

オールト雲起源新彗星の力学進化

10. 他の小天体群への遷移

An estimate of the dynamical lifetime of the Oort Cloud new comets in the planetary region

10. Transition of the Oort Cloud new comets into other SSSB populations

○伊藤孝士¹, 樋口有理可²

¹[国立天文台 CfCA/ADC](#), ²[産業医科大学医学部](#)

摘要 / abstract

本研究ではこれまで、オールト雲の成長と同時進行で惑星領域に落ちて来る新彗星の軌道進化を数値実験により追い掛けて来た。現時点までに以下の事柄が分かりつつある。(1) 惑星領域へ突入後の新彗星の力学的寿命は 10^7 年の程度に留まる。(2) 新彗星が平面的に飛来する場合にはいわゆる惑星バリアが有効に働く。今回は上記(2)の副産物的な結果として、オールト雲からやって来る天体がTNOやケンタウルスなど他の小天体群へ一時的にでも遷移する実態を例示する。オールト雲からやって来る天体は離心率・軌道傾斜角とも大きいいため、遷移できる小天体群は限られる。けれどもdetached TNOsへの遷移確率は有意であることが分かった。また既に三次元化しているであろう現代の外部オールト雲からはほぼ等方的に彗星が落下するので、いわゆる極域回廊(polar corridor. 軌道半長径が $30 < a < 1000$ au, かつ軌道傾斜角が $60^\circ < I < 120^\circ$)を通過する天体も有意に多い可能性が判明した。

本研究の目的と枠組み

- オールト雲の力学進化、惑星領域への新彗星の落下、他の小天体群への遷移過程をモデル化する

Formation of the Oort Cloud from a flat disk

- Galactic tide (the vertical component)
- Encounters with nearby stars



- 彗星雲の力学進化
- 銀河潮汐力
 - 近傍恒星の遭遇

→ Generation of new comets ($r < 30$ au)

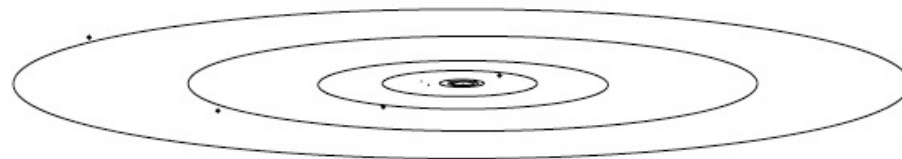
- Their orbit information is transferred into the second model
- Orbital positions are rewinded back at $r = 800$ au for the transfer

comets (injected during $t = 0-1$ Gyr)

Interaction with planets

- perturbation from Venus to Neptune
- Within the sphere of $r = 800$ au

comets (injected during $t = 4-5$ Gyr)



- Each comet is followed over 500 million years
- Neither galactic tide or stellar encounter is considered
- The “time-skip” scheme is adopted for simplification

- 新彗星の軌道進化
- 惑星による摂動

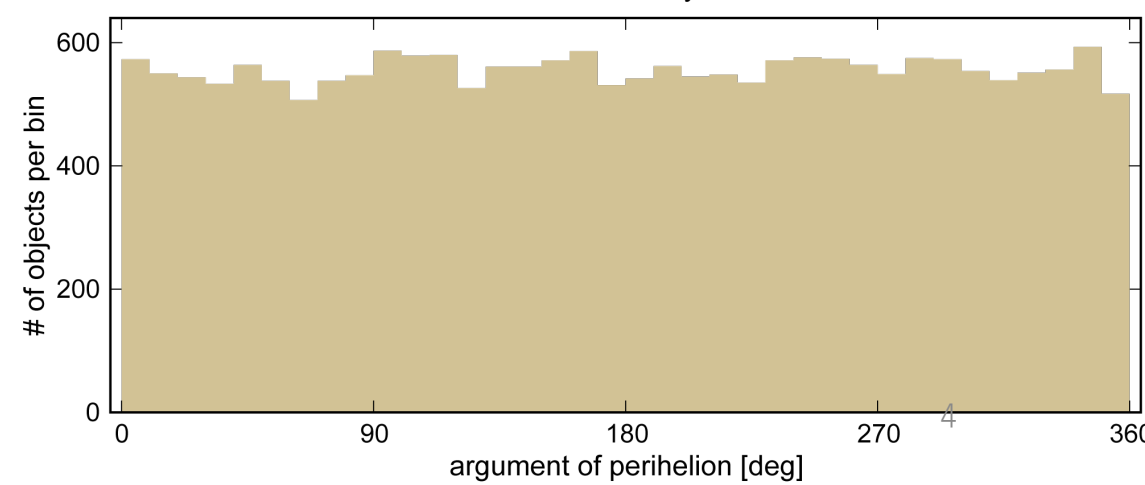
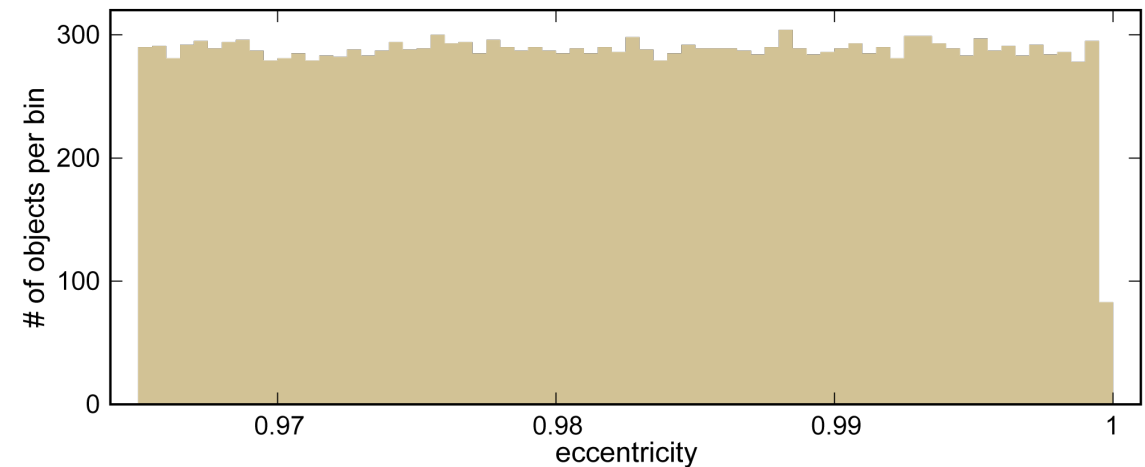
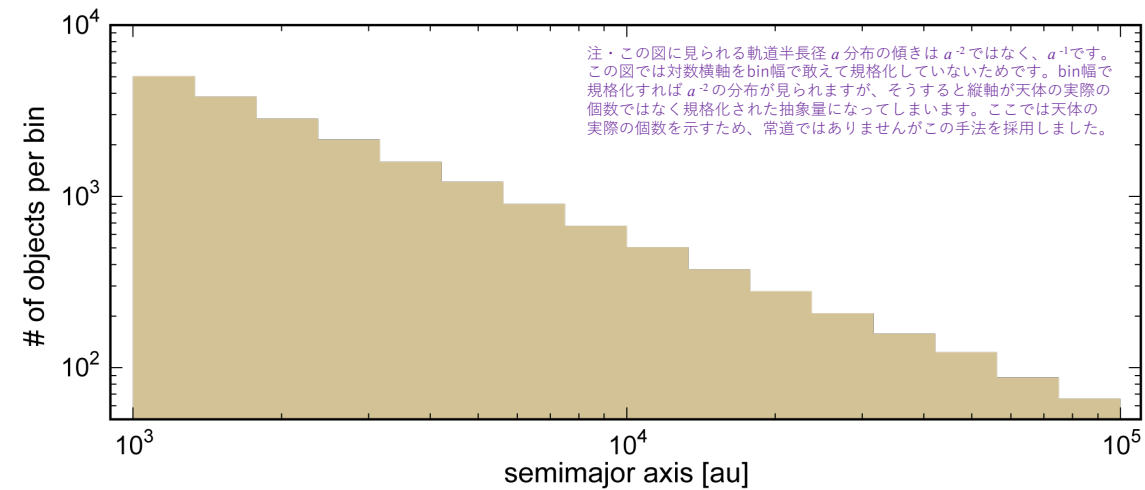


Ejected

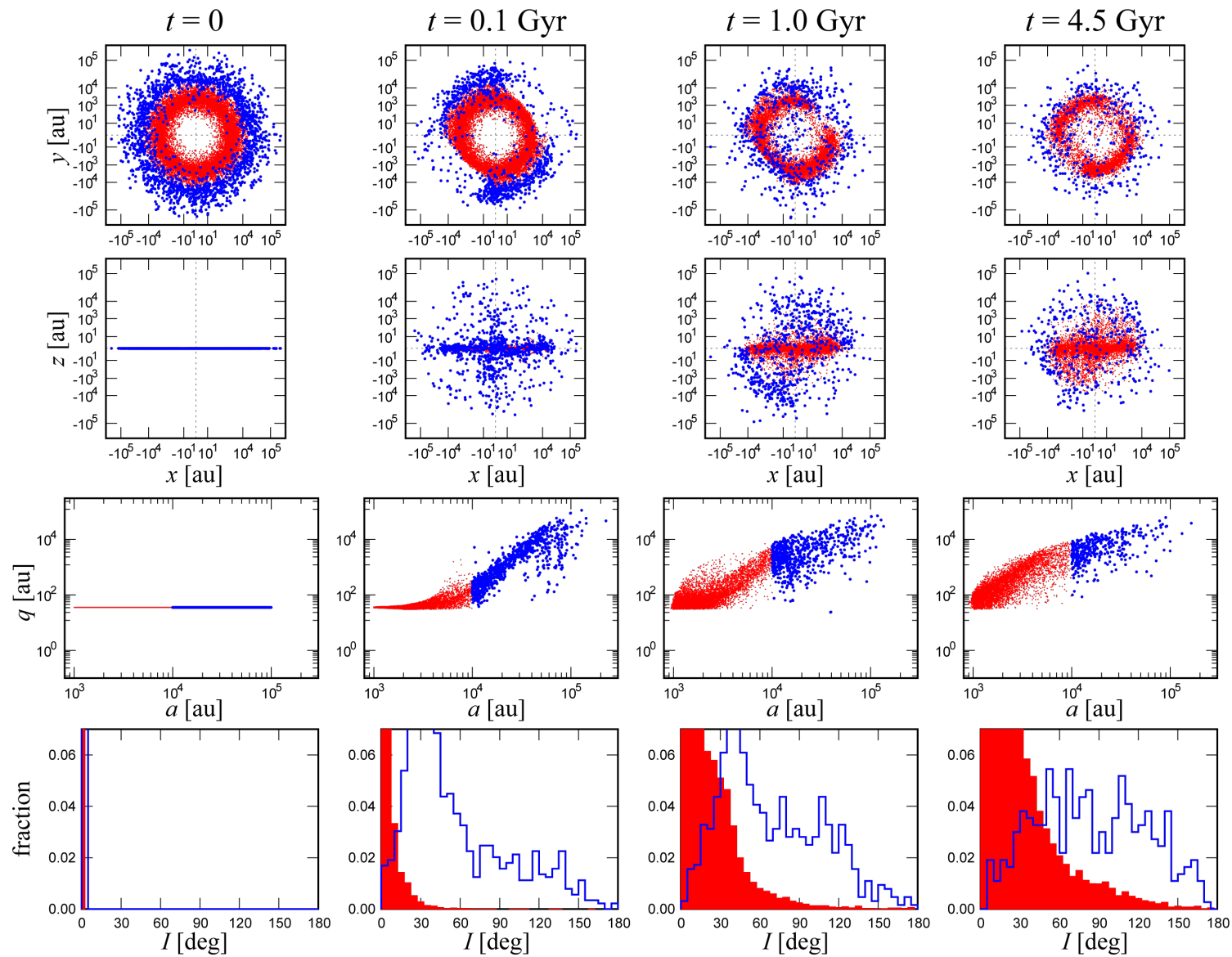
彗星雲が初期に含む天体の軌道分布

- 近日点距離 $q = 35$ au (全天体共通)
- 離心率 $e = [0.965, 1]$ で一様
- 軌道半長径 $a = [10^3, 10^5]$ au
 - 個数密度関数 $N(a) \propto a^{-2}$
- 軌道傾斜角 $I = 0$ (全天体共通)
- 近日点引数 $\omega = [0, 2\pi]$ で一様
- 昇交点経度 $\Omega = 0$ (初期 $I = 0$ なので)
- 平均近点離角 $l = [-\pi, \pi]$ で一様

