

# オールト雲起源新彗星の力学進化 - 新彗星の最小近日点距離分布 -

An estimate of the dynamical lifetime of the Oort Cloud new  
comets in the planetary region  
- Distribution of their smallest perihelion distances -

○伊藤孝士<sup>1</sup>, 樋口有理可<sup>2</sup>

<sup>1</sup>[国立天文台 CfCA/ADC](#), <sup>2</sup>[産業医科大学医学部](#)

# コアタイムでの議論 – zoom利用

以下の時間帯に著者がzoom会議内で対応いたします。

本研究に関心をお持ちの方はぜひご参加ください。

(1) 2020年11月12日(木) 18:00頃-20:30 JST

- ミーティングID: 898 0992 5623
- パスコード: [秋季講演会プログラムhtml形式をご覧ください\(P-D1-A1\)](#)

(2) 2020年11月14日(土) 21:00頃- JST

この日は遅い時間帯のみが可能なので、議論を希望される方がいる場合のみ開催します。

希望される方は以下までメールでお知らせください。 [tito@cfca.nao.ac.jp](mailto:tito@cfca.nao.ac.jp)

## ⚠️ お願い

このファイルに記された内容は未だ出版されていません。現在論文を鋭意執筆中ですので、このポスターPDFファイルの印刷や転載、二次配布等は控えて頂きますよう、皆様に強くお願いを申し上げます。



標識：無断ダウンロード禁止

Sign : Do not download without permission.

標識：擅自下载禁止。

표지 : 무단 다운로드 금지.

Designed by Nico-Mania

<http://commons.nicovideo.jp/material/nc116793>

# 摘要 / abstract

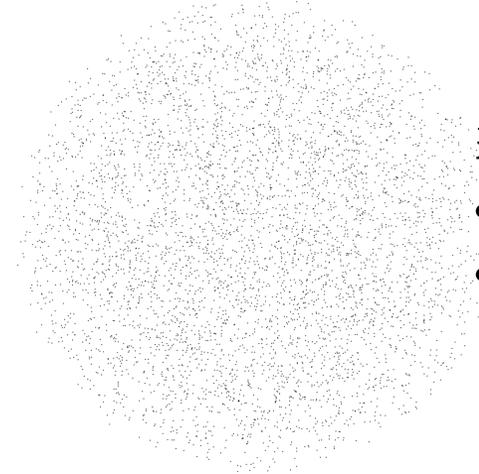
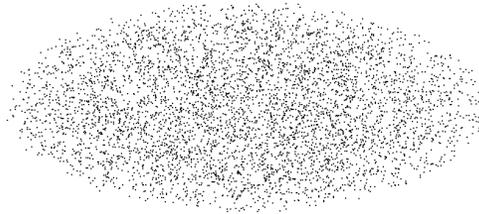
本研究ではこれまで、オールト雲の成長と同時進行で惑星領域に落ちて来る新彗星の軌道進化を数値実験により追い掛けて来た。現時点までに以下の事柄が分かりつつある。(1) 惑星領域へ突入後の新彗星の力学的寿命は $10^7$ 年の程度に留まる。(2) 新彗星が平面的に飛来する場合にはいわゆる惑星バリアが有効に働く。今回は上記の(2)、特に新彗星の近点距離の最小値の分布について報告する。惑星バリアを「新彗星の最小近点距離の分布に於いて或る軌道領域に極大値を作り出す作用」と定義すれば、その作用程度には新彗星の軌道要素への依存性があることは容易に想像できる。私達の実験結果によれば、惑星バリアは軌道半長径の小さな新彗星に対してより効果的であることが示された。このことは軌道半長径が小さい、即ち内側オールト雲から来る天体は軌道傾斜角が小さく、惑星と容易に相互作用し得ることから納得される。そして予想通り、軌道傾斜角が小さな新彗星は惑星バリアの影響を強く受け、最小近点距離の分布は土星軌道のすぐ外側に極大値を持つ。興味深いのは逆行する新彗星(軌道傾斜角  $I > 90$ 度)であり、惑星バリアの影響をほぼ受けない。これは、逆行天体は摂動天体との遭遇速度が大きいため相互作用は順行天体よりも弱いという既知の事実と整合的ではある。

# 本研究で行われる物事の概要

- オールト雲の進化から惑星領域への新彗星落下・その後の放出までを数值的にモデル化する

## 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 OCNCs ( $q < 30$ au and $r < 30$ au)

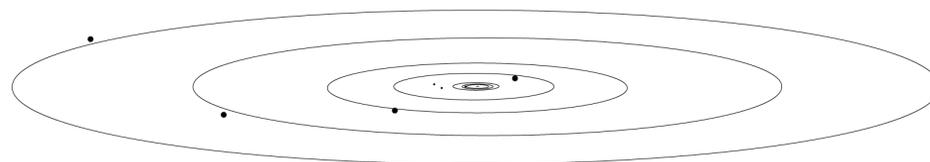
- Their orbit information is transferred into the following model
- Orbital positions are rewinded back at  $r = 800$  au for the transfer

