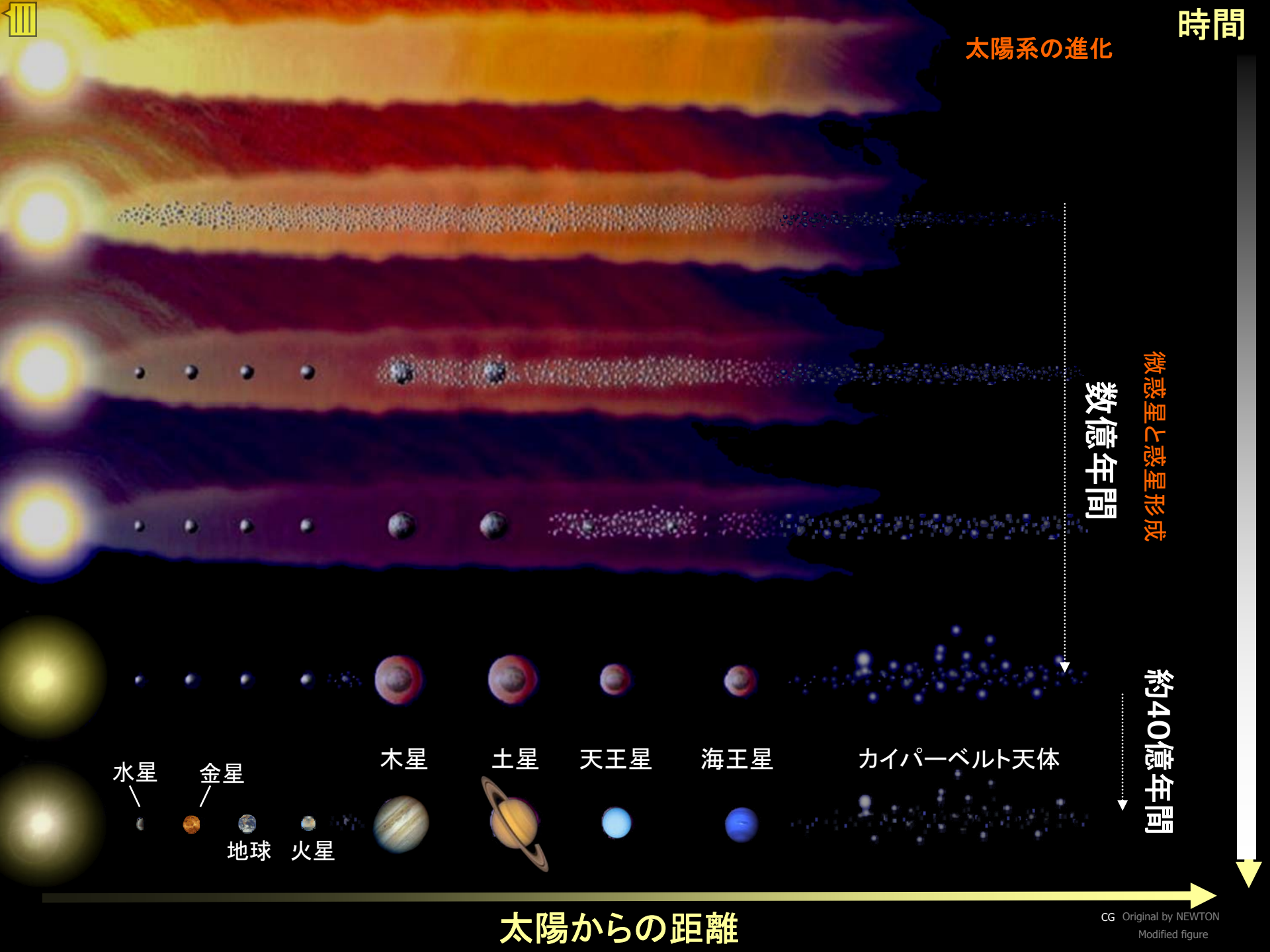
太陽系の進化

数億年間
微惑星と惑星形成

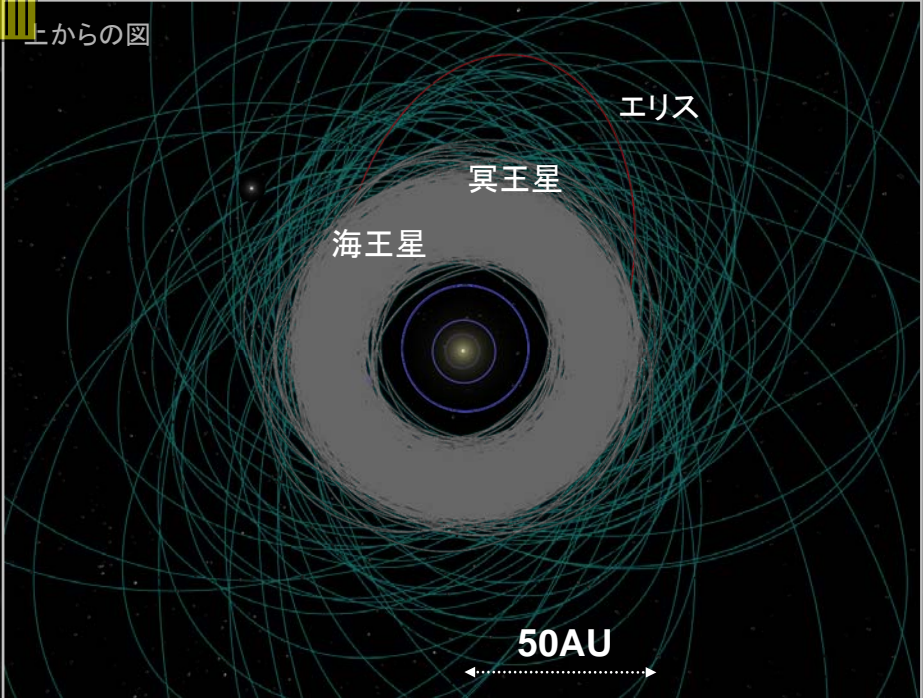
約40億年間

太陽からの距離

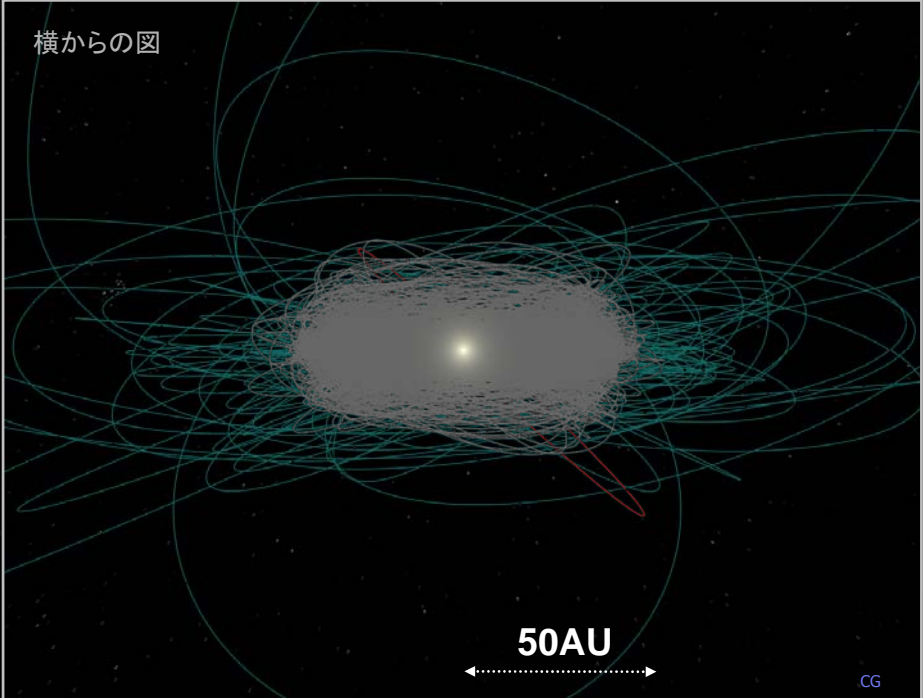