右図は80万天体を含む例 →



彗星雲の力学進化



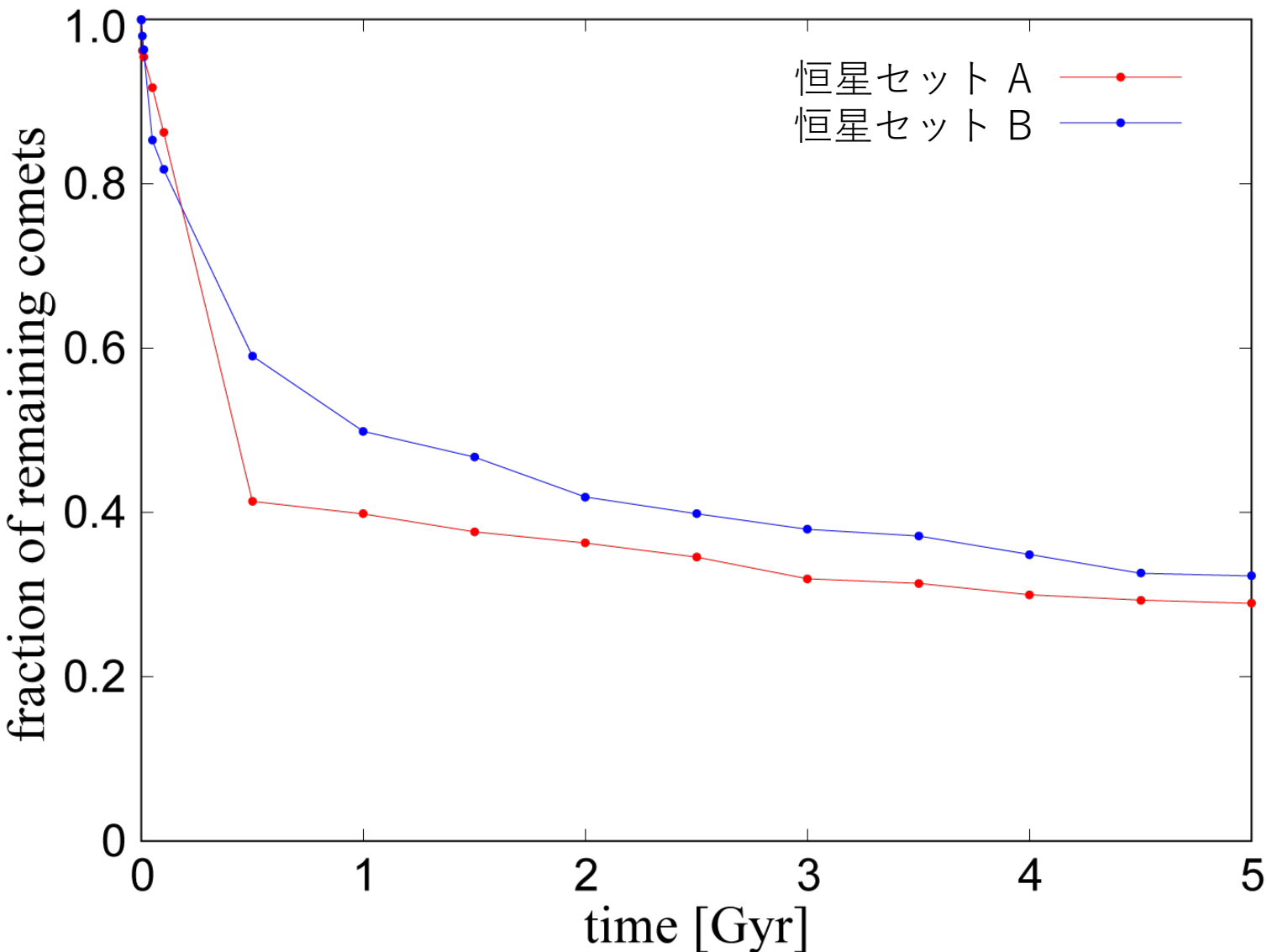
- 初期状態は完全な平面分布
 - 散乱された微惑星円盤
- これに摂動を加える
 - 銀河潮汐力
 - 恒星の接近遭遇
- 10億年スケールの形状変化

[Higuchi et al. 2007](#)
[Higuchi & Kokubo 2015](#)

- 天体が多数落下する
 - 日心距離 $r < 30$ au
 → 新彗星 (new comets)

赤 : 軌道半長径 $a < 10^4$ au の天体
青 : 軌道半長径 $a > 10^4$ au の天体

彗星雲に居残る天体



彗星雲には働く摂動は先に述べた以下。

- 銀河潮汐力
- 恒星の接近遭遇

これにより初期に彗星雲にあった天体の多くが散乱され、直ちに彗星雲を去る。50億年後に彗星雲に残るのは40%程度。

恒星の接近遭遇はほぼランダムであり、モデル内では乱数を使い生成している。ここでは二種類の恒星セットA, Bを使ったが、定性的には違いは少ない。

彗星雲を去った天体のうち少数が内側つまり惑星領域に落下し、新彗星となる（初期天体数の5%未満）。

新彗星の発生

前ページで述べたように、初期に彗星雲にあった天体のうち数%未満が新彗星として惑星領域に落下する。新彗星の定義は以下。

- 日心距離 $r < 30$ au

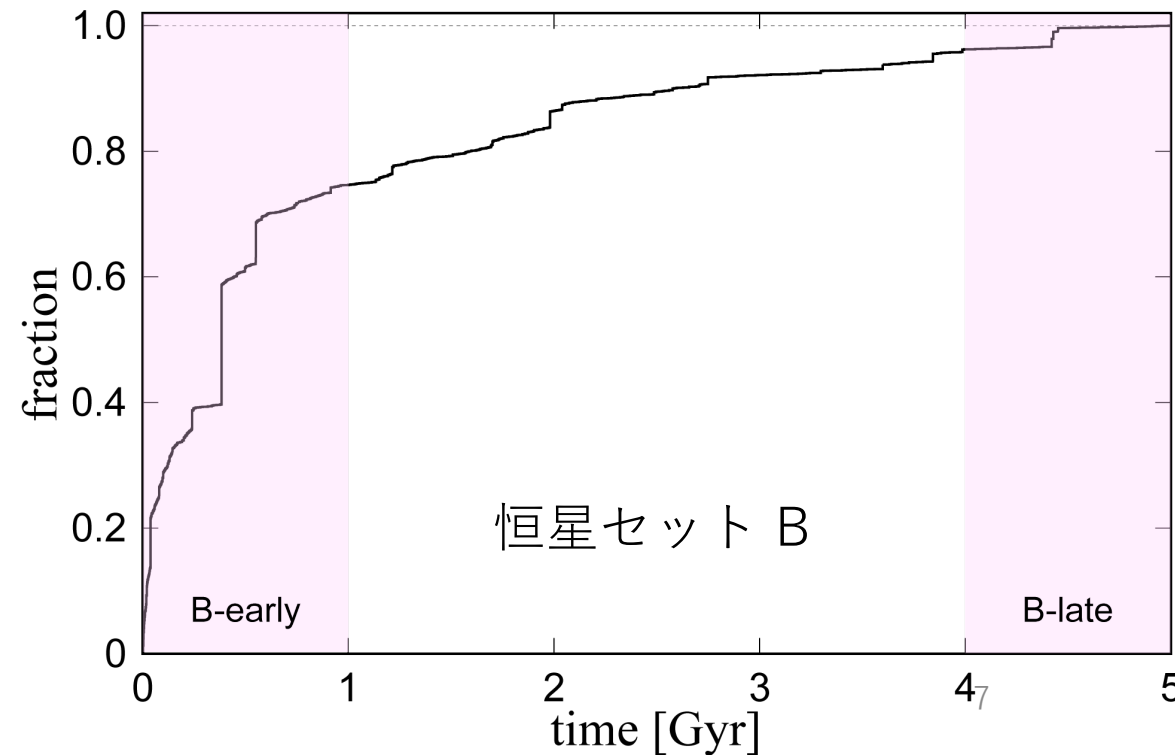
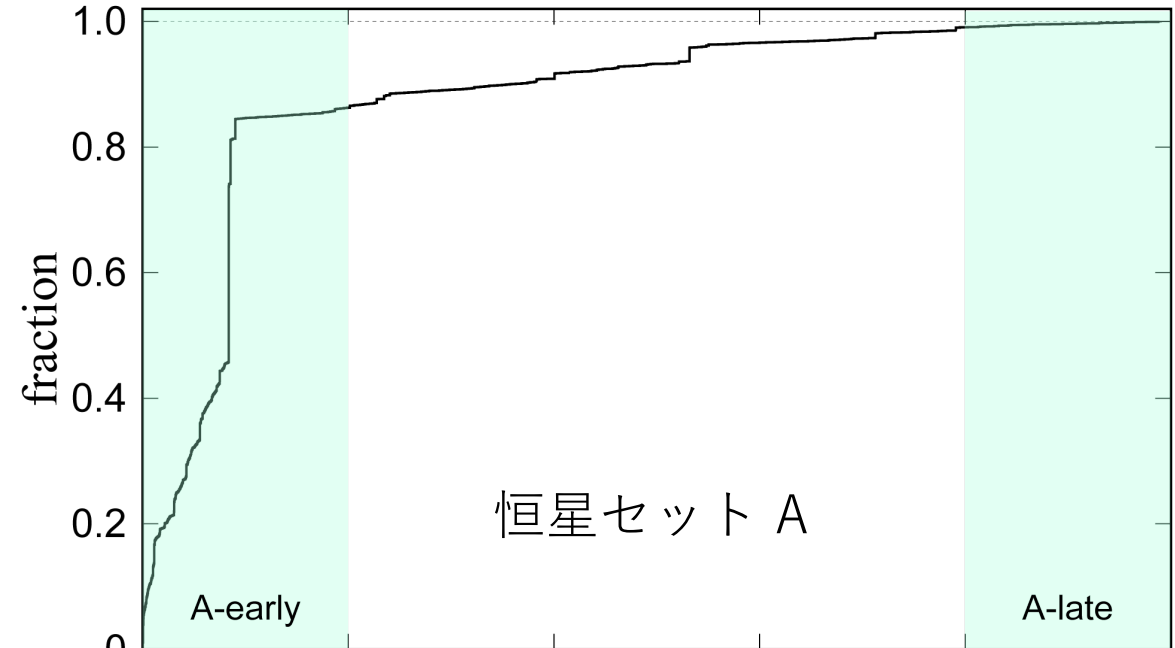
新彗星の発生状況は恒星遭遇の頻度(乱数)に依存するが、定性的には大差無い。

本研究では以下の時期に着目する。

- 初期の10億年間 (A-early, B-early)
- 後期の10億年間 (A-late, B-late)