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

## Interaction with planets

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

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



- 新彗星の軌道進化
- 惑星による摂動

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

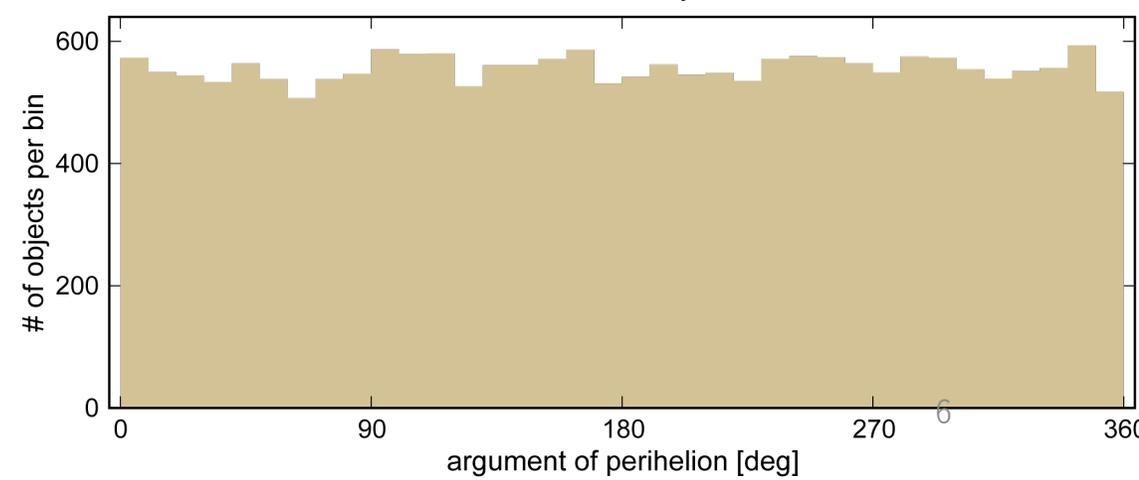
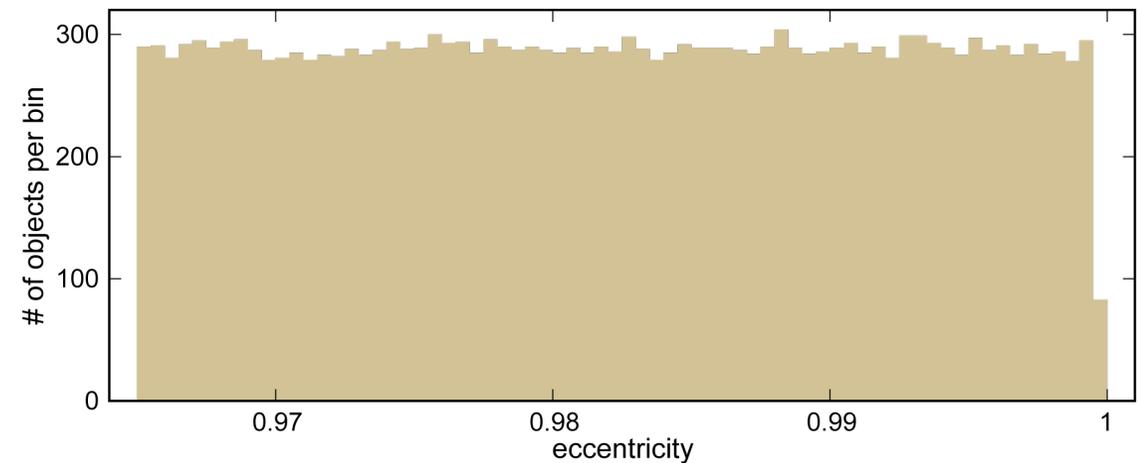
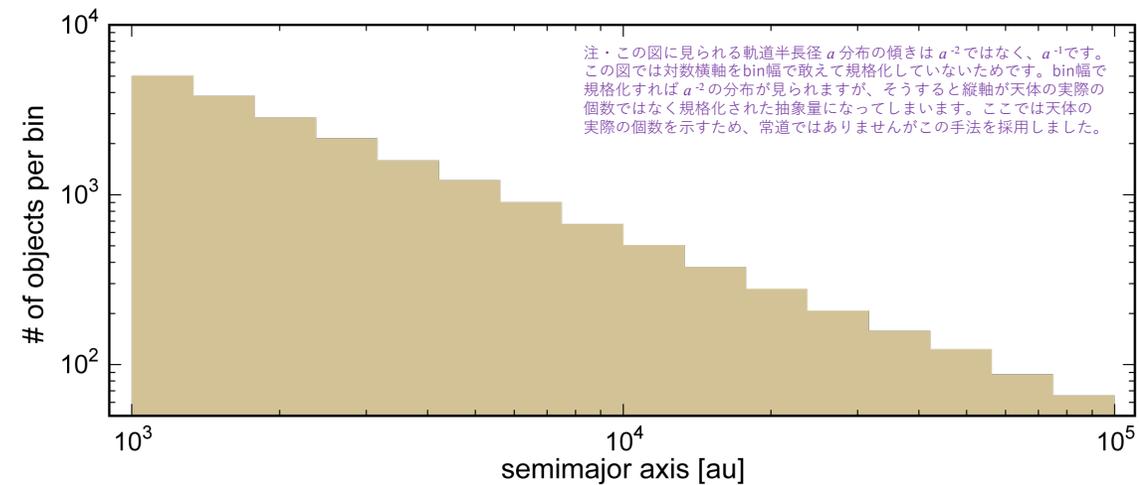