CG Original by NEWTON
Modified figure



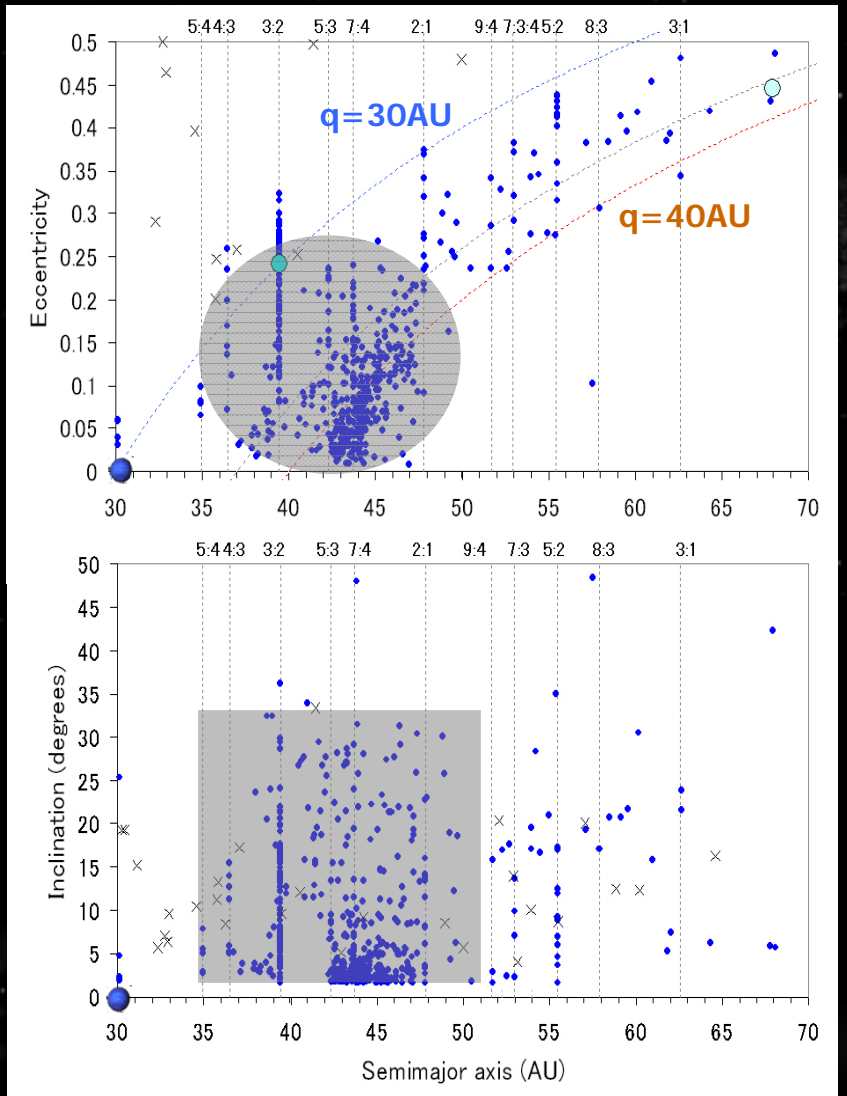
上からの図



横からの図



現在の観測データ



(Lowell Observatory database)