本発表では恒星セットAでの結果を主に示す。

- 恒星セットBを用いた結果と本質的な違いは無い
- 小さな違い → $t = 4.4$ Gyrでの強い彗星シャワー

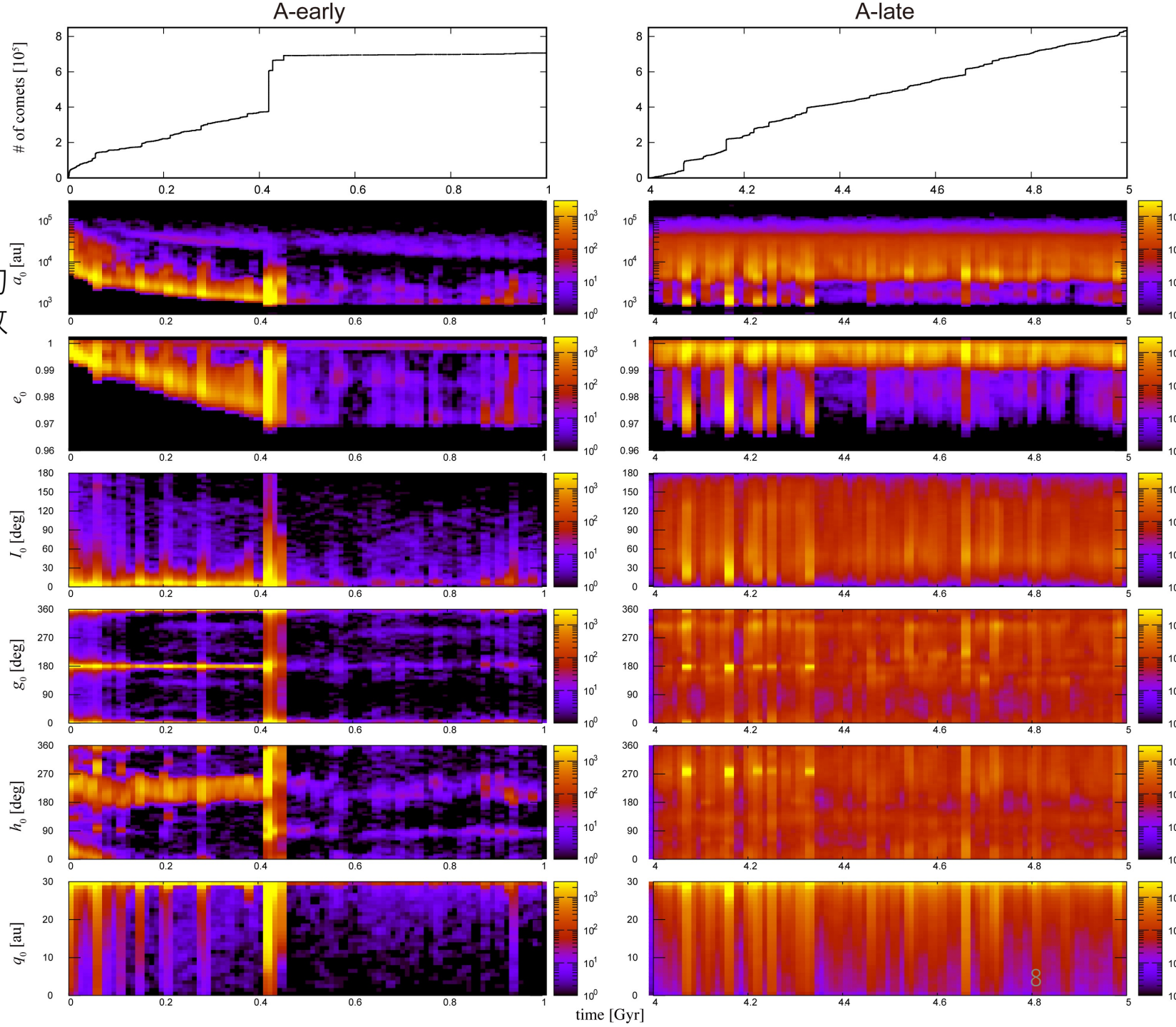


新彗星の発生

最上段は各時期の新彗星の累積的発生状況。どの時期にも同様な数の新彗星を人為的に発生させた(初期の彗星雲の個数を増やす)。60-80万天体 / 各10億年。

二段目以降は新彗星発生時の各軌道要素の頻度分布。カラーバーは対数で、強調気味。

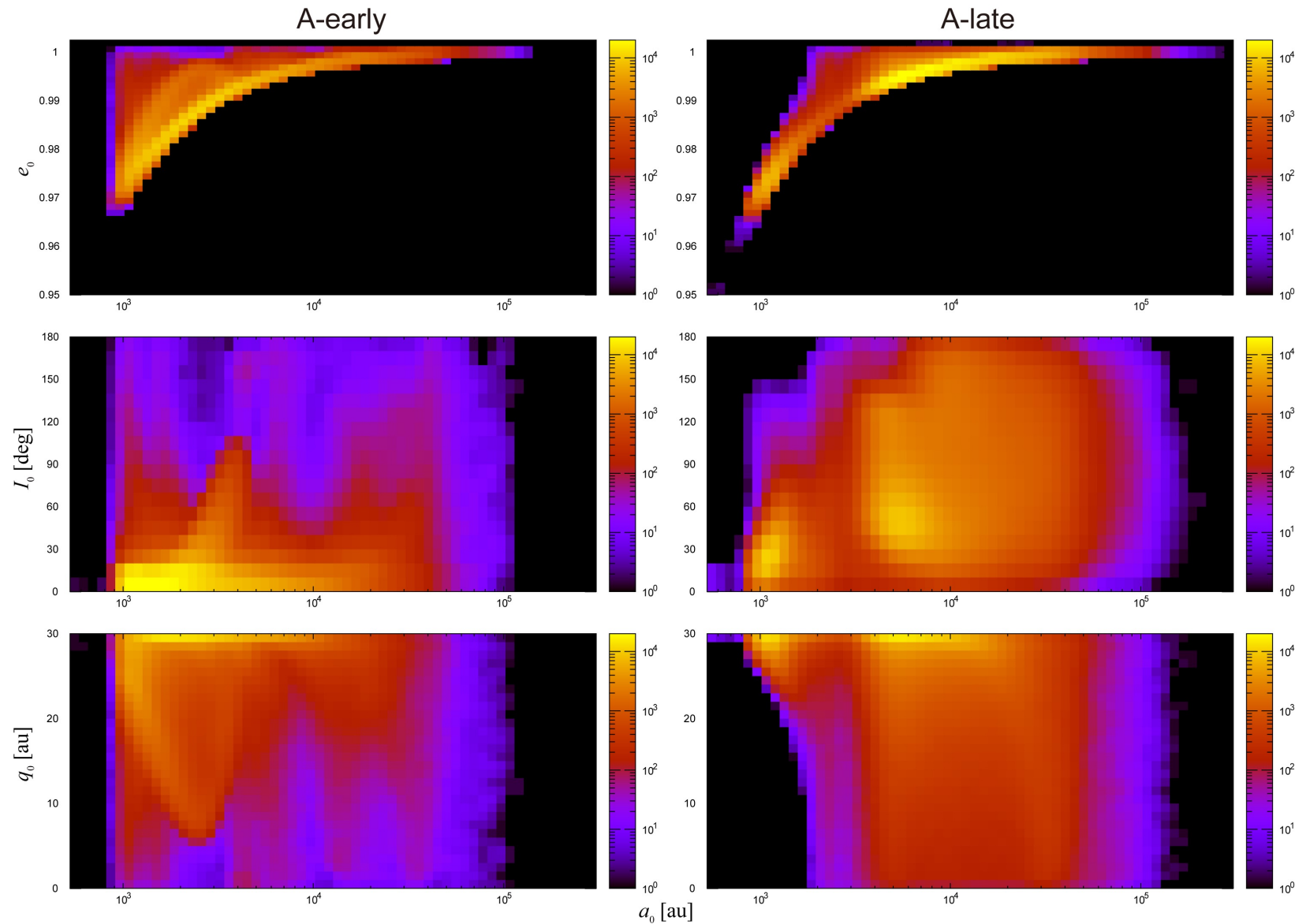
- 軌道半長径 a
- 離心率 e
- 軌道傾斜角 I
- 近点引数 ω
- 昇交点経度 Ω
- 近点距離 q



新彗星の発生

各時期に発生した新彗星の軌道要素分布の相互関係。
カラーバーは対数で、強調気味。

- 新彗星の定義($q < 30$ au)から、軌道半長径が大きい天体は離心率も大きくなる。
- 軌道傾斜角分布は各時期の彗星雲の形状を反映する。
- 左に示した分布、特に (a, q) の分布が惑星領域内に於ける新彗星の滞在時間を基本的に支配すると考えて良い。

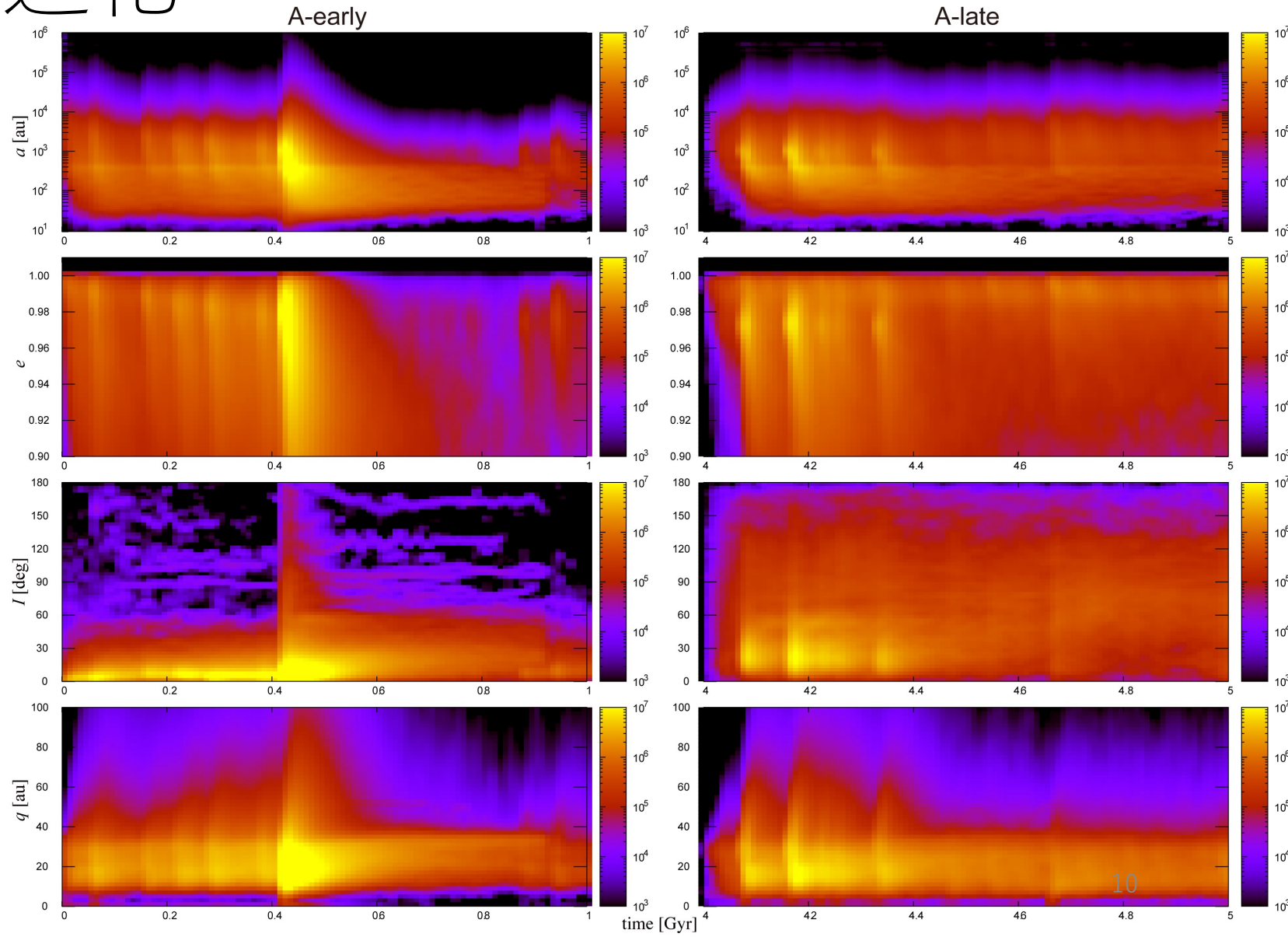


新彗星の軌道進化

ここまで説明したモデルで発生させた新彗星に主要な惑星の摂動を与える。考慮した惑星は金星から海王星までの七天体。計算方法や近似手法については[伊藤・樋口 \(2014\)](#)を参照のこと。

右図は新彗星の各軌道要素の頻度分布の進化。即ち新彗星の発生・軌道進化・消滅の効果を表す時系列となる。色バーは対数で、強調気味。

恒星の近接遭遇による彗星シャワーの発生がよく見える。

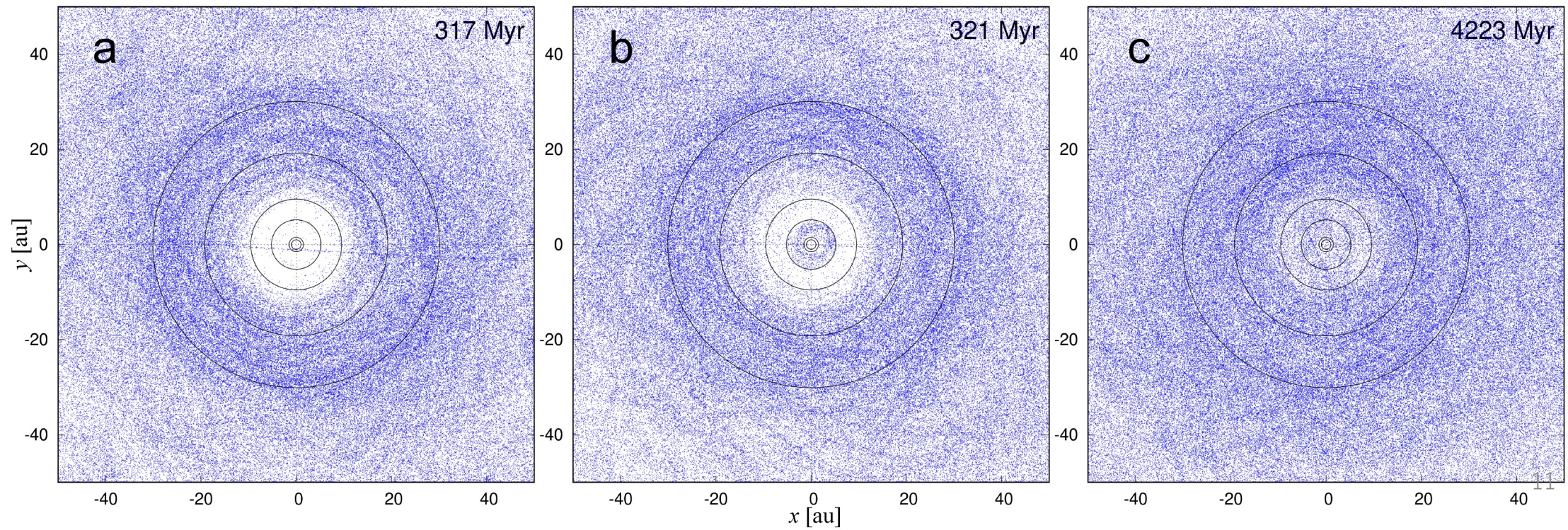


土星-木星バリア

e.g. Everhart, 1973

彗星が多く飛来しても木星らに阻まれて地球まで到達しないという予想は1970年代から存在した。バリアは土星+木星により作られる。以下は黄道面の北極方向から見た図三種。

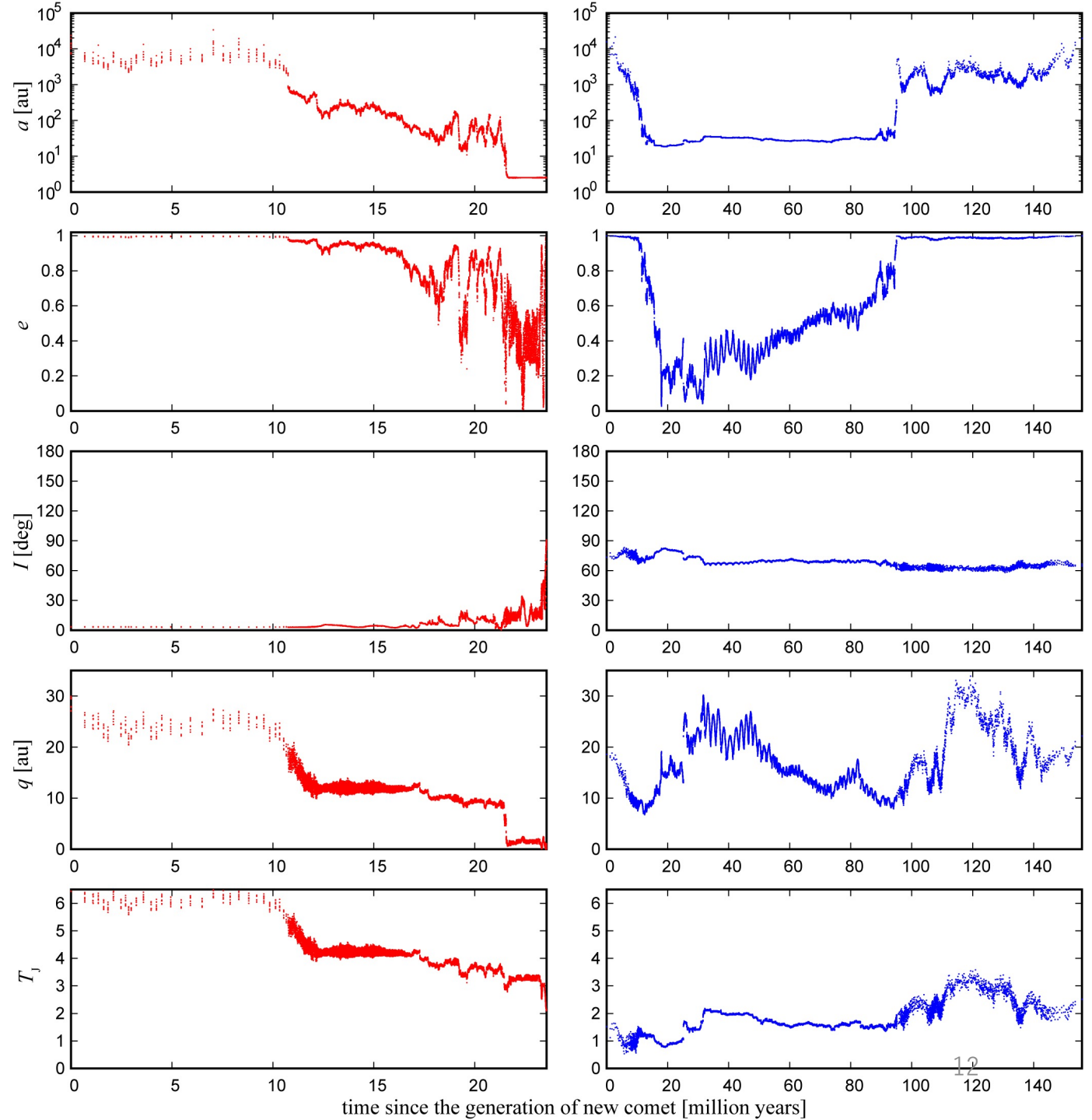
- a: バリアが働いている。土星軌道以内に彗星が少ない [A-early](#)
- b: バリアが働き、天体を木星軌道以内に封じている。 [A-early](#)
- c: バリアがほぼ働いていない [A-late](#)



軌道進化の例

左の天体 (赤) :
最初の100 myrは離心率が大きいまま推移した。時刻 $t = 12$ myrで近日点が $q = 10$ auまで減少し、 $t = 25$ myr で更に太陽に近づいた。つまり土星-木星バリアを突破している。この天体の軌道傾斜角は小さいので、割に例外的である。