Ejected

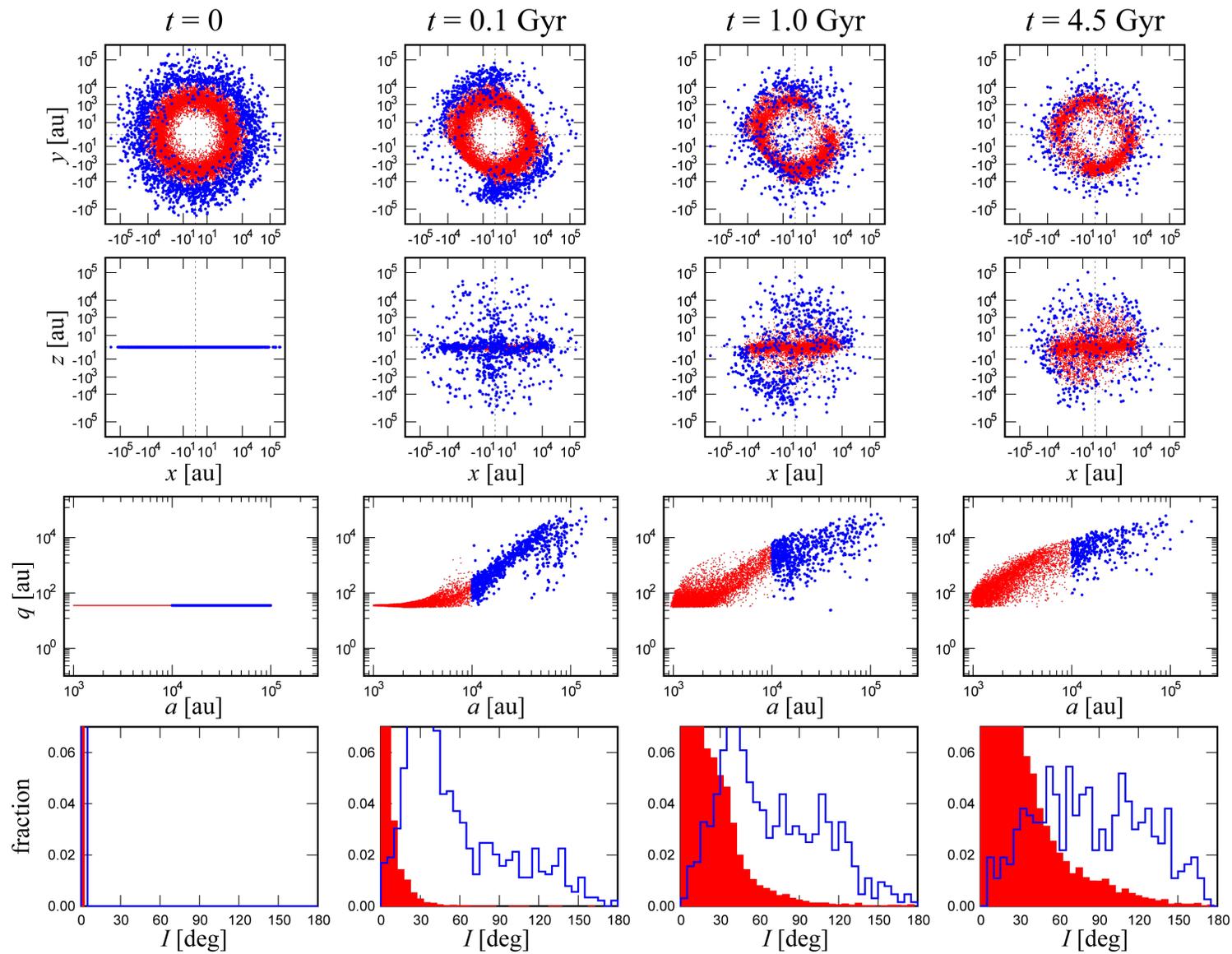
# 彗星雲が初期に含む天体の軌道分布

- 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



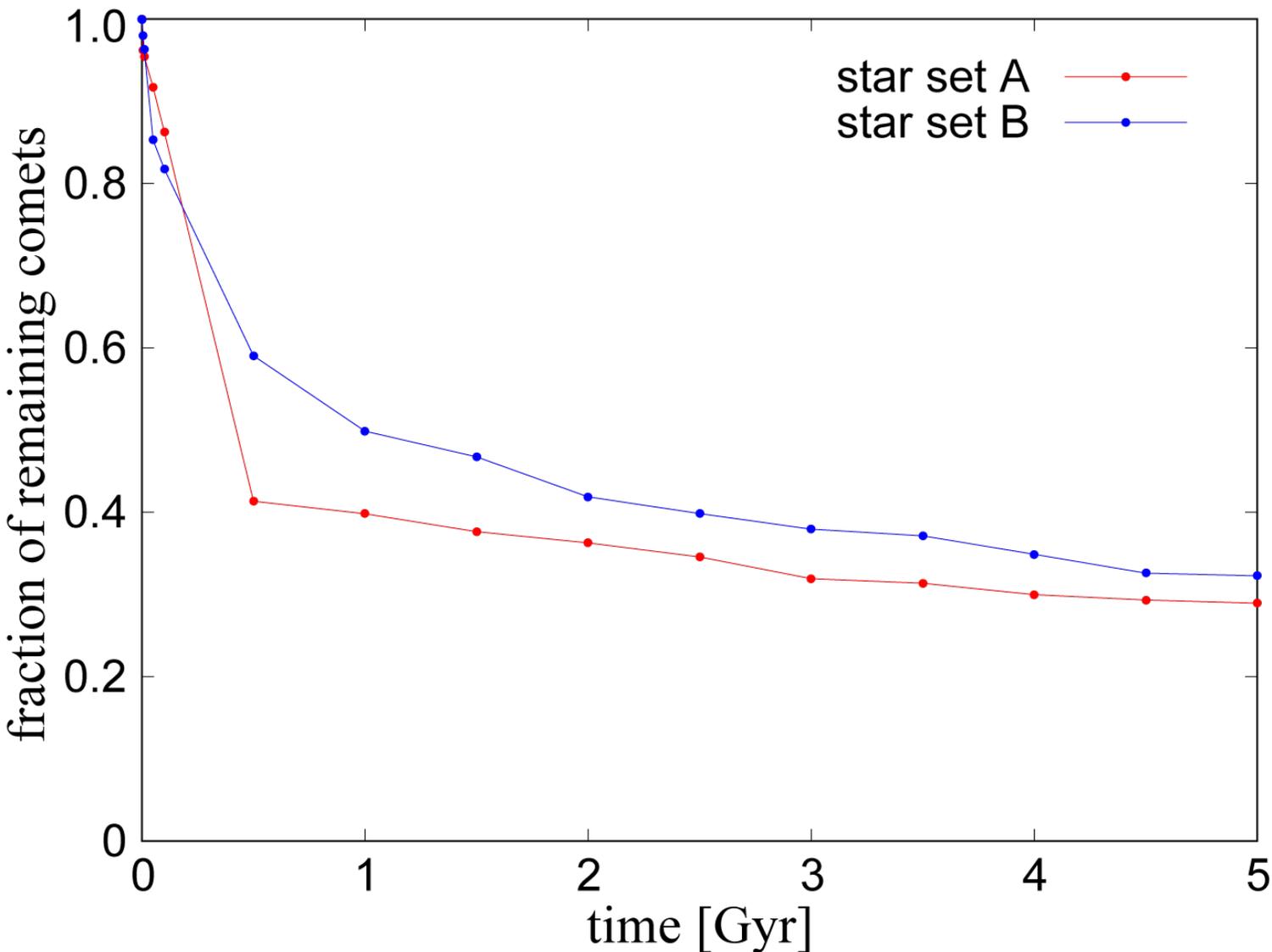
- 初期状態は完全な平面分布
  - 散乱された微惑星円盤
- これに摂動を加える
  - 銀河潮汐力
  - 恒星の接近遭遇
- 10億年スケールの形状変化
  - 等方化