● = 海王星 ● = 冥王星 ● = エリス

ハウメア(元2003 EL₆₁)とは？

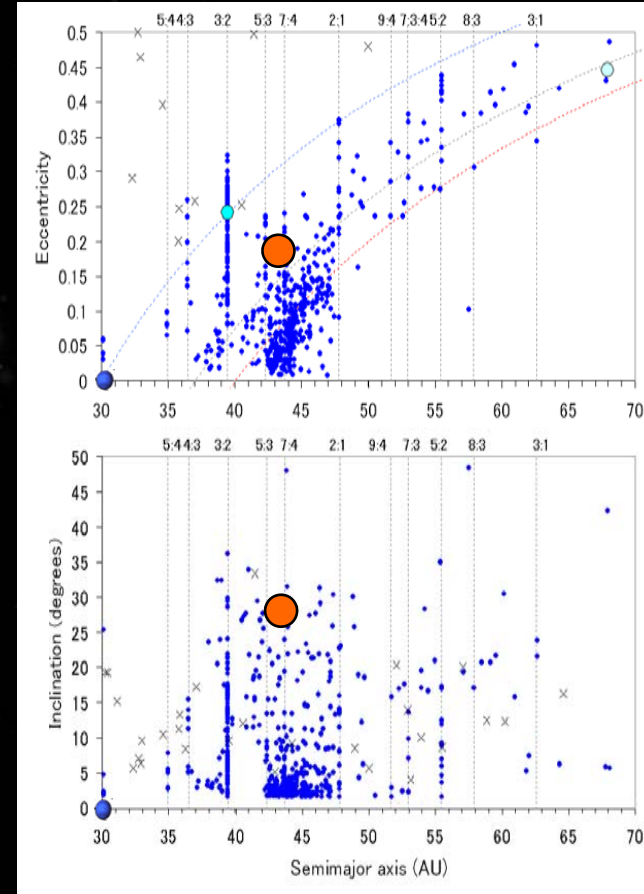
軌道要素: $a=43.13\text{AU}$ $e=0.195$ $i=28.2\text{deg}$ (海王星の12:7
平均運動共鳴に入っている)

(Lykawka & Mukai 2007 b; Ragozzine & Brown 2007)

(M. Brown's HP)

太陽系外縁天体の中で大きい天体: $\sim 1500\text{km}$ $(4.2 \pm 0.1) \times 10^{21} \text{kg}$
(冥王星の質量として約三分の一・準惑星と認められた)

Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



(Lowell Observatory database)

ハウメア衝突天体族・モチヴェーション

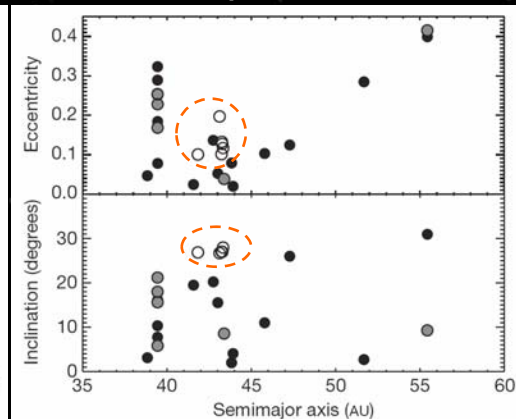
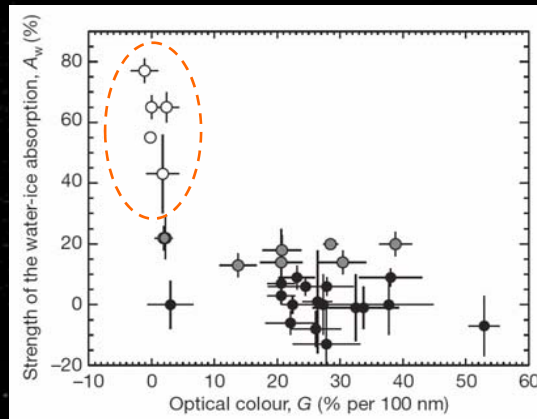
(Brown et al. 2007; Ragozzine & Brown 2007; Pinilla-Alonso et al. 2008 a,b; Levison et al. 2008)

ハウメア

- 楕円体の形状 (“卵円”)
- 衛星を持つ(2個)
- 短い自転周期(~3.9h)
- 高い密度(2.6-3.4gcm⁻³)

ハウメア + 天体族

- peculiarなスペクトラ (C-depleted; H₂O-rich)
- よく似た軌道要素 (a=41.8-44.3AU e=0.101-0.134 i=27-28deg)



→ 巨大衝突の証拠 ・ カイパーベルトの初衝突天体族

原始太陽系で巨大天体の2個衝突を経験 → ハウメア (一番大きい破片) + 衝突天体族 (他の放出された破片 ・ ダストサイズから~数100キロまで)

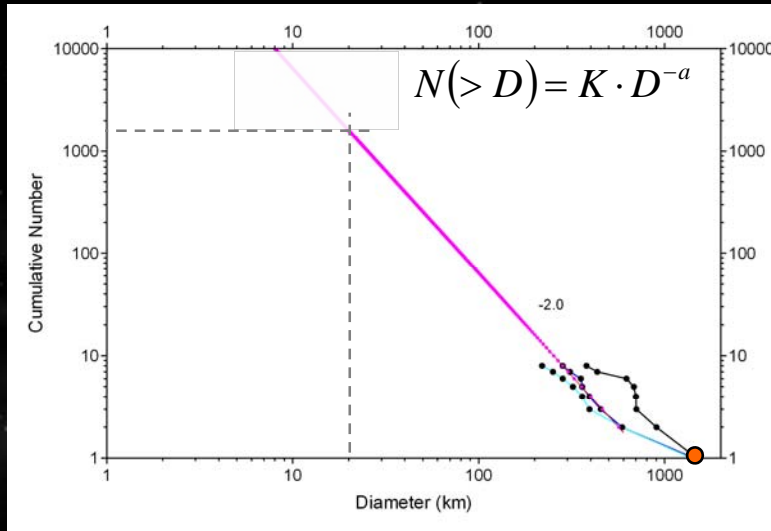
現在、ハウメアを含めて衝突天体族は8個存在する (Schaller & Brown 2008; Pinilla-Alonso et al. 2007; 2008 a,b)