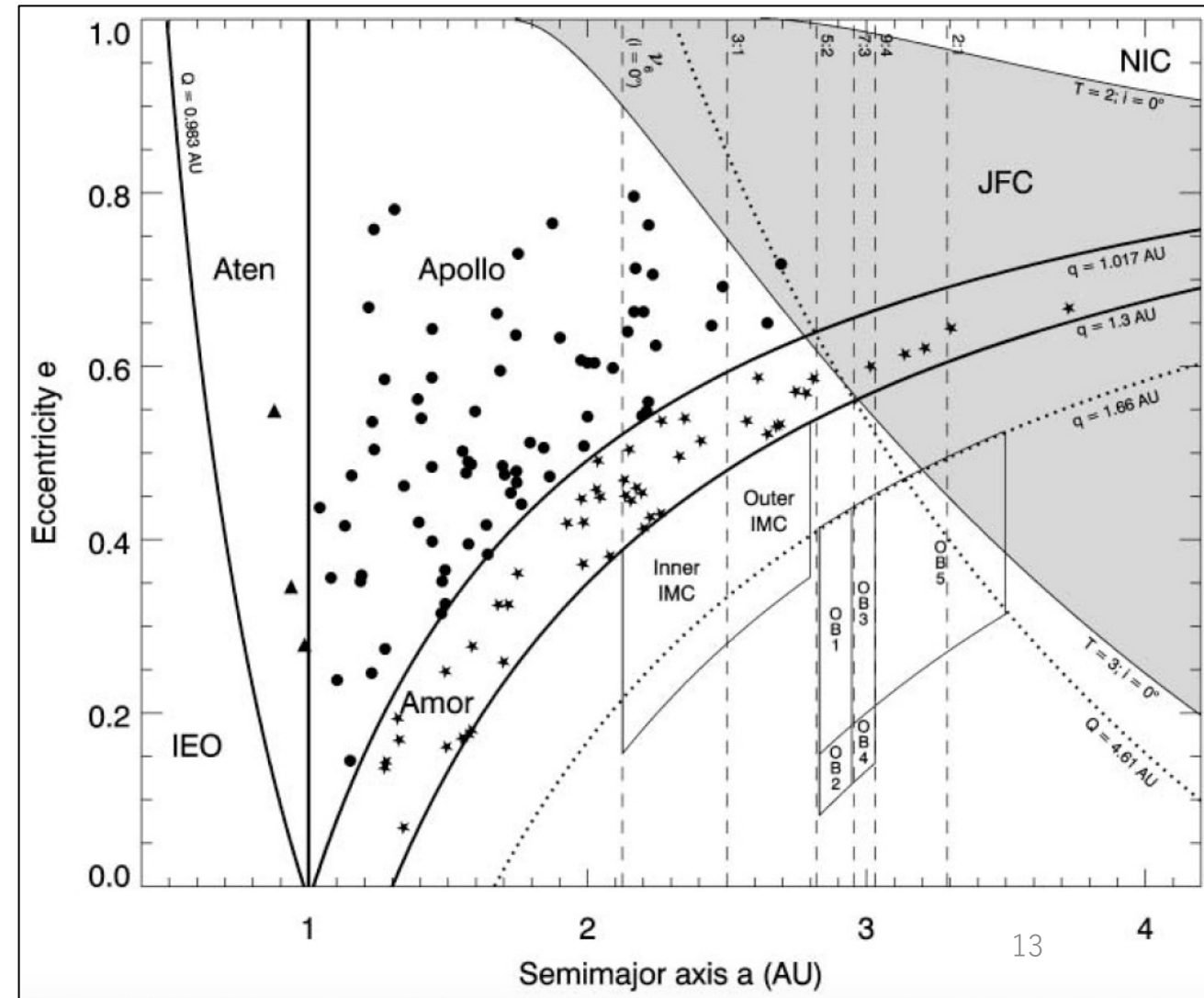
右の天体 (青) :
10 myrほどをかけて軌道半長径 a が数10 auまで低下したが、近日点距離は $q = 10-30$ auを保ち続けた。つまりこの天体は土星-木星バリアを突破しなかった。



本発表における小天体群の分類

[Bottke et al. 2002](#)

- near-Earth comets: 近地球彗星
($q < 1.3 \text{ au}$) \wedge ($P < 200 \text{ years}$)
- near-Earth asteroids: 近地球小天体
($q < 1.3 \text{ au}$) \wedge ($a < 3.5 \text{ au}$)
- main belt asteroids: メインベルト小惑星
($2.1 < a < 3.5 \text{ au}$) \wedge ($e < 0.35$)
- Jupiter-family comets: 木星族彗星
($2.0 < T_J < 3.0$) \wedge ($a \leq 10 \text{ au}$)
- Jupiter Trojans: 木星トロヤ群天体
($5.05 < a < 5.35 \text{ au}$) \wedge ($e < 0.2$) \wedge ($I < 40^\circ$)
- Centaurs: ケンタウルス
($(T_J \geq 3.05) \vee (q \geq 7.35 \text{ au})$) \wedge ($a_J < a < a_N$)



- Classical TNOs:

$$((T_J \geq 3.05) \vee (q \geq 7.35 \text{ au})) \wedge (39.4 < a < 47.8 \text{ au}) \wedge (e < 0.24)$$

- Detached TNOs: ←近日点距離の最小値に不定性があり、以下を試した: $q_{DT} = 35, 38, 40 \text{ au}$

$$((T_J \geq 3.05) \vee (q \geq 7.35 \text{ au})) \wedge (a < 2000 \text{ au}) \wedge (e > 0.24) \wedge (q > q_{DT})$$

[Gladman et al. 2008](#)

- Polar Corridor objects:

$$(30 < a < 1000 \text{ au})$$

$$\wedge (60^\circ < I < 120^\circ)$$

“Polar Corridor” = 極域回廊

- 惑星領域とオールの雲を接続する軌道傾斜角の大きな位相空間。ケンタウルス天体が木星に捕獲され、再び離脱する経路にもなる可能性がある ([Namouni and Morais, 2018](#))

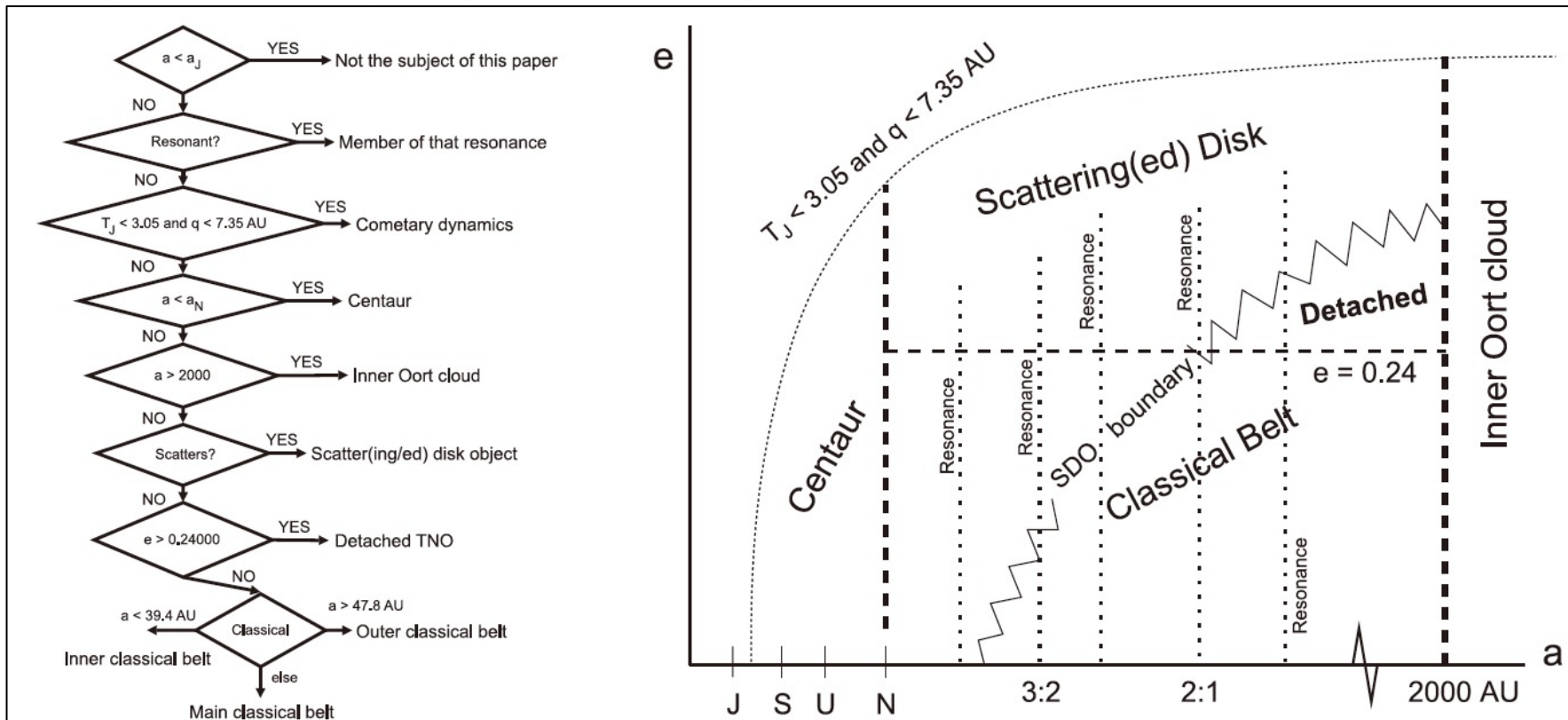


Fig. 1. *Left:* Flowchart for the outer solar system nomenclature. When orbital elements are involved they should be interpreted as the osculating barycentric elements. *Right:* A cartoon of the nomenclature scheme (not to scale). The boundaries between the Centaurs, JFCs, scattered disk, and inner Oort cloud are based on current orbital elements; the boundaries *are not* perihelion distance curves. Resonance inhabitation and the “fuzzy” SDO boundary are determined by 10-m.y. numerical integrations. The classical belt/detached TNO split is an arbitrary division.

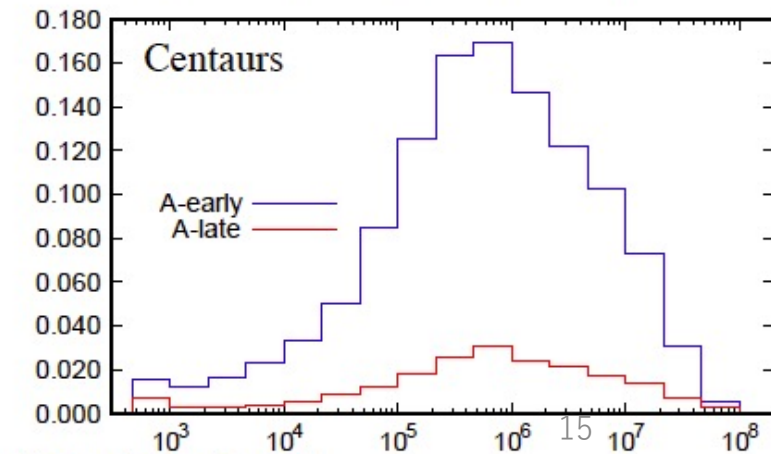
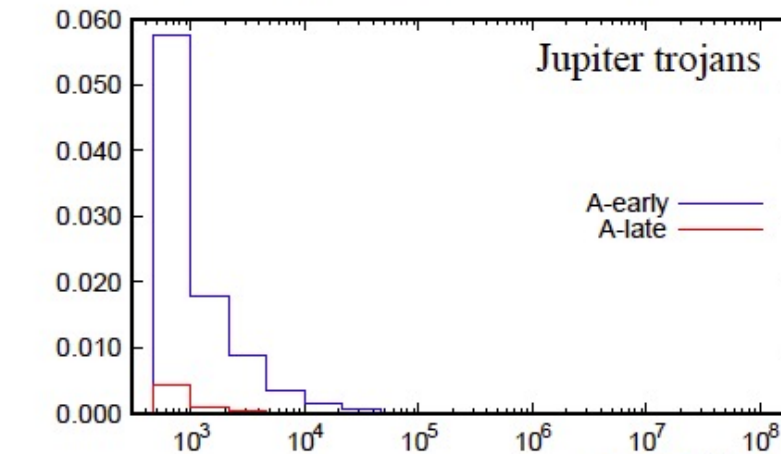
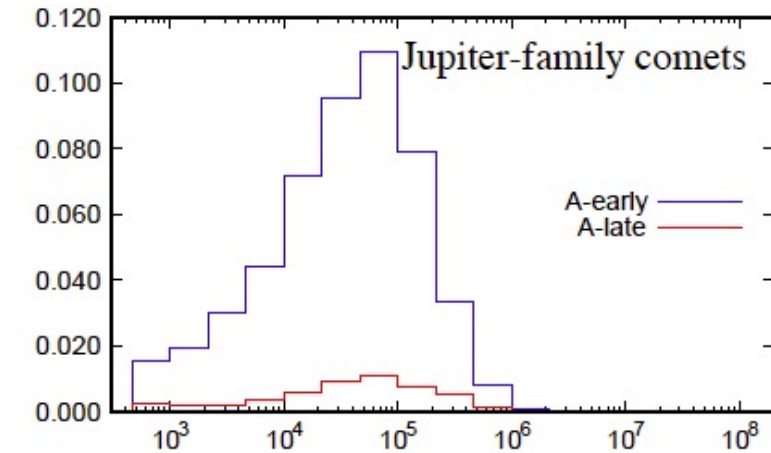
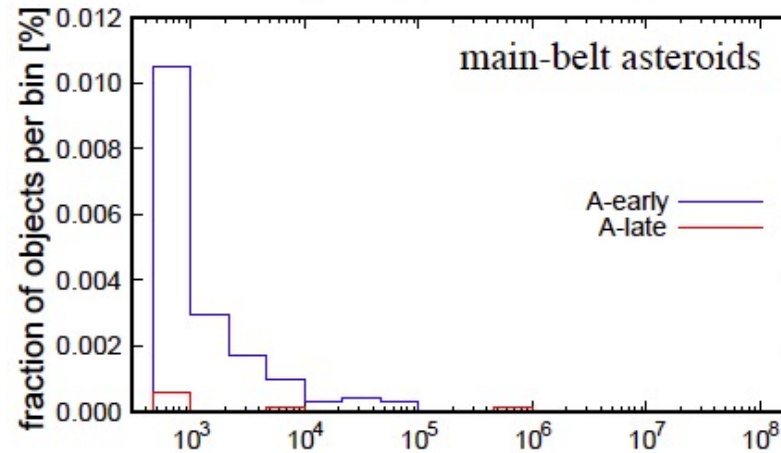
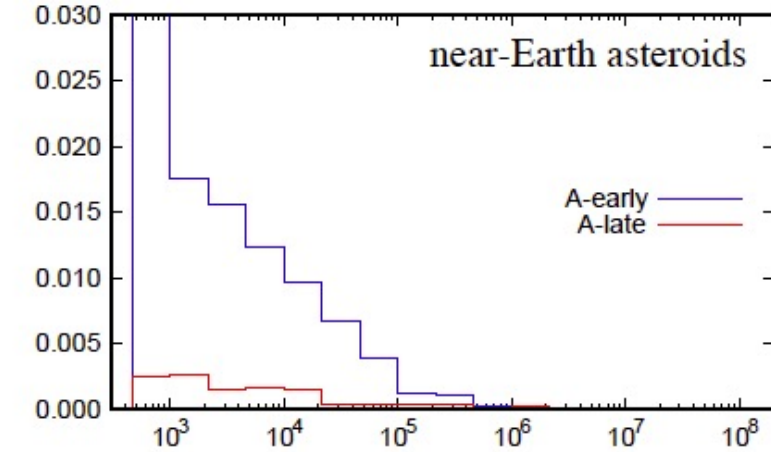
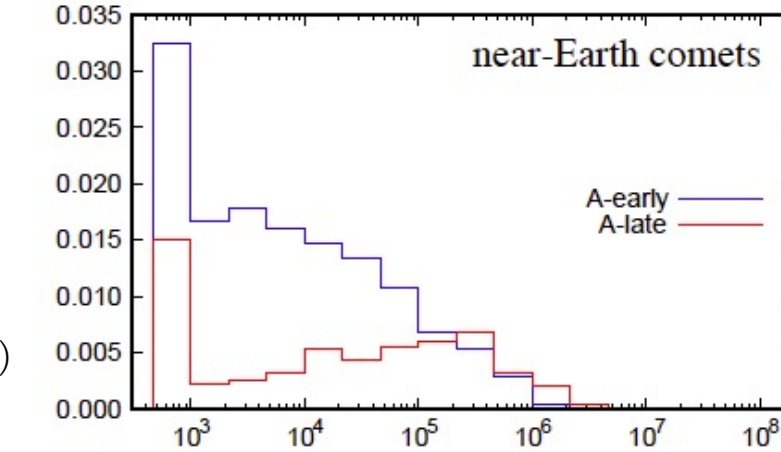
木星に関するTisserand判定式