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

- 天体が多数落下する
  - 近点距離  $q < 30$  au
  - 新彗星 (OCNCs)  
 “Oort Cloud 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 (OCNCs = Oort Cloud New Comets) 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% (更に少ない場合もある)が  
新彗星として惑星領域に落下する。定義は以下

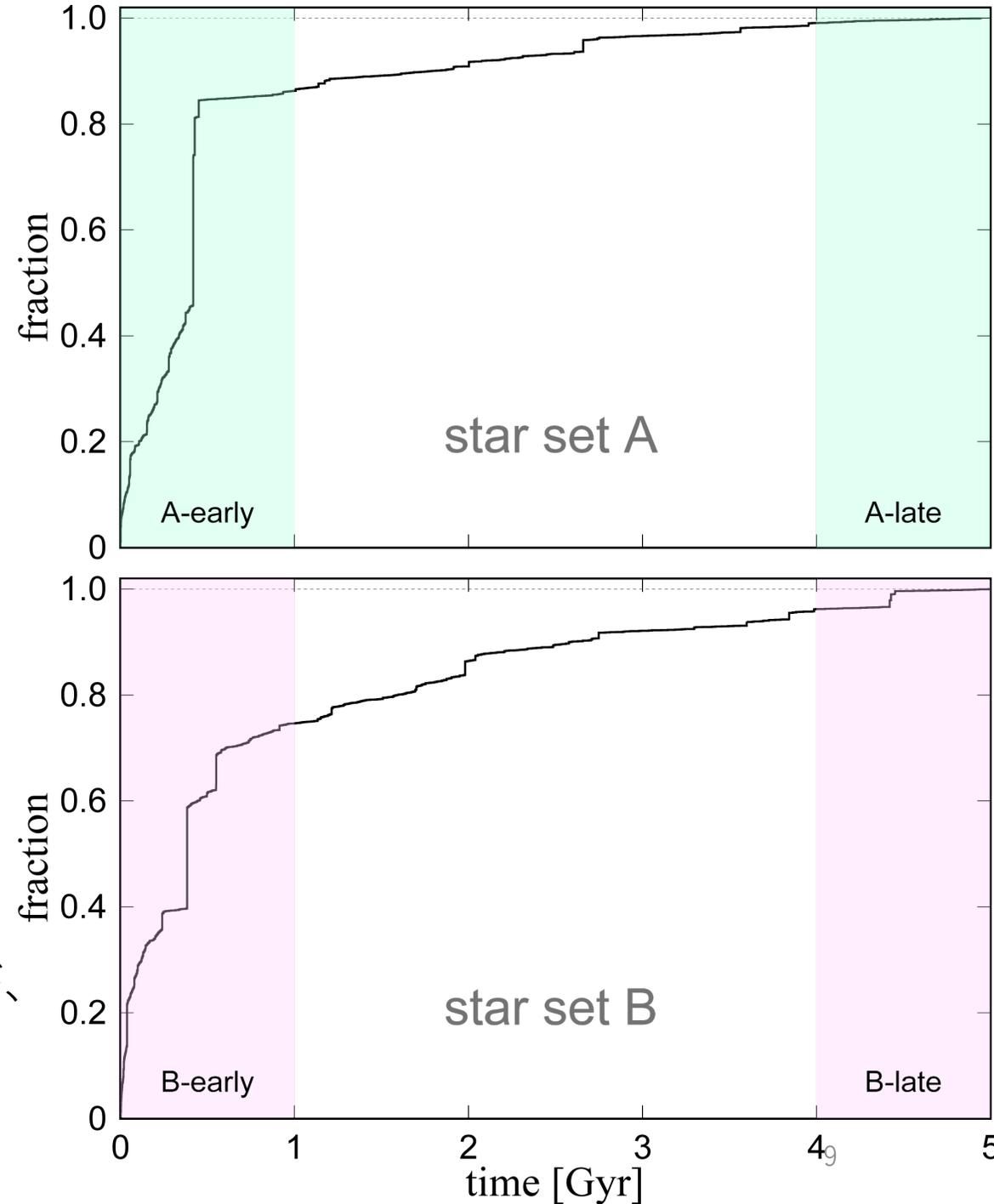
- 近日点距離  $q < 30 \text{ au}$  且つ 日心距離  $r < 30 \text{ au}$

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 $2 \times 2 = 4$ 種類の時期に着目する。

- **A-late, B-late** : 彗星雲が既に等方的な10億年間。  
現代に近い。
- **A-early, B-early** : 彗星雲がまだ平面的な10億年間。  
太陽系の初期に相当する。

A-late, B-lateに於いて新彗星の発生率は少ないが、  
B-late では時刻 4.4 Gyr 頃に強い彗星シャワーが  
発生している。これは特定の恒星が太陽系に  
著しく接近したためである。