重要な点

- どのようにハウメア天体族が長期軌道進化するのか? カイパーベルトに残る天体は何割か? 力学的に他の分類に入る可能性とは? (e.g., 海王星との複数共鳴の捕獲)
- 安定・不安定な軌道に対して今後の観測予想が出来る
- カイパーベルトの起源と進化が天体衝突に及ぼした影響とは?



モデル計算



(Benz & Asphaug 1999; Michel et al. 2002;2004)

- CM軌道要素に対するモデルハウメア天体族の初期条件:

ハウメアの放出速度: $\sim 100\text{m/s}$

平均放出速度: 200, 300m/s

破片のサイズによって放出速度スロープ: small (-0.025), big (-0.25)

放出速度Weibull分布仮定 (isotropic方向)

- N天体シミュレーション: **4GP**. 4つのガス惑星の重力 (MERCURYコード Chambers 1999)

特別なラン: **4GP+1MB**. 4惑星+ハウメア、**4GP+5MB**. 4惑星+ハウメア+さらに重い天体族の4個、**4GP+5MB+P+E**. 4惑星+ハウメア+天体族の4個+冥王星+エリス

- ハウメア天体族の8天体からサイズ分布と天体族のCM軌道要素(衝突の初期位置と速度)
(Ragozzine & Brown 2007)

- 各ラン1600天体 ($D > 20\text{km}$)

- 40億年間



(Zappala et al. 2002)