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a_J}(1 - e^2)} \cos I$$

各集団内での 彗星の滞在時間 1

縦軸は全計算期間に発生した新彗星に対する比率(%)

- 例. 全計算期間の新彗星数が 10^6 個なら
- あるbin値=0.01% → 100個

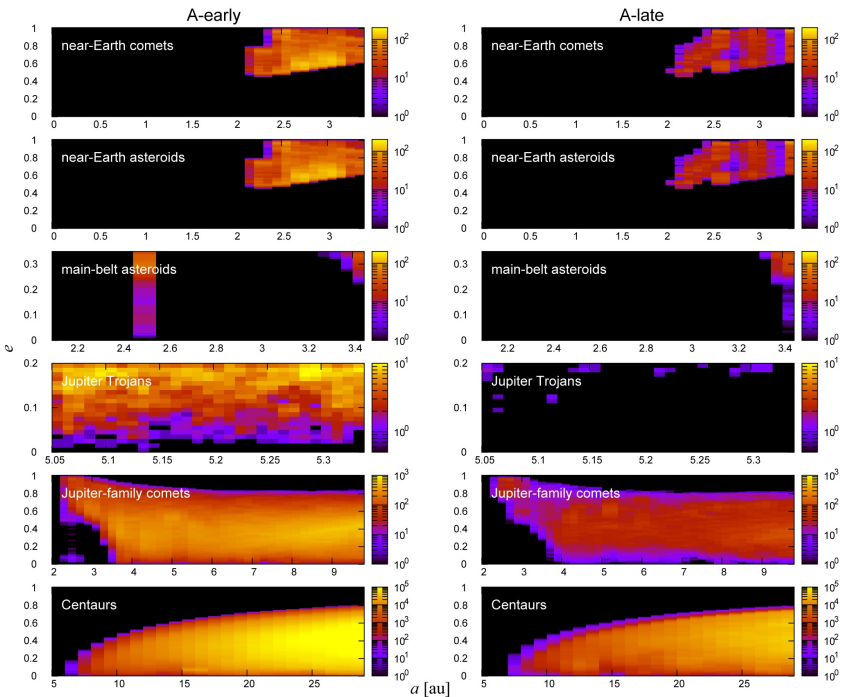


- メインベルトや木星トロヤ群になる天体は少ない
 - これらの天体の定義では離心率が小さい
- 近地球彗星/小惑星になる天体はそこそこある
 - しかし滞在時間は現在のNEAのそれ(10^6 年)より一桁小さい
 - 離心率の大きな天体が多いため
 - A-earlyで有意に多い
 - $t=0.4$ Gyrに強い彗星シャワーがあり、そのために内側に多くの天体が輸送された (A-lateとの違い)
- A-earlyではJFC, Centaursが多く発生した
 - 定義に軌道傾斜角が小さいことが含まれる

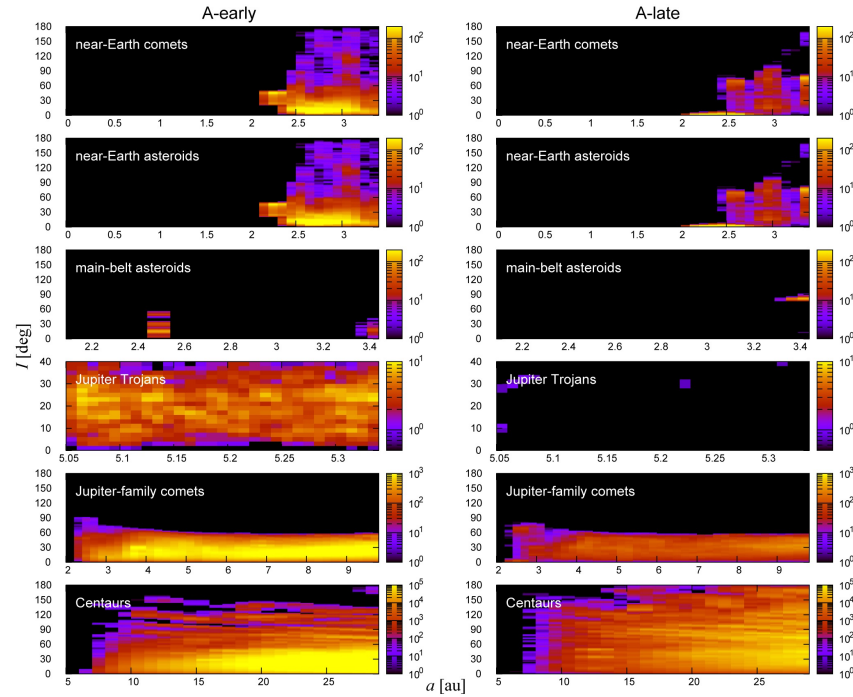
resident time in each population [years]

軌道要素空間での分布 (全期間(10^9 年)の積分)

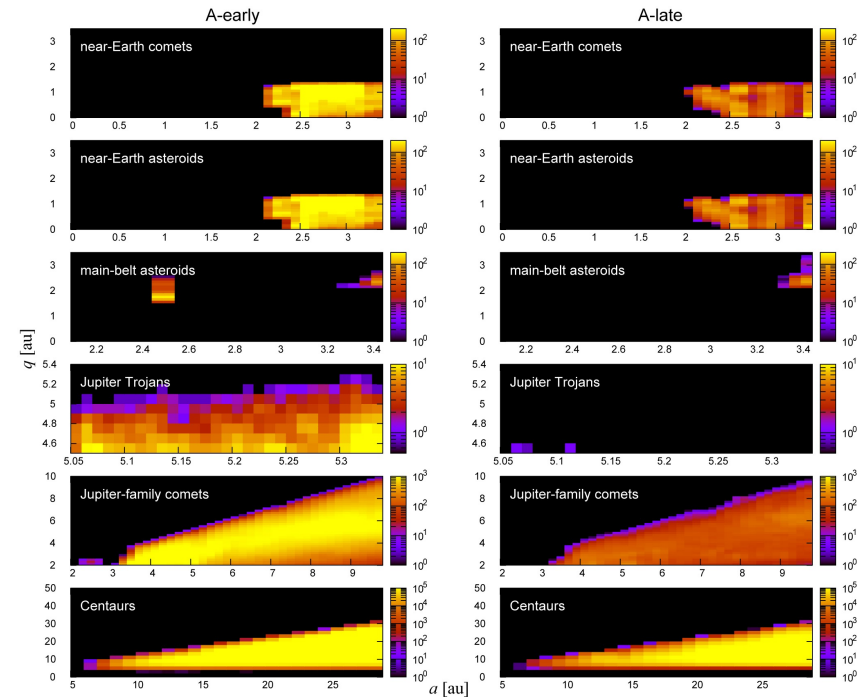
(a, e)



(a, I)



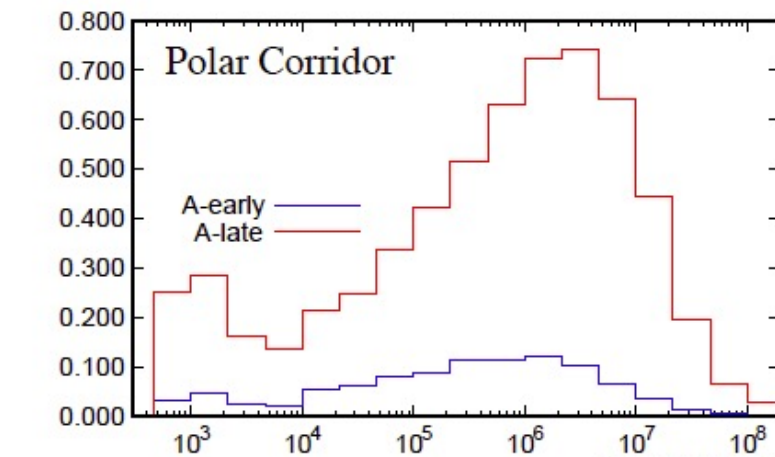
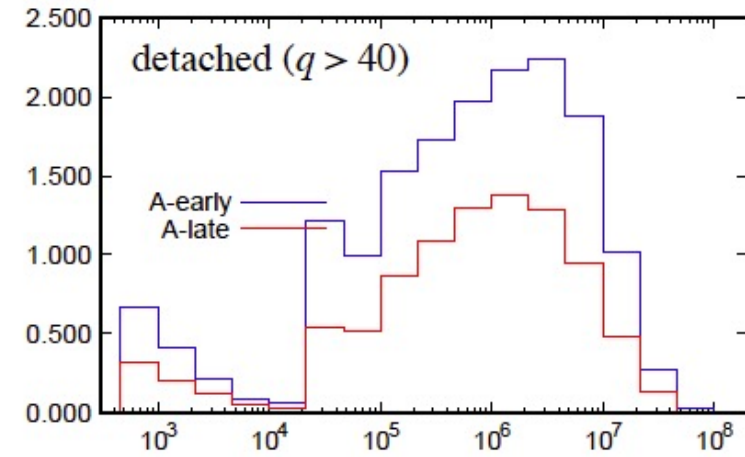
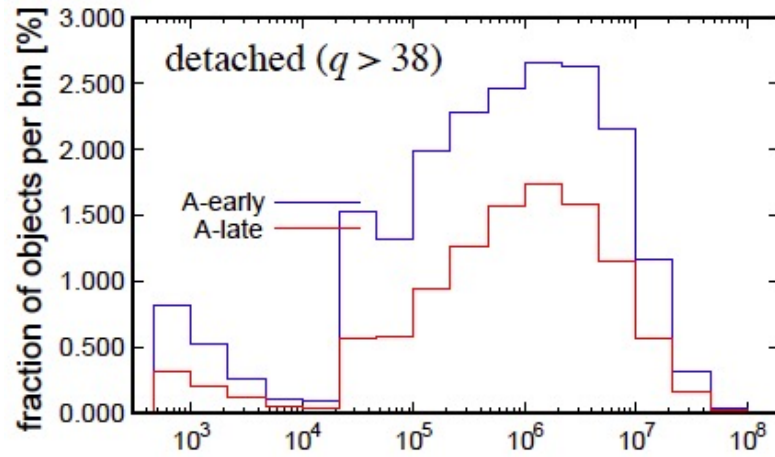
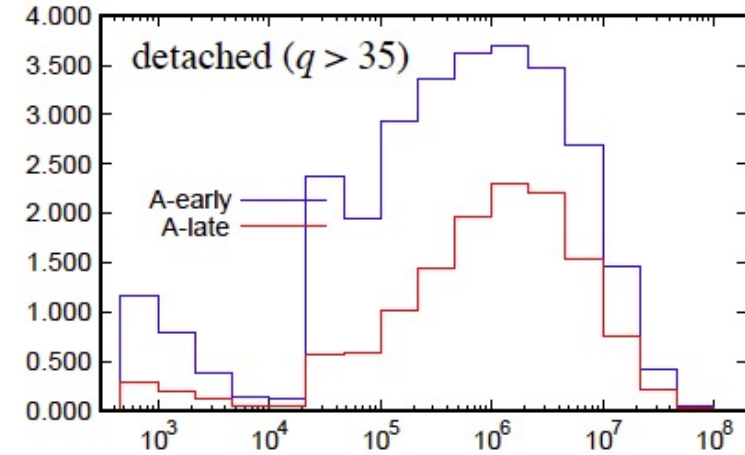
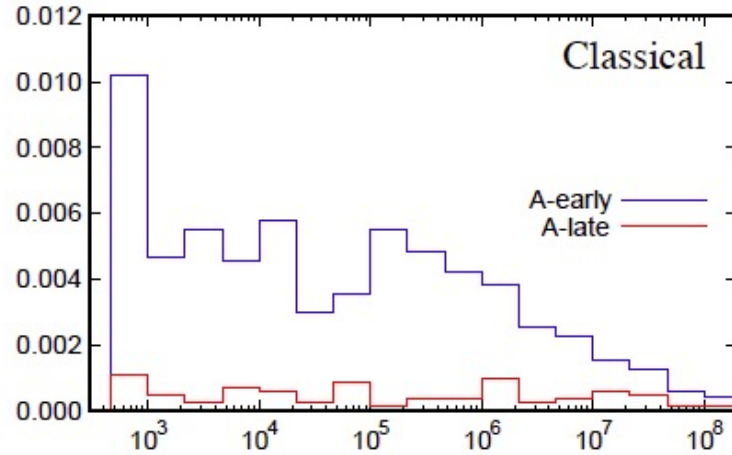
(a, q)