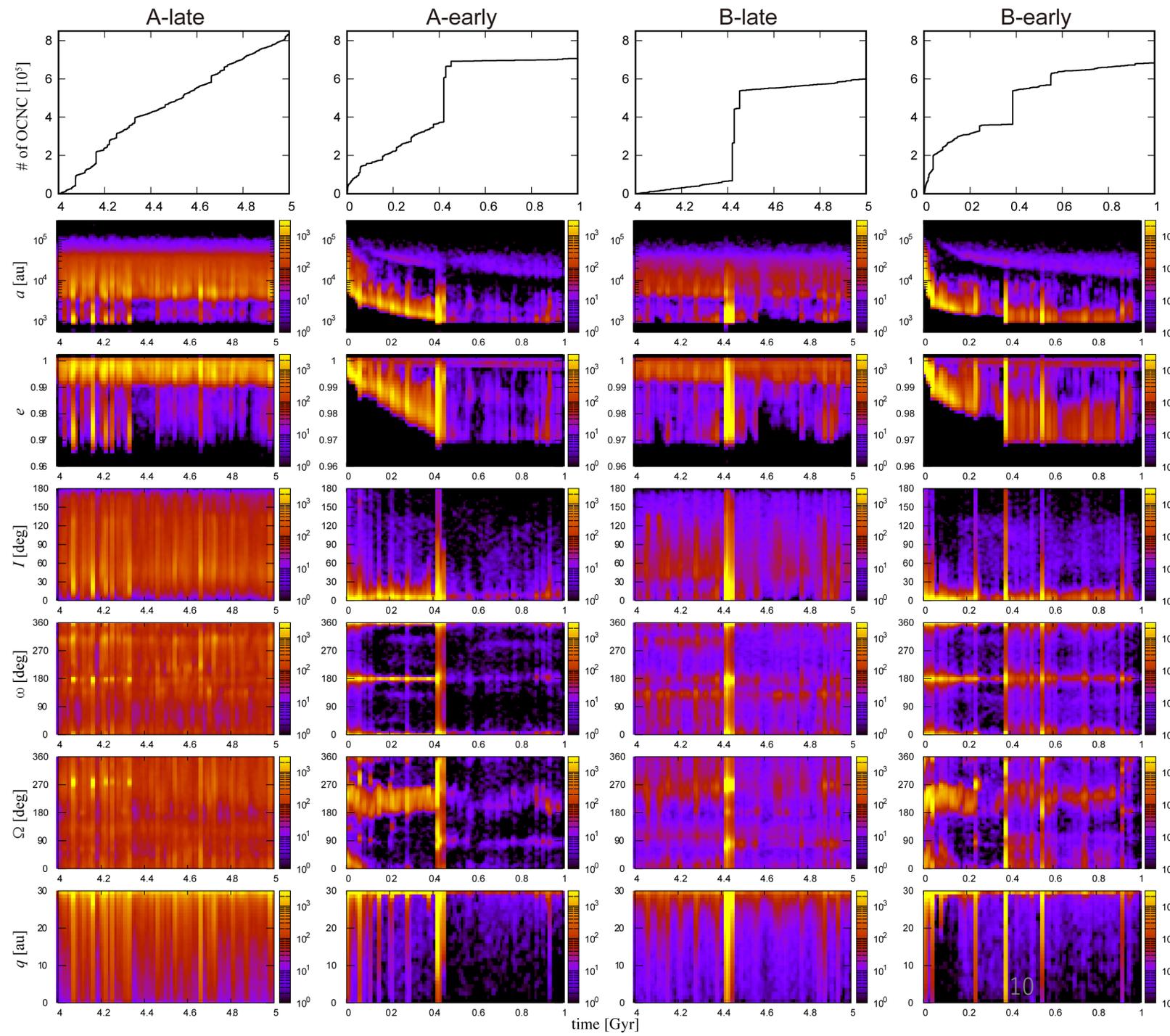


# 新彗星の発生

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。

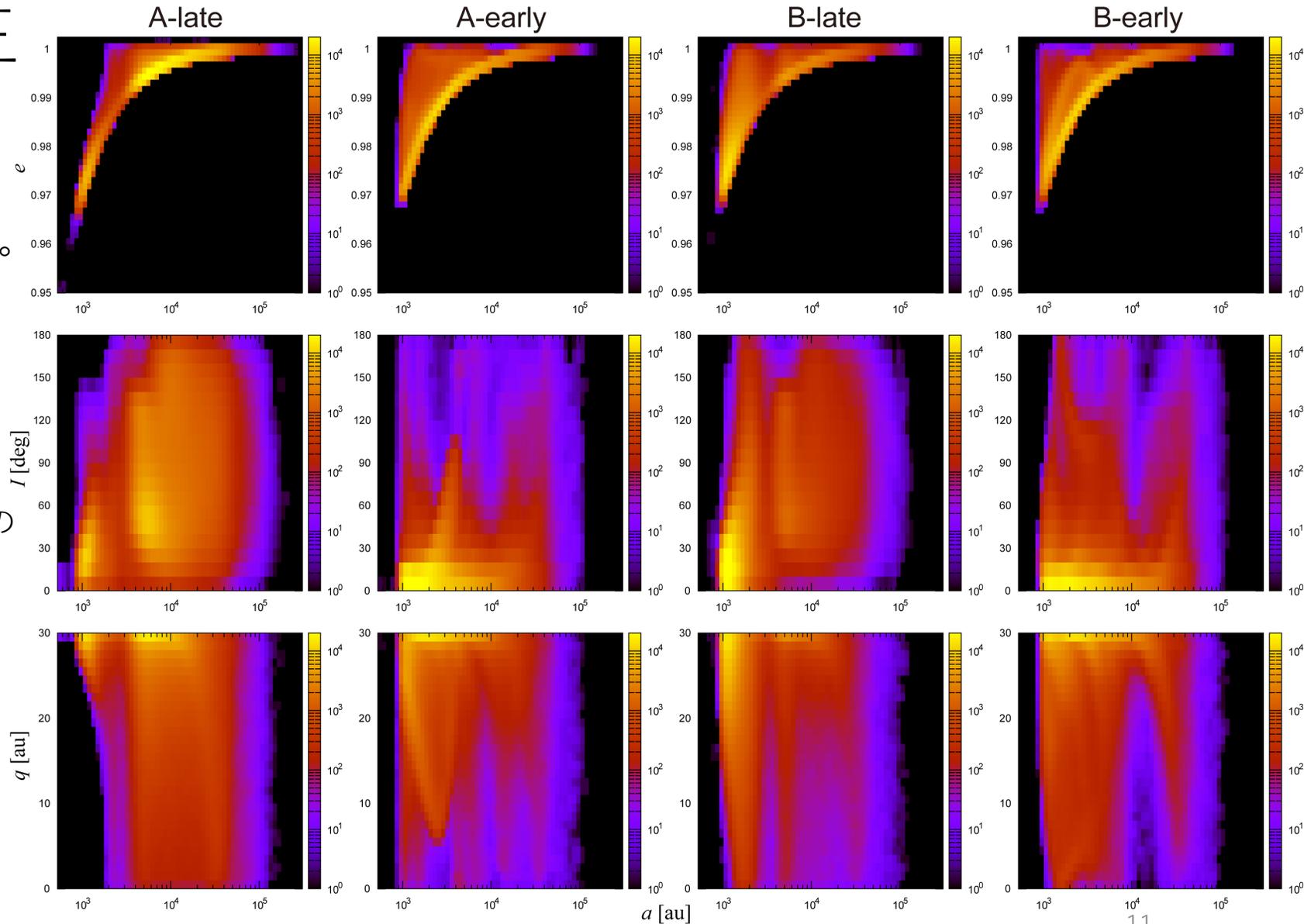
- 軌道半長径  $a$
- 離心率  $e$
- 軌道傾斜角  $I$
- 近点引数  $\omega$
- 昇交点経度  $\Omega$
- 近点距離  $q$