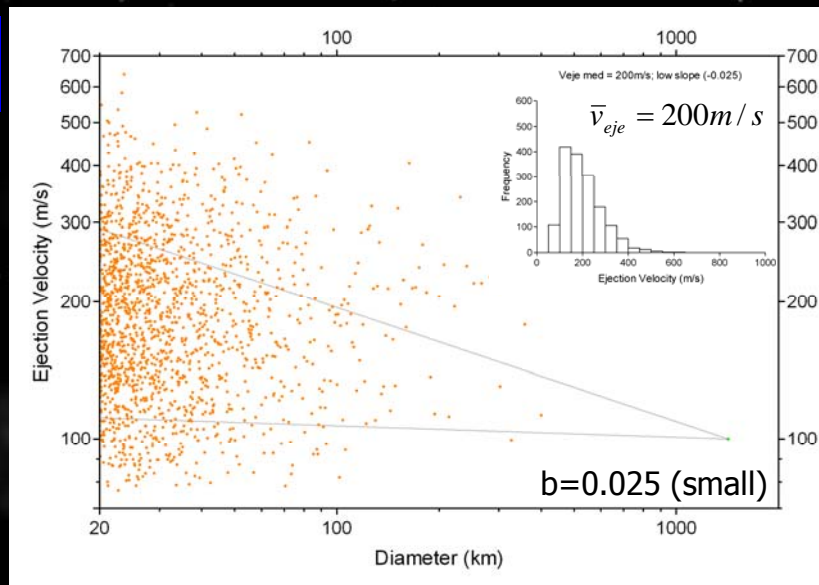
$b=0\sim 0.5$

$$v_{eje} \propto D^{-b}$$

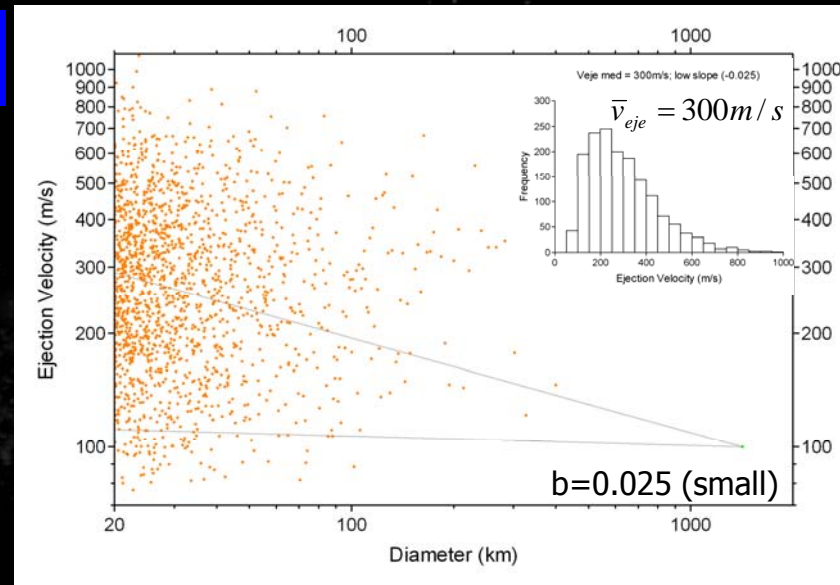
モデル衝突天体族の初期放出速度分布

$$v_{eje} \propto D^{-b}$$

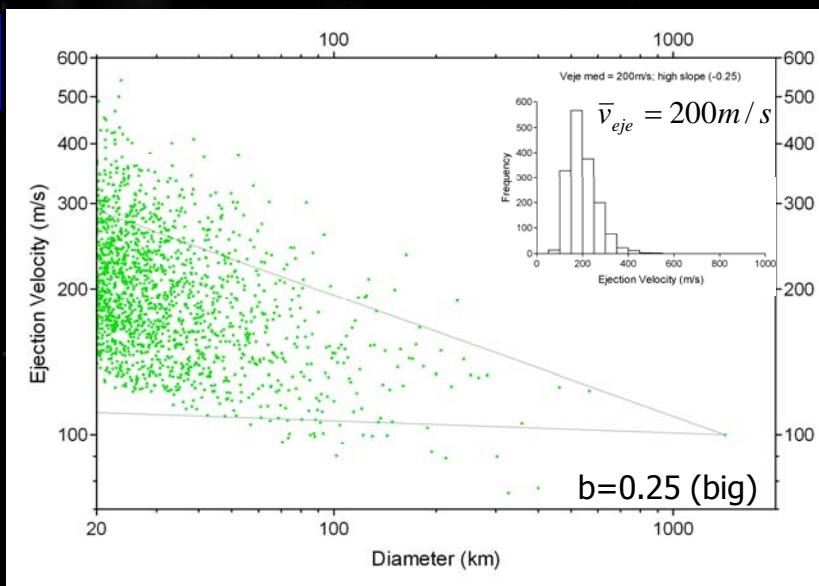
1



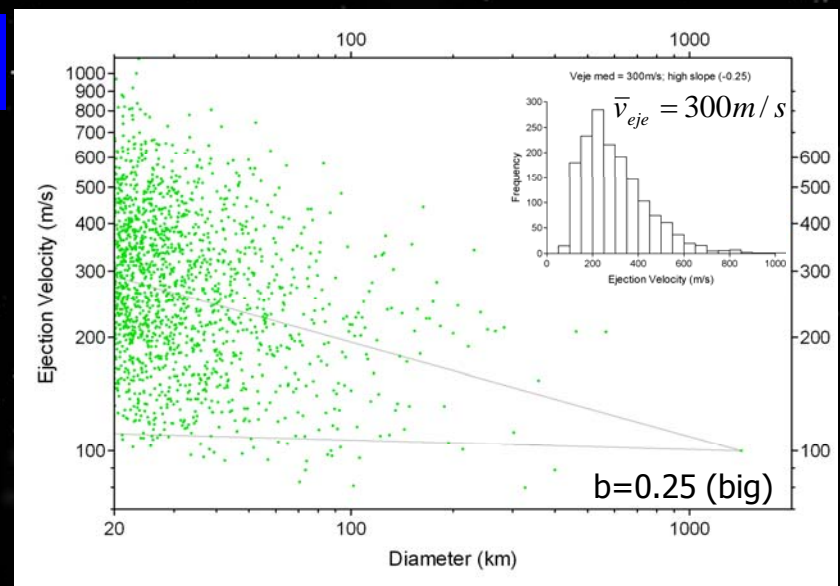
2



3



4