各集団内での 彗星の滞在時間 2

縦軸は全計算期間に発生した新彗星に対する比率(%)

- 例. 全計算期間の新彗星数が 10^6 個なら
- あるbin値=0.01% \rightarrow 100個



resident time in each population [years]

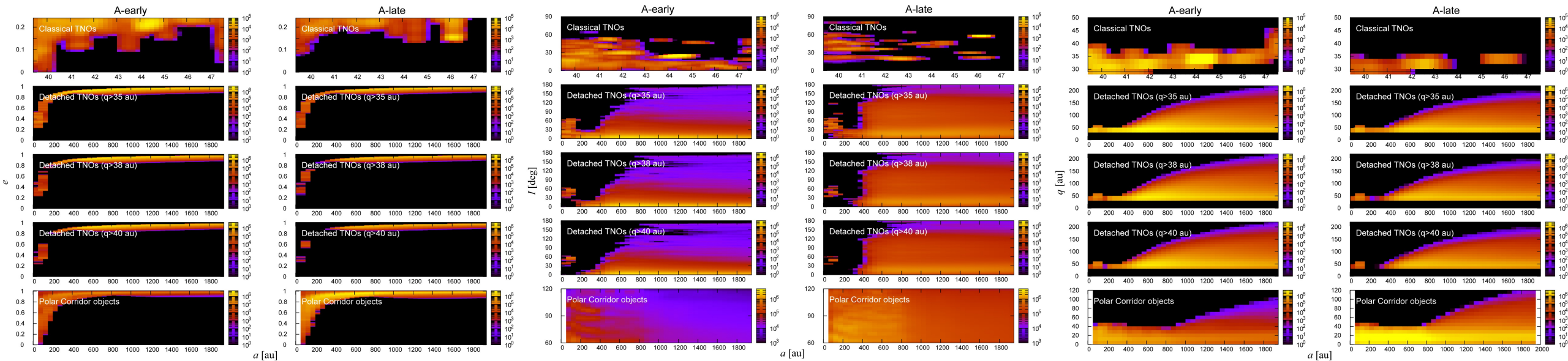
- Classical TNOを経験する天体は多く無い
 - 離心率の小ささが定義に含まれるから
 - 特にA-lateではその比率は小さい
 - これは定義 $T_J \geq 3.05$ が小さい傾斜角を含むため
- Detached TNOsを経験する天体は多い
 - 全binを足し合わせると20%かそれ以上
 - q_{DT} には不定性があり、これが小さいほど確率が高まるのは当然(領域が広がる)
- 極域回廊を通る天体も多い
 - 新彗星が等方的に飛来するA-lateで顕著

軌道要素空間での分布 (全期間(10^9 年)の積分)

(a, e)

(a, I)

(a, q)



まとめ

- 新彗星は惑星領域で幾つかの小天体群への遷移を経験する
 - メインベルト、木星トロヤ群、Classical TNOsにはなりにくい
 - 近地球小天体にはなり得るが、離心率が小さいため滞在時間は短い
 - 軌道傾斜角が小さい天体はケンタウルスや木星族彗星を経験し得る
 - Detached TNOsには高い確率で遷移する
 - 極域回廊(the polar corridor)は新彗星の経路として有効である
- ケンタウルス⇔木星族彗星の遷移の実例は既に見つかっている
 - 次ページを参照
- 惑星領域に於ける新彗星の滞在時間の統計と土星-木星バリアに関するもう少し詳しい計算結果
 - [昨年度の講演会ポスター](#)もご参照ください

遷移する天体の実例

[Steckloff et al. 2020](#)

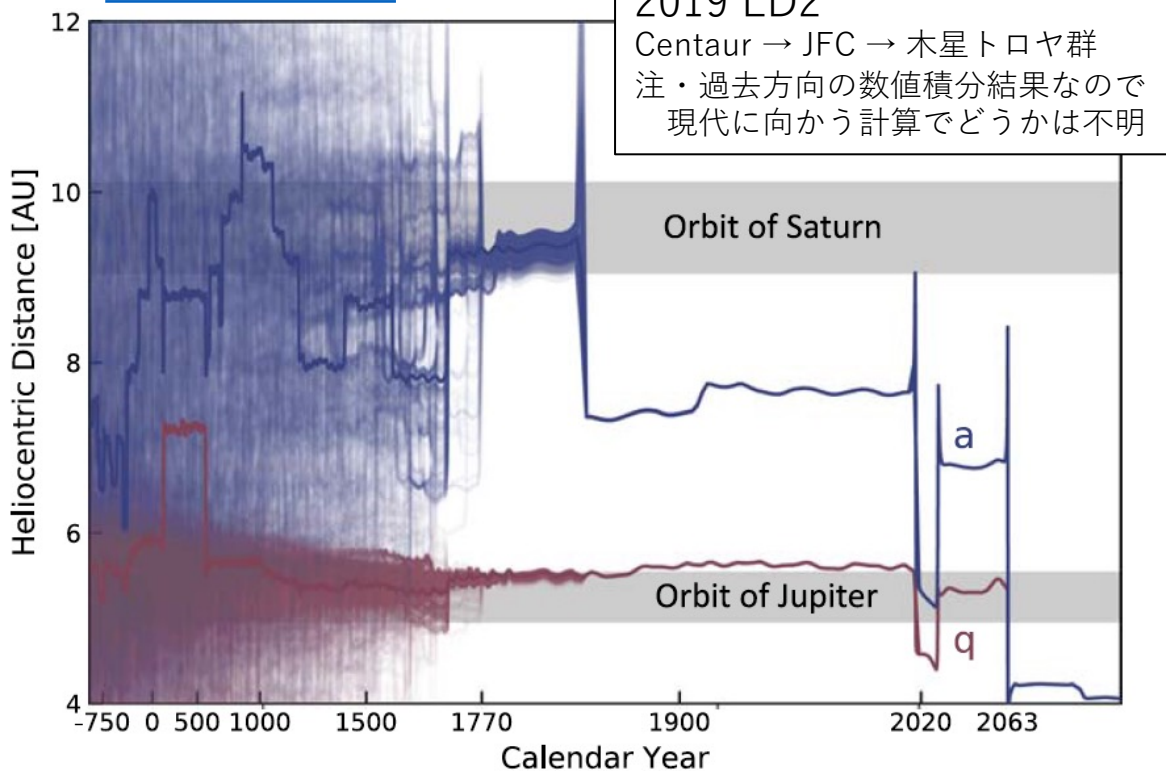


Figure 1. Backward orbital evolution of the nominal orbit and 1000 clones of 2019 LD2 are shown with their semimajor axes (“a,” blue) and perihelion distances (“q,” maroon). The clones are plotted at lower opacity. The clones are seen to diverge, especially in their semimajor axes, around the year ~ 1770 , as seen by the marked spread in the semimajor axis evolution at earlier times. The perihelion distances remain clustered just outside of Jupiter’s orbit (the heliocentric distance ranges of Jupiter and Saturn’s orbits are indicated by the gray bands).

[Sarid et al. 2019](#)

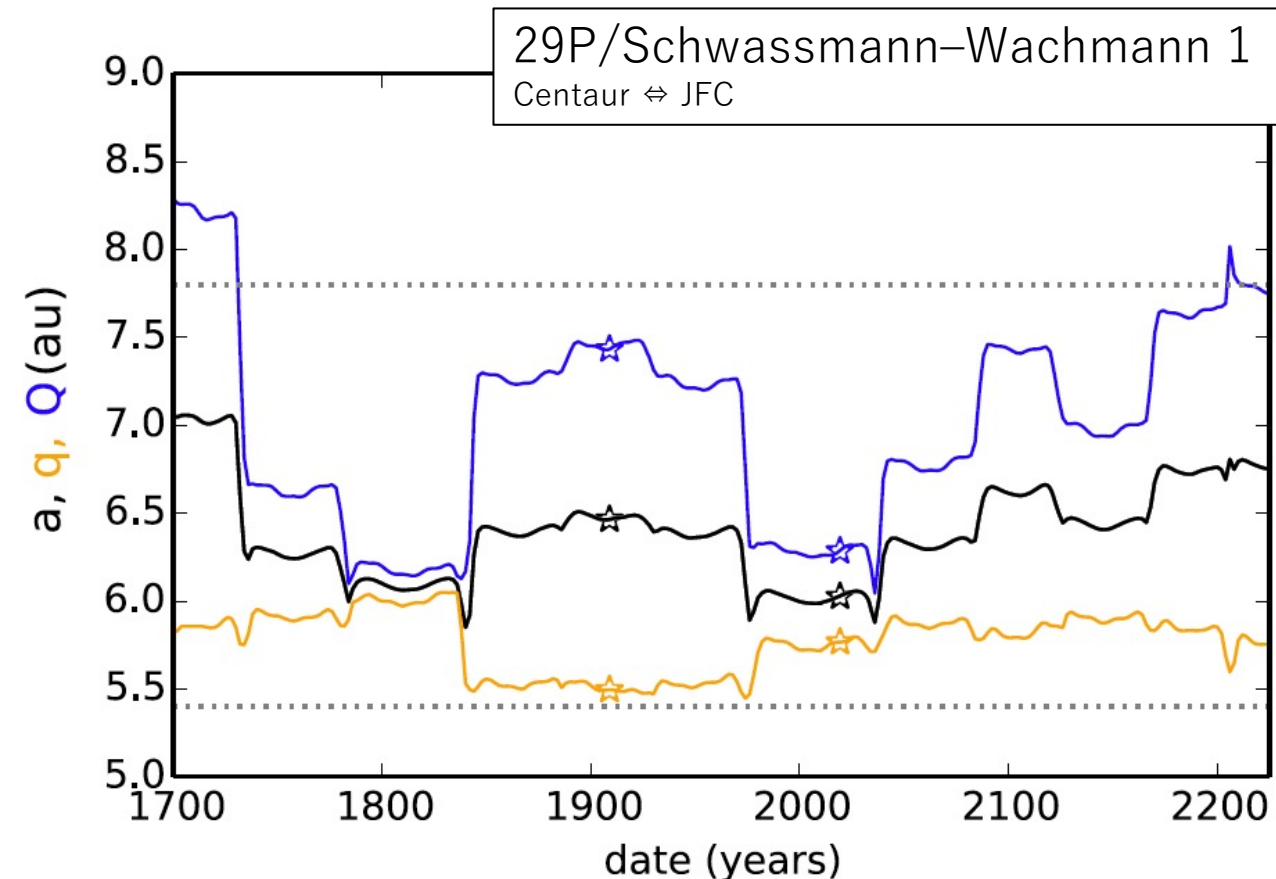


Figure 4. Short-term orbital evolution of SW1’s semimajor axis a (black line), perihelion q (gold line), and aphelion Q (blue line). The dashed horizontal lines denote our JFC Gateway region. SW1’s orbit significantly changed due to a Jupiter conjunction in 1975, and it will change again soon in 2038 due to another conjunction with Jupiter. The stars show SW1’s observed orbits in 2019 and in 1908.

以下は補遺

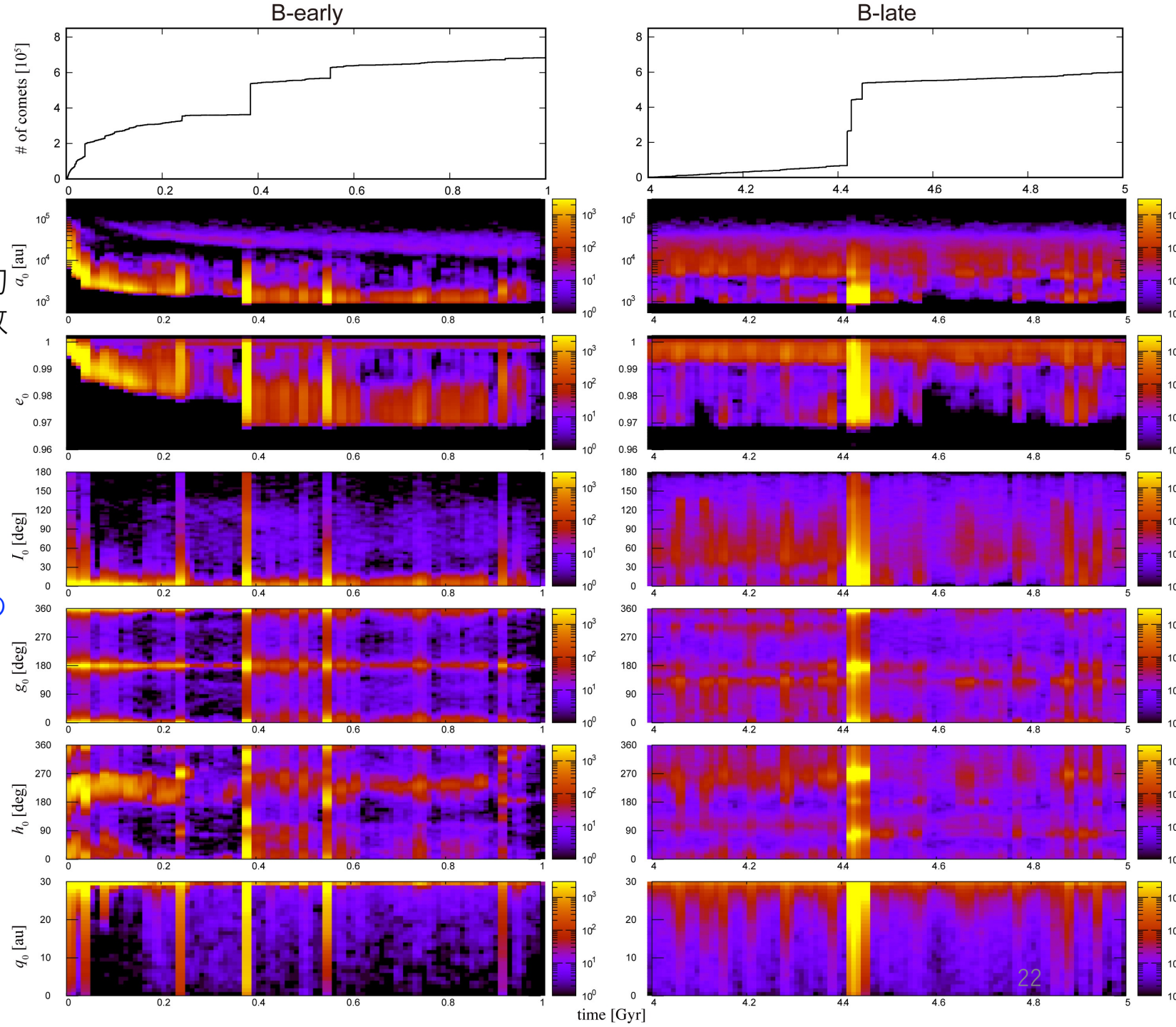
- ここまでは恒星セットAから得られた結果であった。以下からは恒星セットBを用いた計算から得られた同様な図を示す。
- 両者に本質的な差異は無いが、時期B-lateに現れる強い彗星シャワー($t \sim 4.4$ Gyr)の効果が見える。
 - p. 22, p. 24を参照