# 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。但し B-late は  $a \sim 10^3$  au かつ  $I < 30$  度の天体がとても多い。これは時刻  $\sim 4.4$  Gyr にて発生した彗星シャワーの影響が強いため。
- 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。言い換えればその定義(p. 8)に強く依存する。

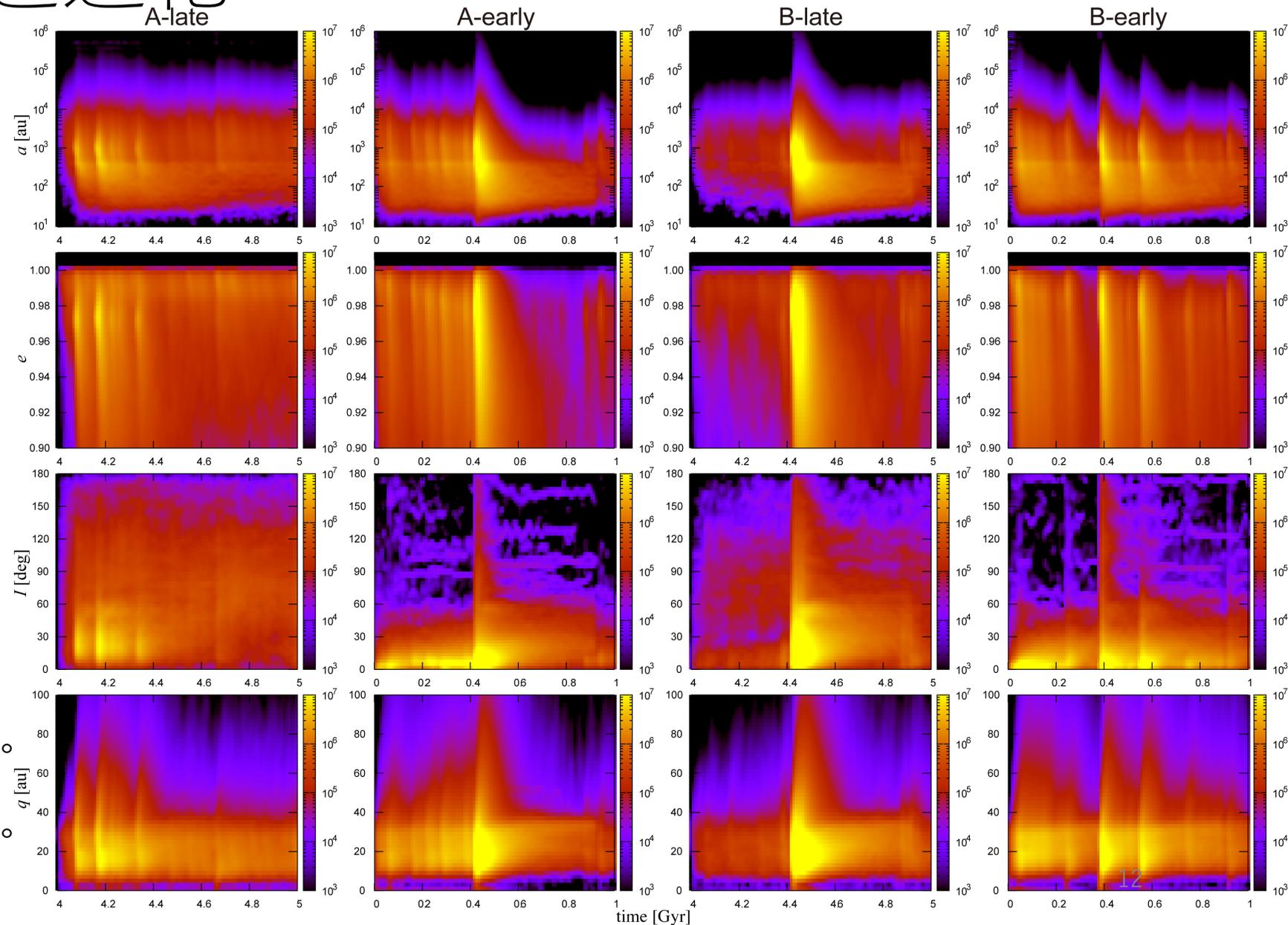


# 新彗星の軌道進化

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。特に B-late の時刻 ~4.4 Gyr で発生したものは強烈である。



# 惑星領域に於ける新彗星の滞在時間

惑星摂動を受けた新彗星が以下の条件を満たせばそれは放出されたと看做され、計算から取り除かれる。

- 日心距離  $r = 800 \text{ au}$  に於いて、 $e > 1$  または  $Q > 200,000 \text{ au}$  となった時