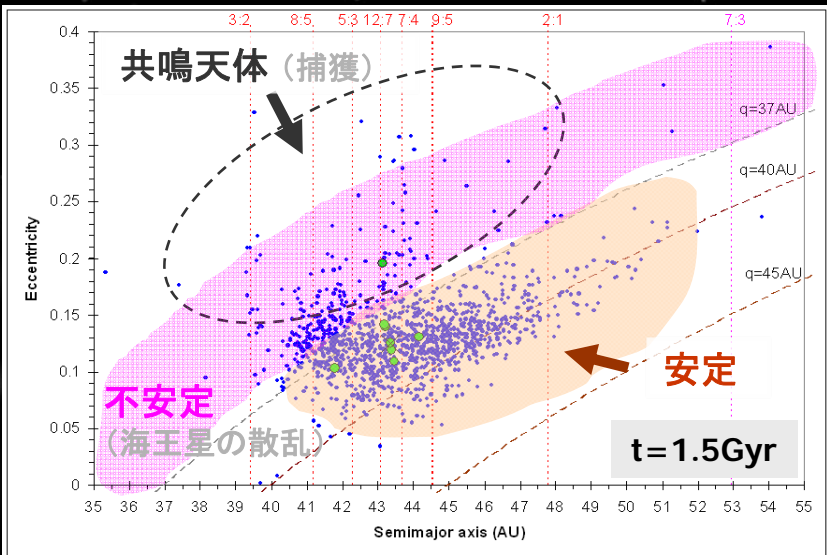


全体結果：衝突族の軌道分布 $a \times e$

$$v_{eje} \propto D^{-b}$$

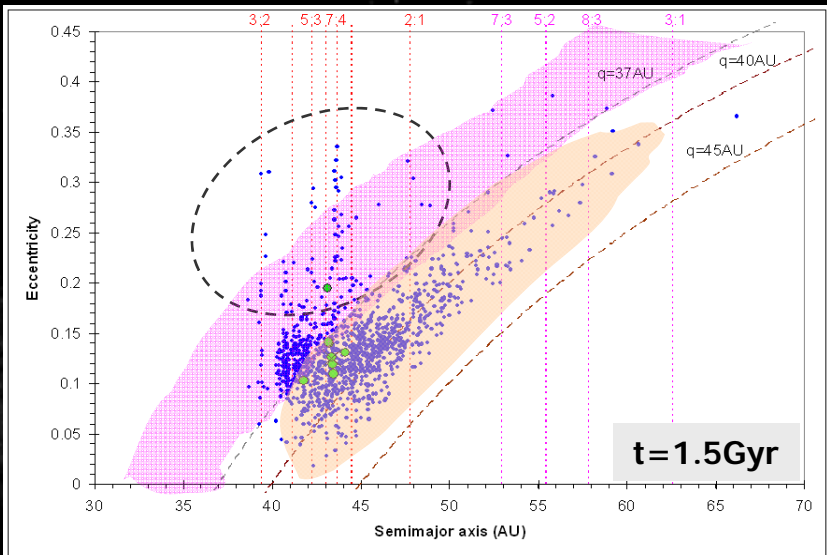
1

V_{med}
200m/s
Slope b
small



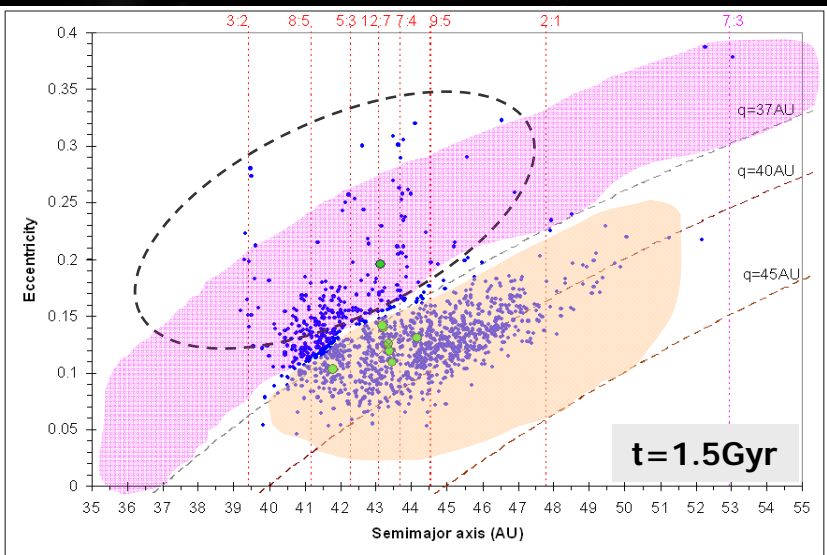
2

V_{med}
300m/s
Slope b
small



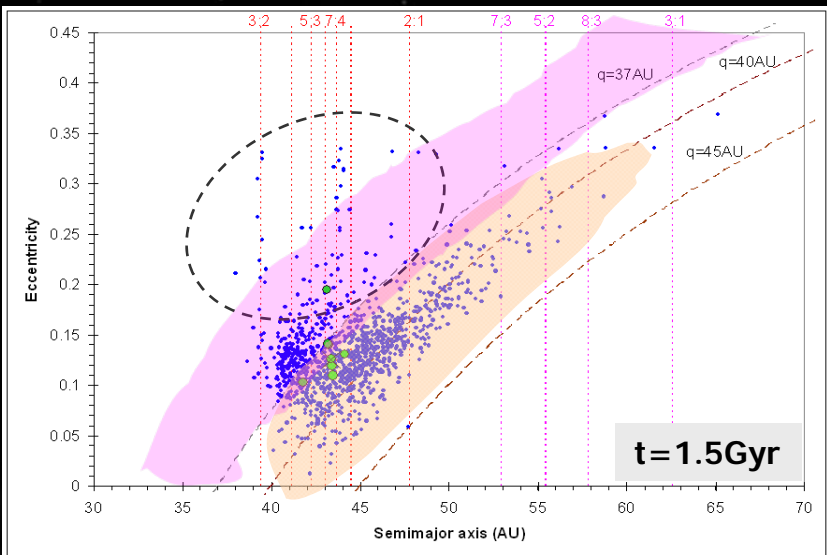
3

V_{med}