新彗星の発生

最上段は各時期の新彗星の累積的発生状況。どの時期にも同様な数の新彗星を人為的に発生させた(初期の彗星雲の個数を増やす)。60-80万天体 / 各10億年。

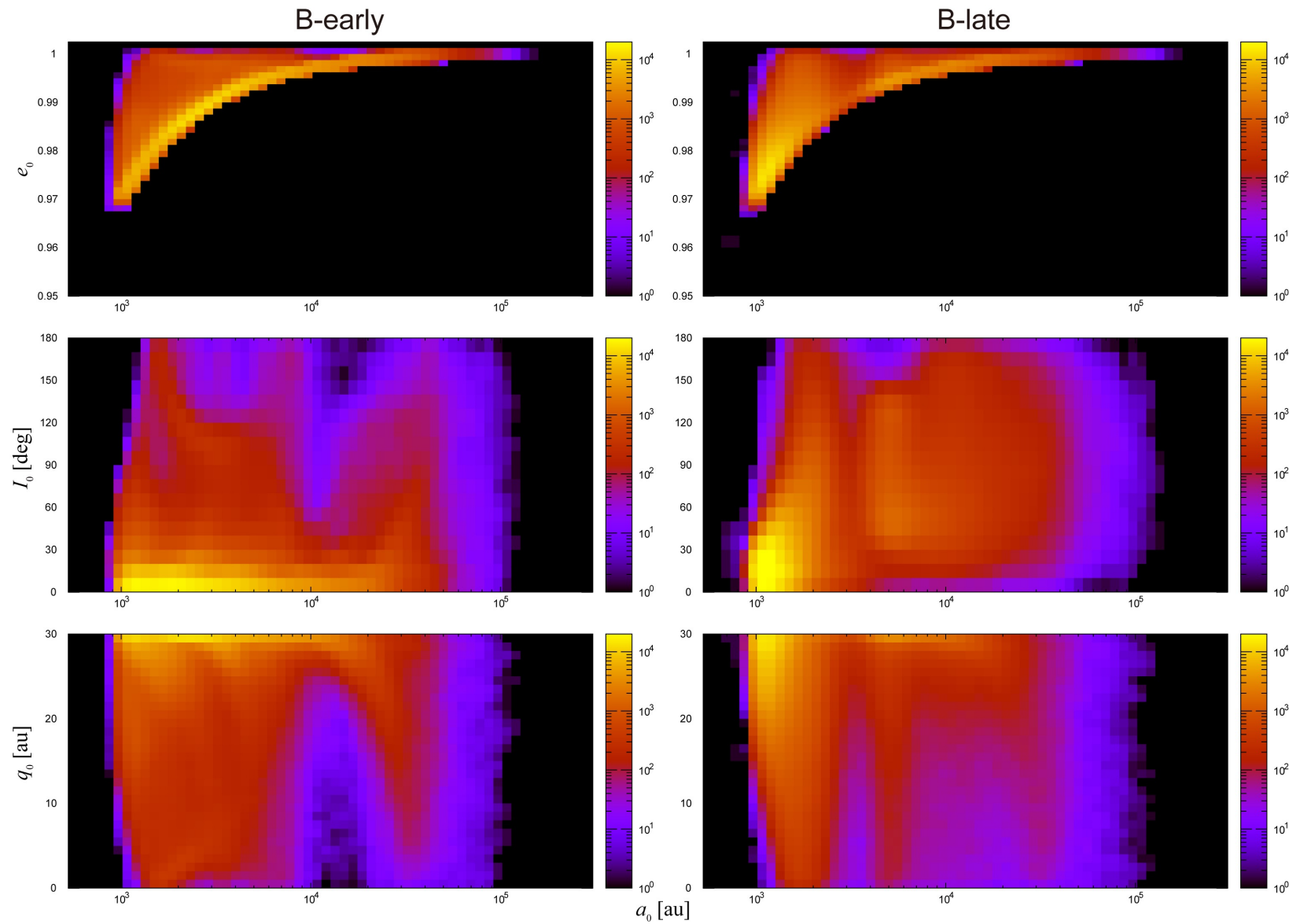
B-lateに於ける $t = 4.4$ Gyr の強い彗星シャワーが目立つ。彗星シャワーが発生すると多くの彗星が黄道面に沿って飛来する。これは以下の理由による。

- 彗星の個数密度の高い領域がシャワーの発生源となる
- それはオールト雲の内側である
- 内側は銀河潮汐力の影響が弱いため、数十億年が経過しても彗星が黄道面付近に集中している
- よって飛来する彗星も黄道面にそうものが多くなる



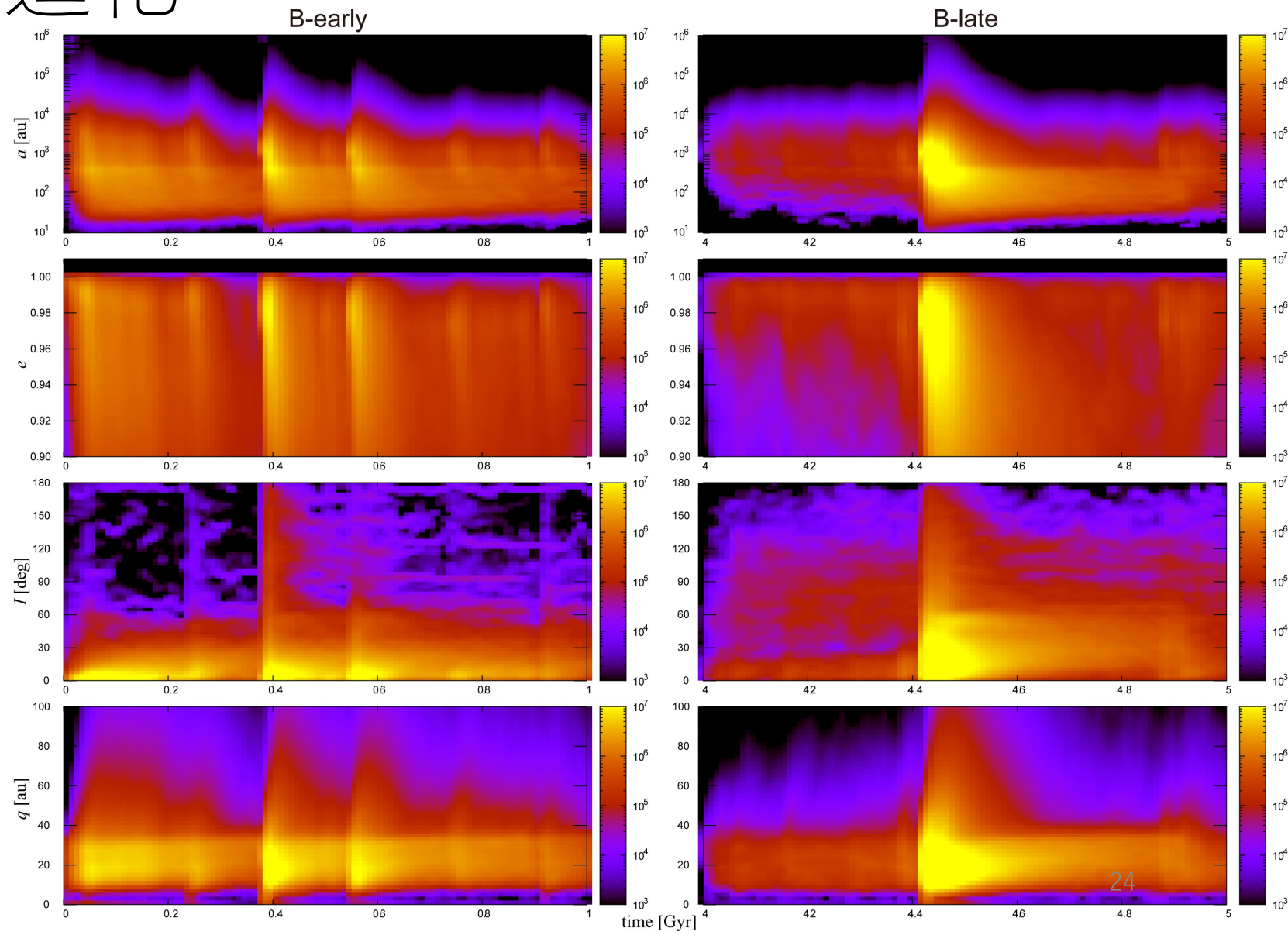
新彗星の発生

各時期に発生した新彗星の
軌道要素分布の相互関係。
カラーバーは対数で、強調気味。



新彗星の軌道進化

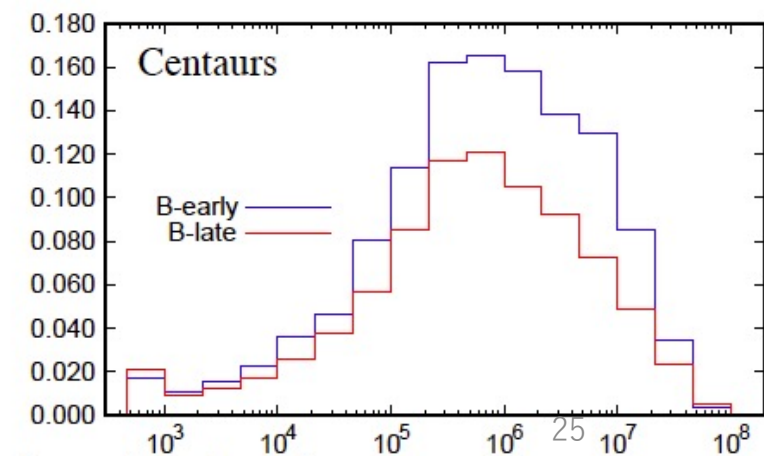
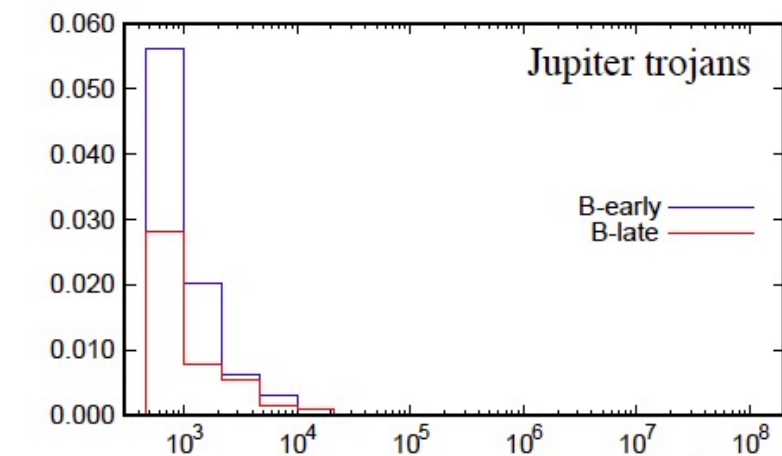
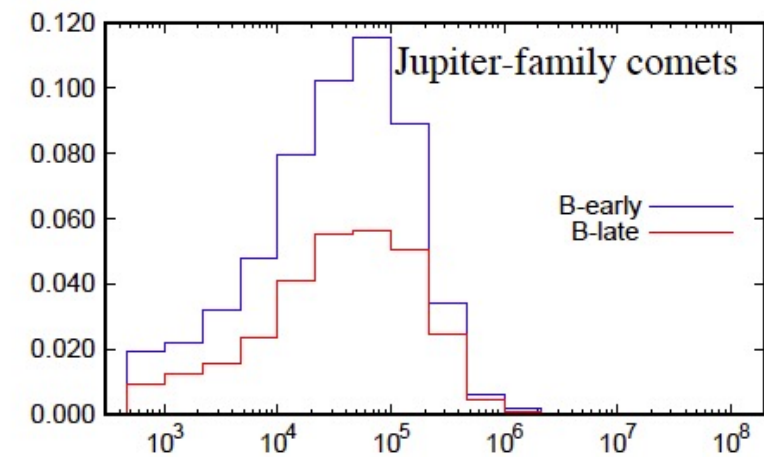
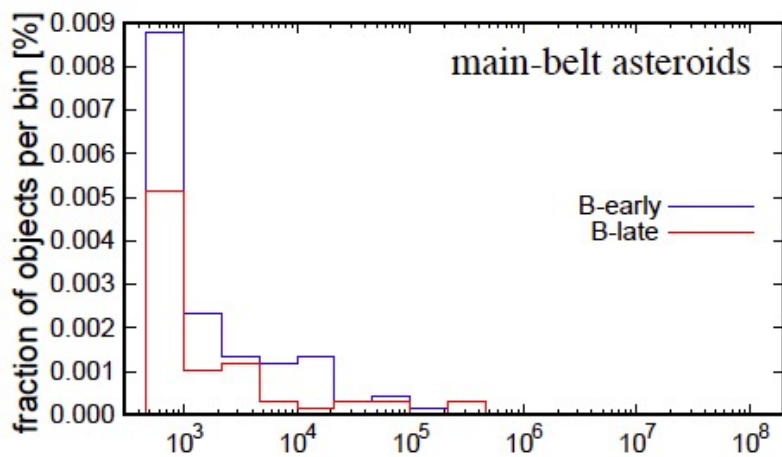
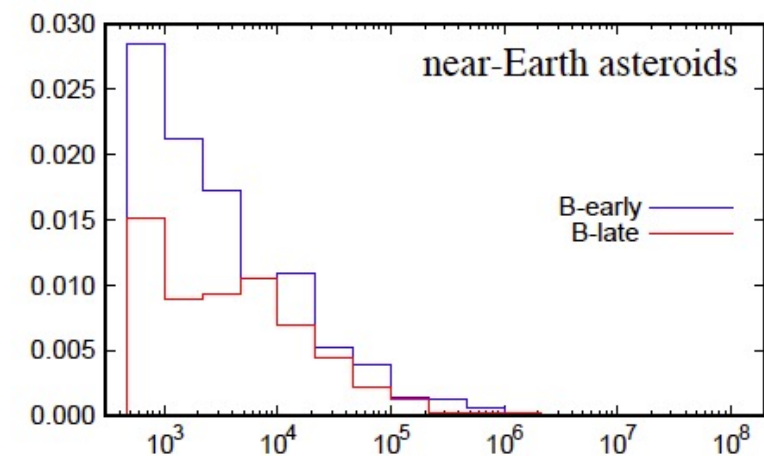
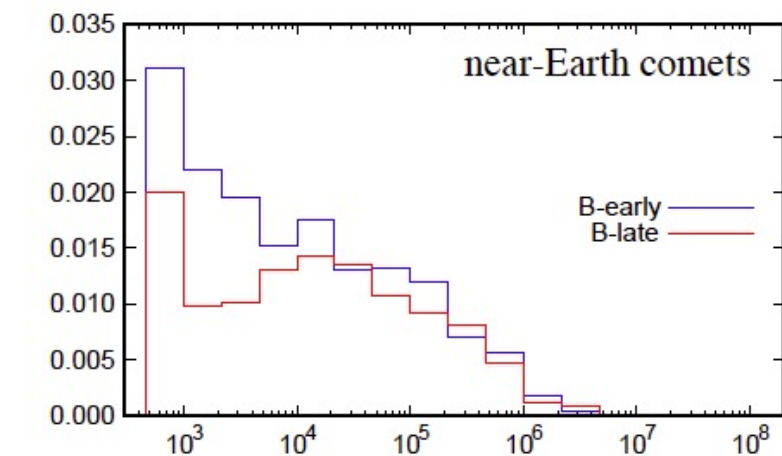
右図は新彗星の各軌道要素の
 頻度分布の進化。即ち新彗星
 の発生・軌道進化・消滅の
 効果を表す時系列となる。
 色バーは対数で、強調気味。