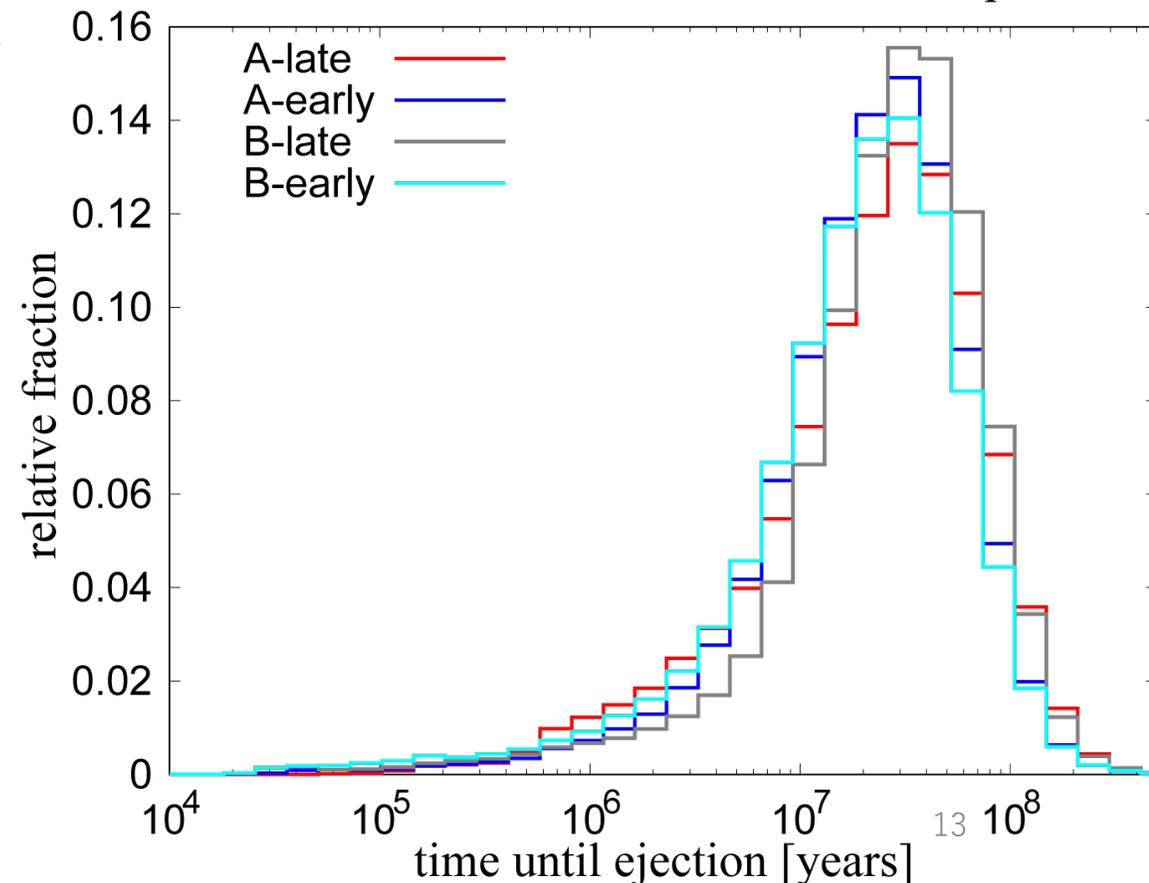
計算の最終的な段階では99%以上の新彗星が上記の条件を満たして取り除かれた。

後者 ( $Q > 200,000 \text{ au}$ ) は当該彗星が太陽系を離れ、他の恒星の影響下に入ったとするもの ( $2 \times 10^5 \text{ au} \sim 1 \text{ pc}$ )。