200m/s
Slope b
big



4

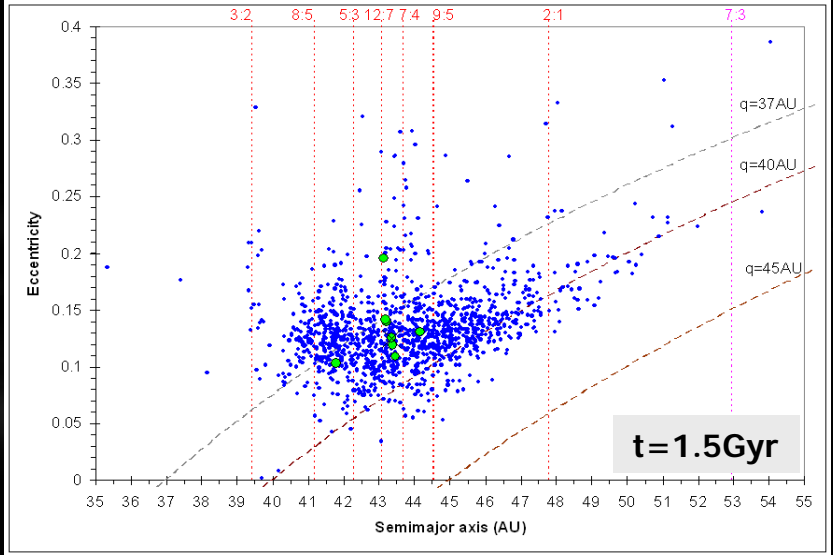
V_{med}
300m/s
Slope b
big



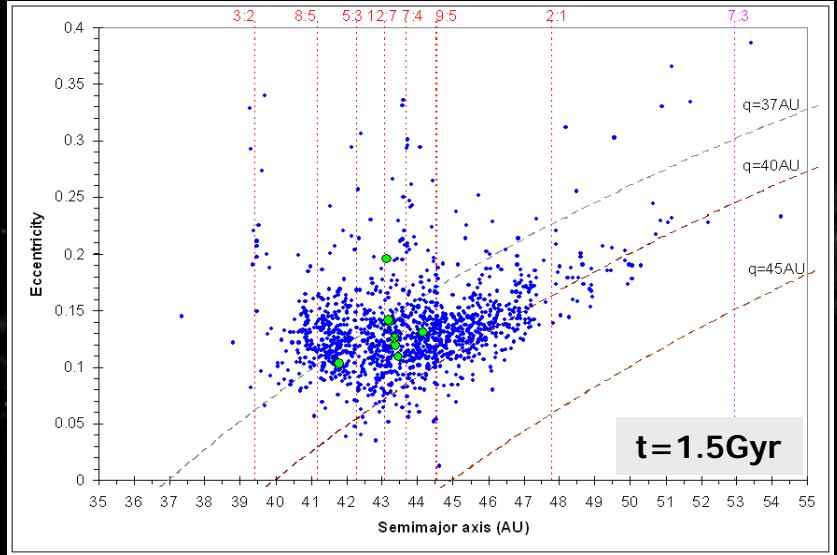
● = 観測された衝突族天体 ● = モデル衝突族天体

重力を持つ天体の変化について $a \times e$ Vmed 200m/s Slope b small

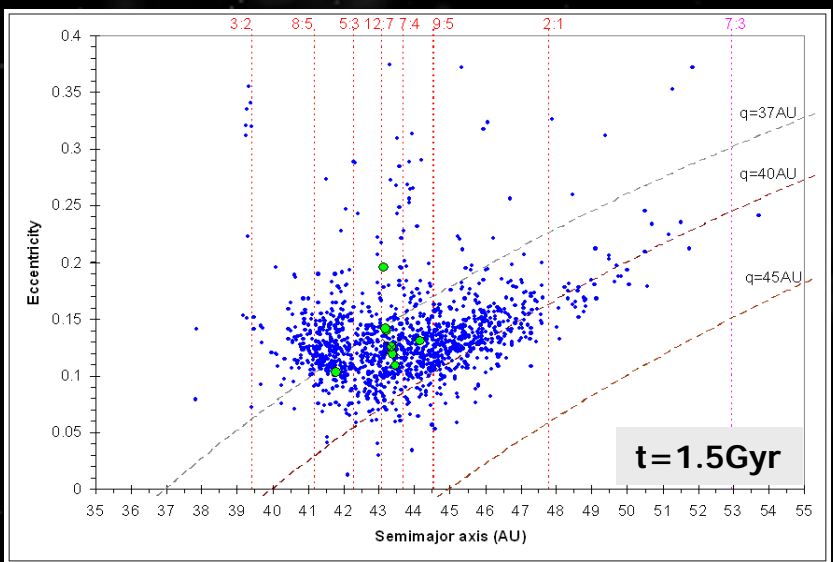
4GP (4 giant planets only)