各集団内での 彗星の滞在時間 1

縦軸は全計算期間に発生した新彗星に対する比率(%)

- 例. 全計算期間の新彗星数が 10^6 個なら
- あるbin値=0.01% → 100個

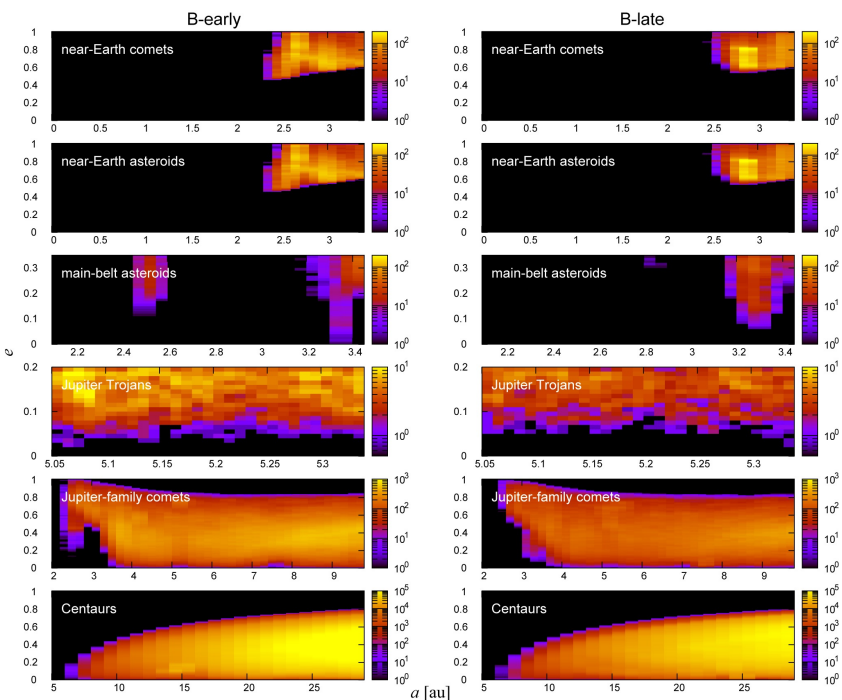


- 恒星セットAを使った結果と本質的な違いは無い
- B-earlyとB-lateの差異がA-earlyとA-lateの差異に比べて有意に小さい
 - B-lateに於ける $t = 4.4$ Gyr の強い彗星シャワーの効果(黄道面に沿って多数の彗星が飛来した)
 - p. 22, p. 24を参照

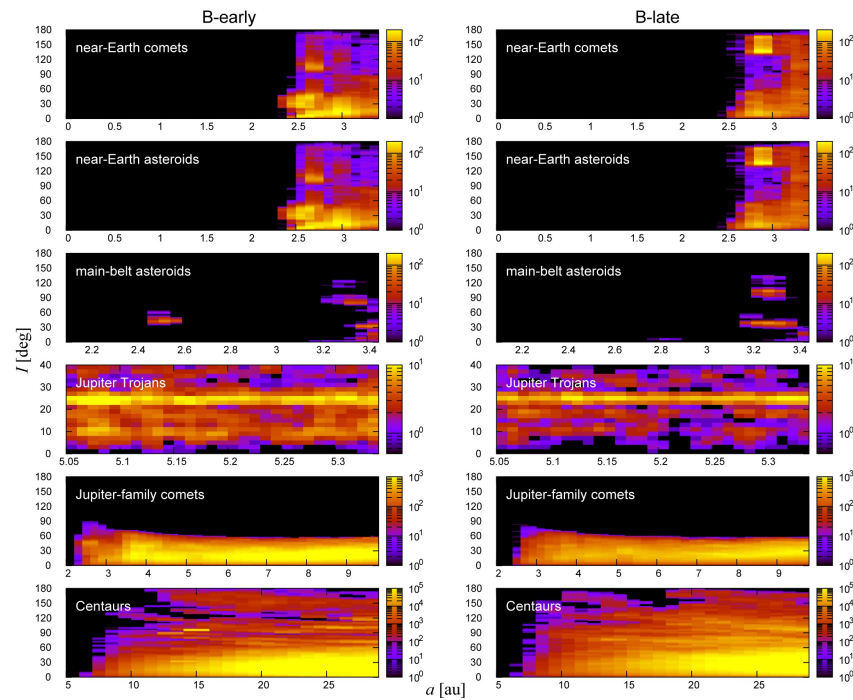
resident time in each population [years]

軌道要素空間での分布 (全期間(10^9 年)の積分)

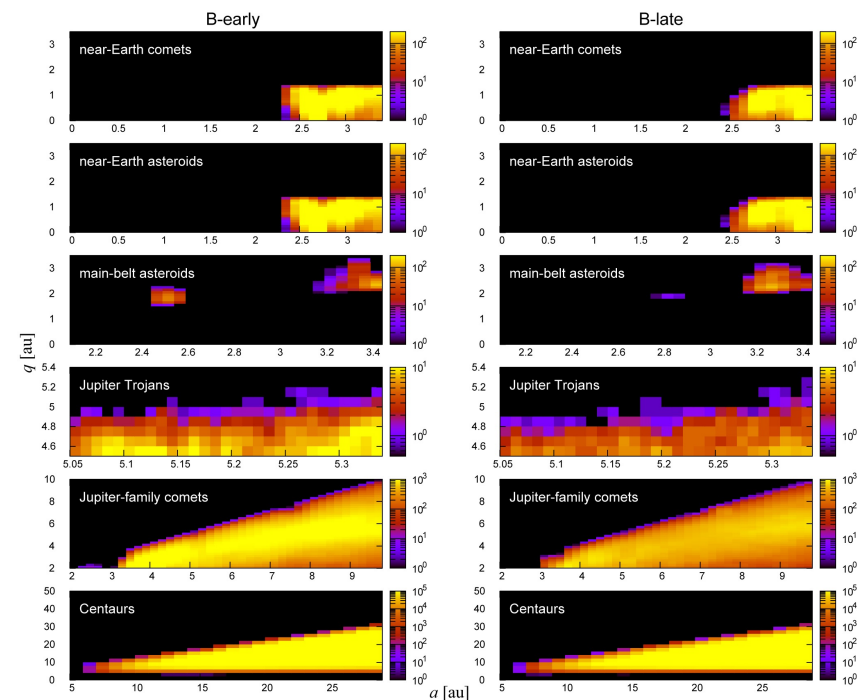
(a, e)



(a, I)



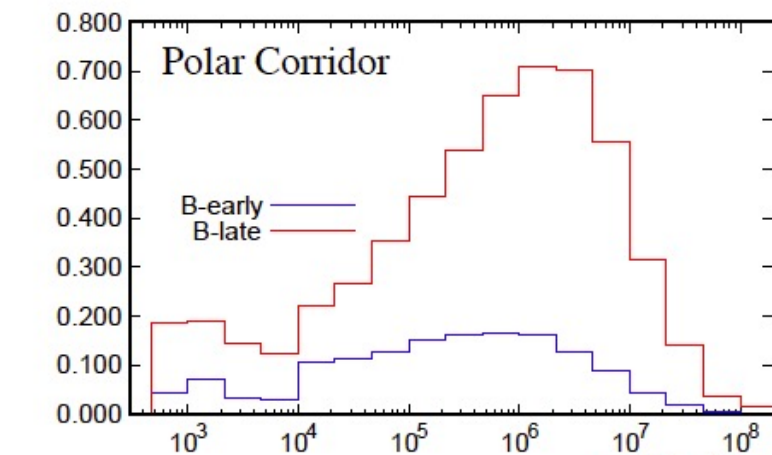
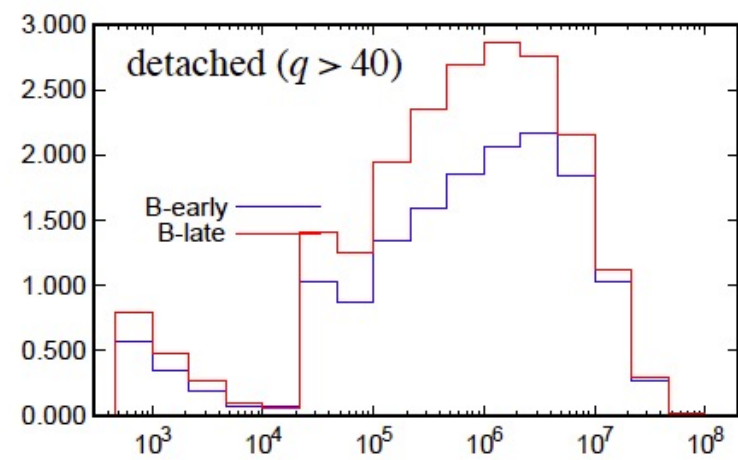
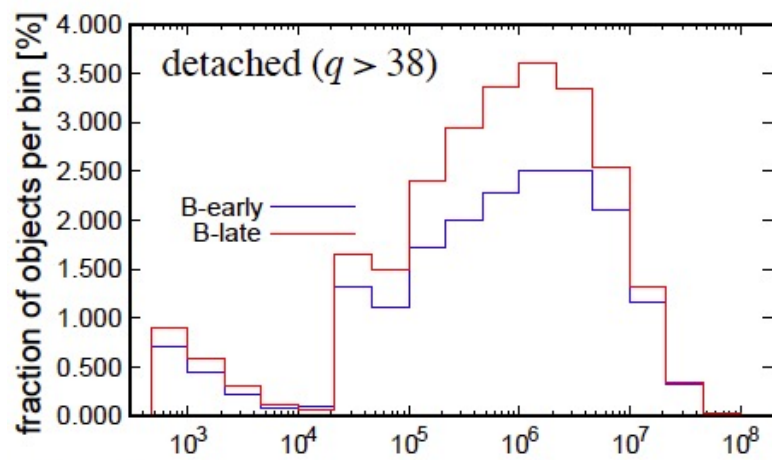
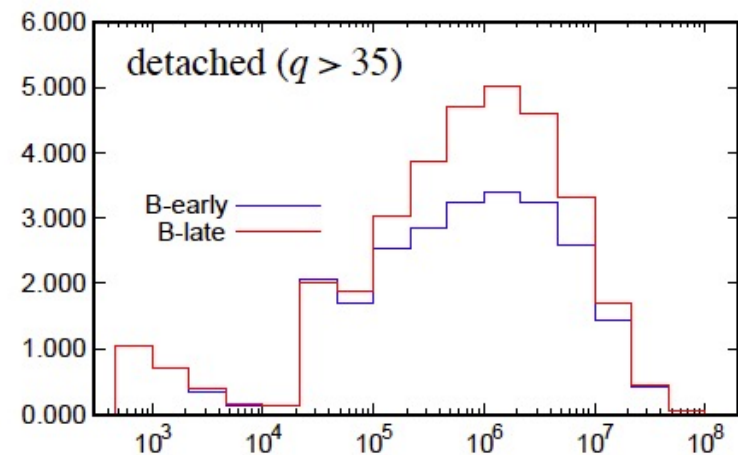
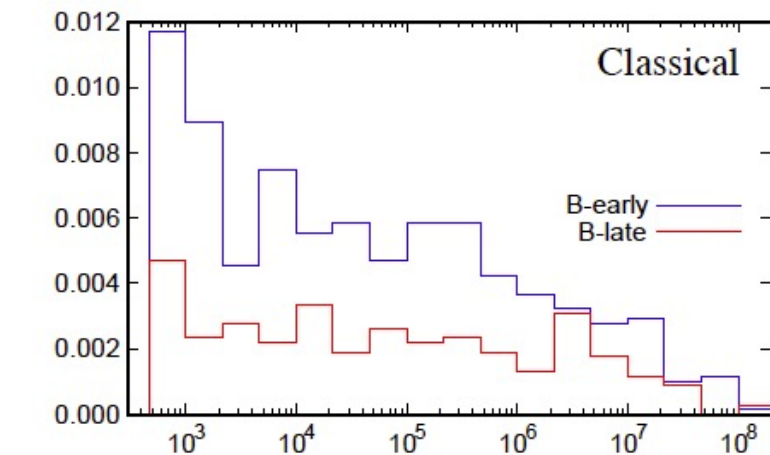
(a, q)



各集団内での 彗星の滞在時間 2

縦軸は全計算期間に発生した新彗星に対する比率(%)

- 例. 全計算期間の新彗星数が 10^6 個なら
- あるbin値=0.01% → 100個



resident time in each population [years]

- 恒星セットAを使った結果と本質的な違いは無い
- B-earlyとB-lateの差異がA-earlyとA-lateの差異に比べて有意に小さい
 - B-lateに於ける $t = 4.4$ Gyr の強い彗星シャワーの効果(黄道面に沿って多数の彗星が飛来した)
 - p. 22, p. 24を参照

軌道要素空間での分布 (全期間(10^9 年)の積分)

(a, e)

(a, I)

(a, q)