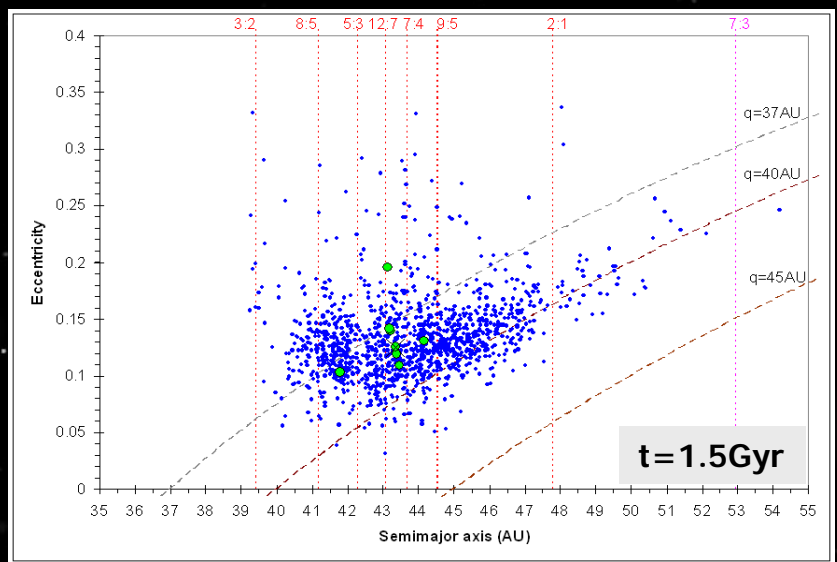
4GP+Haumea



4GP+Haumea+4 most massive members



4GP+Haumea+4MM members+Pluto+Eris

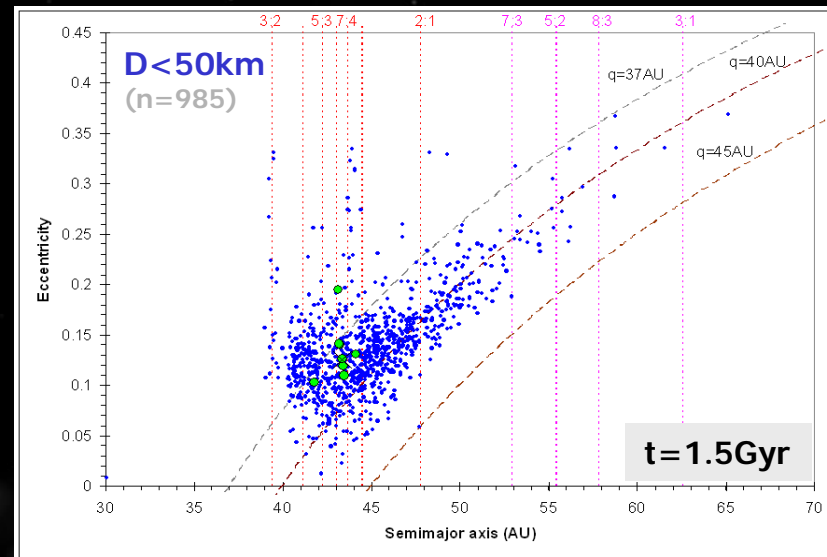
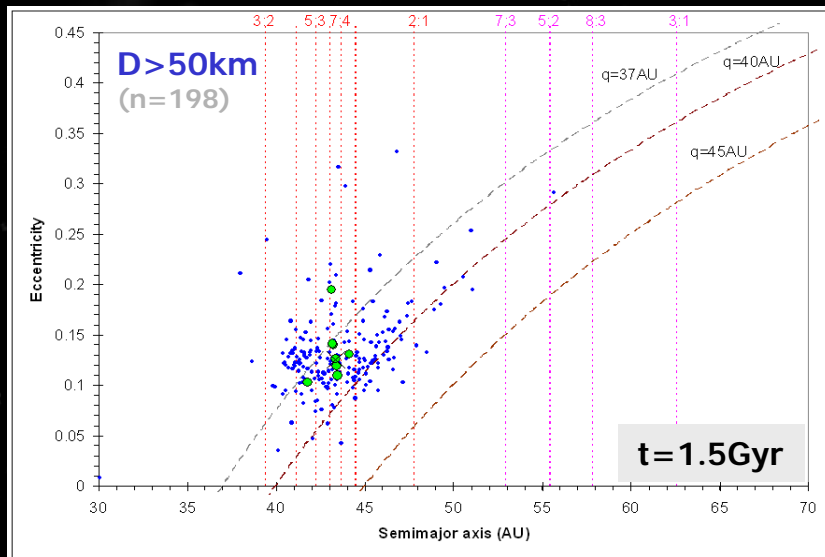
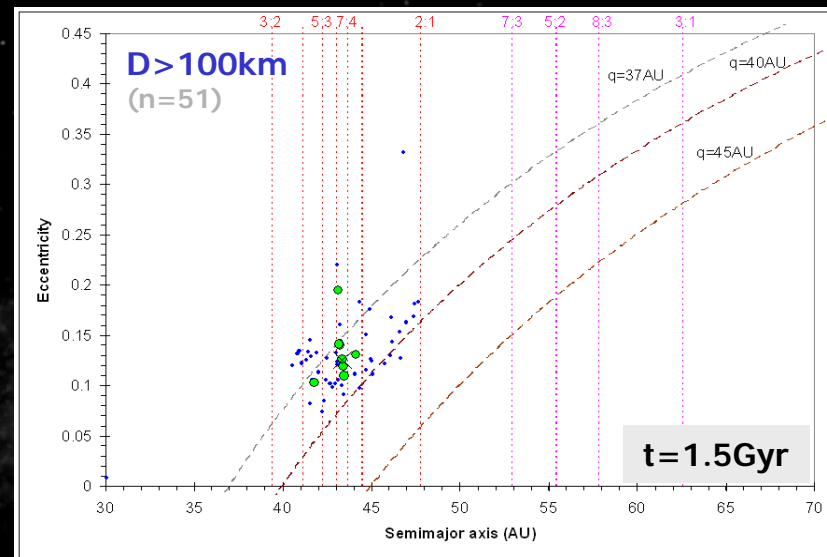
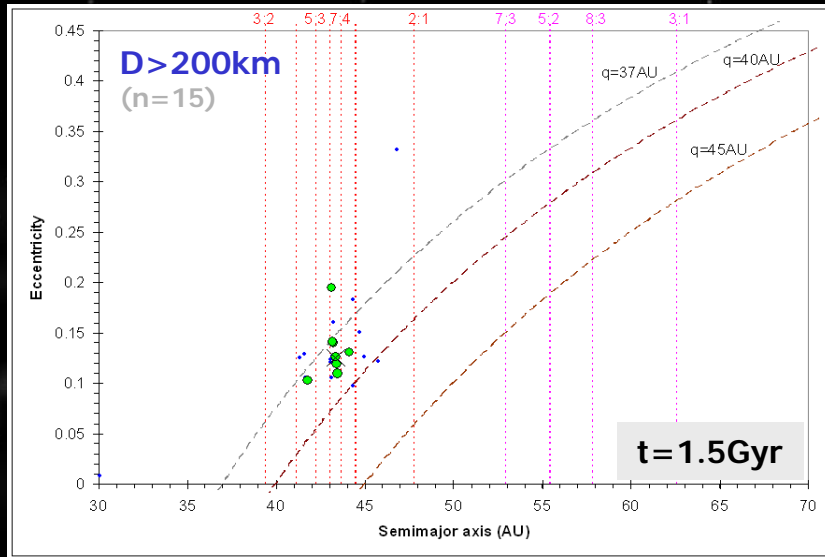


天体サイズの変化による結果

$a \times e$

Vmed 300m/s
Slope b big

4



● = 観測された衝突族天体

● = モデル衝突族天体

まとめ

- 1) 様々な初期条件でも一般の衝突経験からハウメア衝突天体族の軌道分布が説明できる。a-e-i要素スペースで天体族の軌道分布が非常に広い ($\Delta a \sim 7-15\text{AU}$; $\Delta e \sim 0.07-0.17$; $\Delta i \sim 5-8\text{deg}$) → 新メンバーの観測予想も!
- 2) ハウメア天体族の長期軌道進化、放出速度とサイズの関係から初期軌道分布の変化の結果が分かる → 初期太陽系の衝突状況の条件が分かる
- 3) それぞれのハウメア天体族は安定と不安定な軌道を経験している。さらに、カイパーベルトの海王星との共鳴の捕獲も可能 → 新メンバーの観測予想と衝突タイミング
- 4) 15億年後ハウメア天体族は約20—30%が太陽系から放出されたか惑星に衝突された
- 5) カイパーベルトの軌道構造に対して天体衝突の影響は大きい