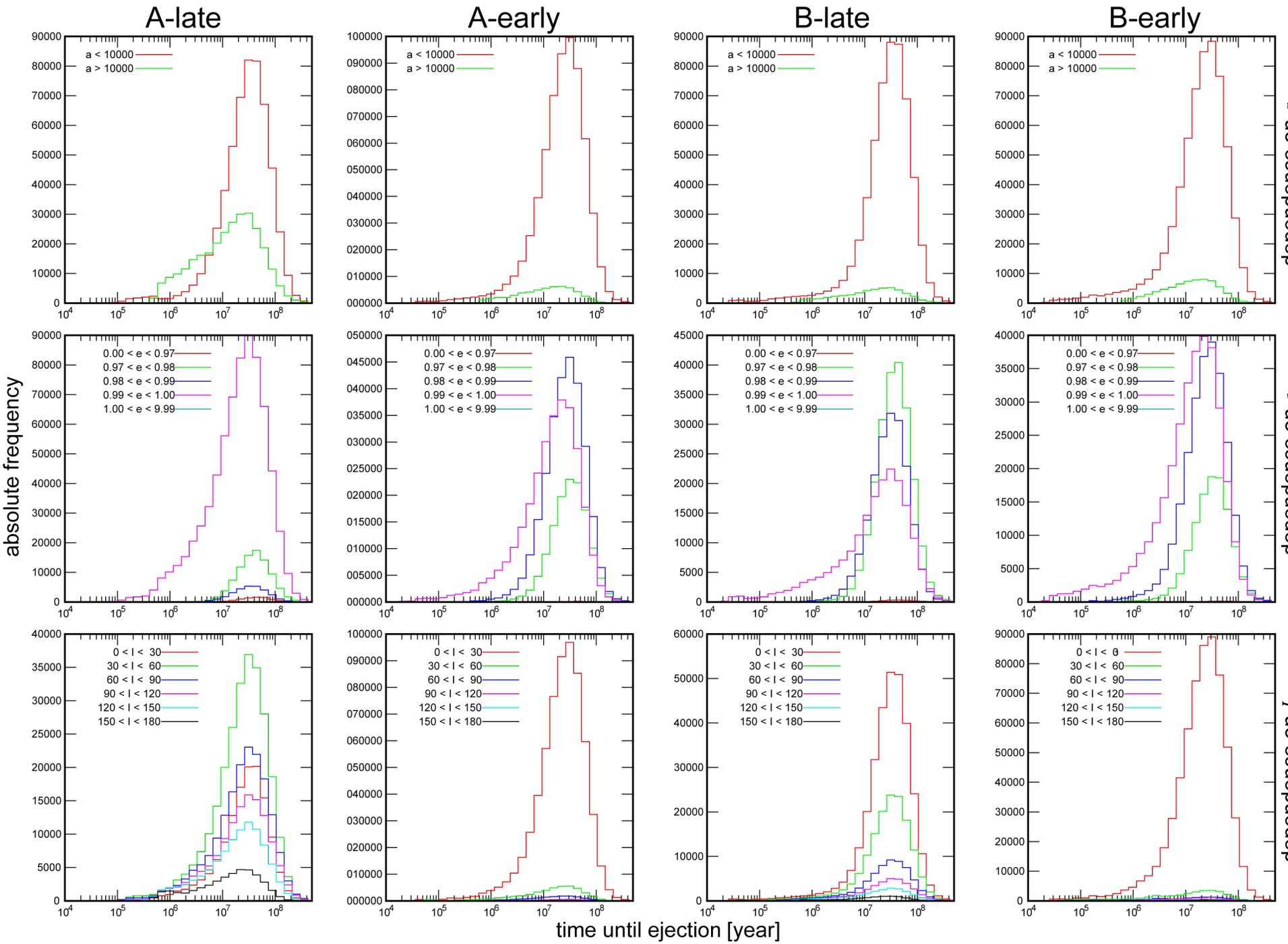
今回の計算では放出された新彗星の~16%がこれに該当。

右図：新彗星が発生（惑星領域に突入）してから上記の条件を満たして取り除かれるまでの滞在時間。各時期について積分値が1となるよう規格化済み。

- 4種の時期 {A,B}-{late,early} いずれに於いてもほぼ同じ分布である。これはp. 10に示した初期の  $(a, e), (a, q)$  分布が類似であり、滞在時間は基本的にこれらの初期要素が支配するからだと考えられる。
- 各時期で新彗星の初期  $(a, I)$  分布は異なるが(p. 10)、滞在時間への影響は小さい。このことから、新彗星の滞在時間分布を決めるのは  $(a, e)$  もしくは  $(a, q)$  の初期値、そして彗星雲内での元々の天体分布であることが言える。



# 初期の軌道要素への 滞在時間の依存性 (規格化無し)



この図を見ても実は  
余りよく分からない。  
どの軌道要素の天体が  
多い/少ないかは見える。

どの時期でも**初期に**  
双曲軌道( $e > 1$ )に乗る  
新彗星は数が少なすぎ、  
この図では目視が困難。  
p. 14の図と併せて見よ。

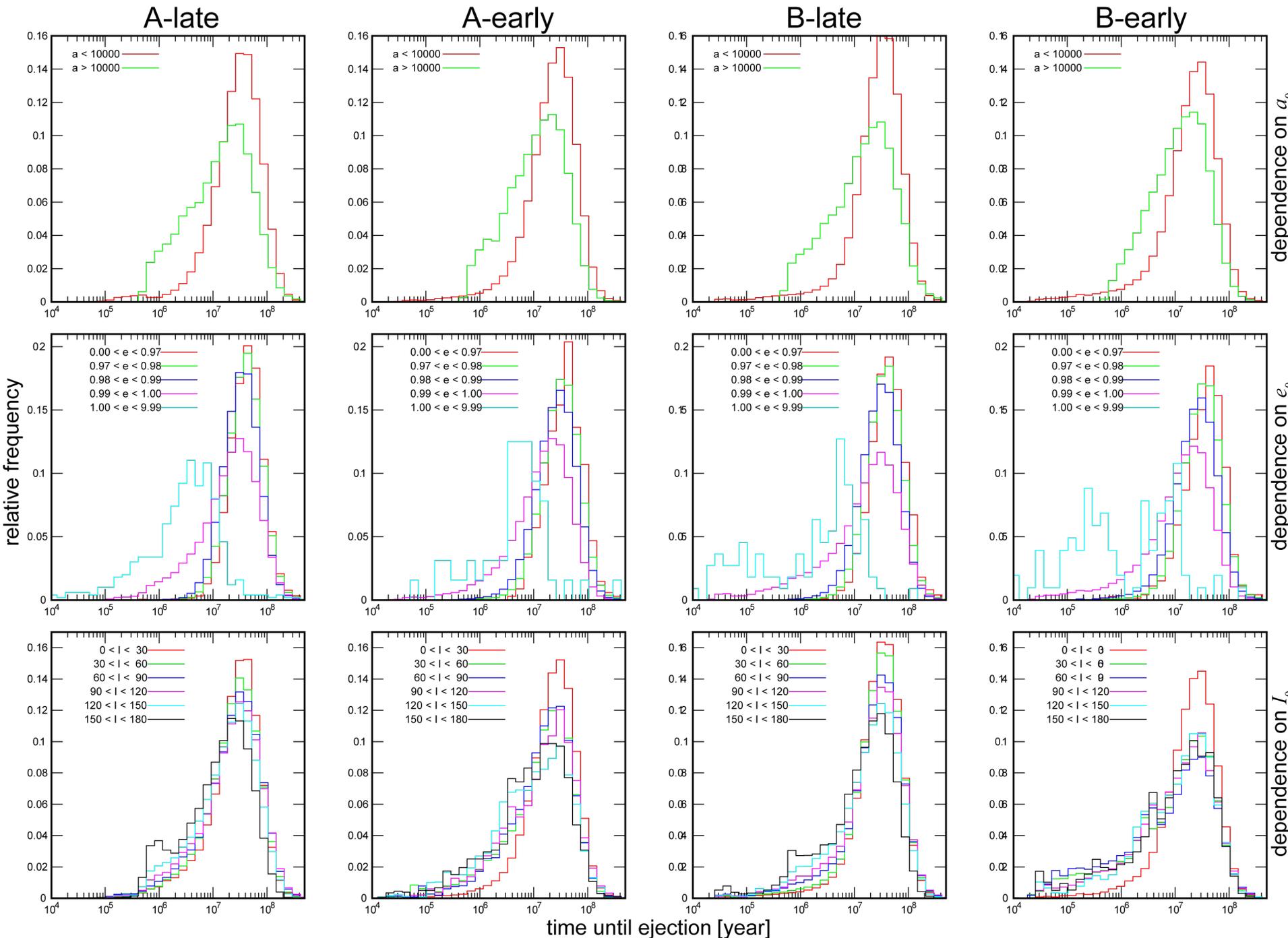
# 初期の軌道要素への 滞在時間の依存性 (規格化有り)

そこその傾向が見える。

- 初期軌道半長径が大きいと
- 初期離心率も大きい
  - 早めに放出される傾向

軌道傾斜角への依存性は  
小さい

- 発生時期にも依存しない
- 新彗星の滞在時間は  
初期( $a, e$ )または( $a, q$ )分布が  
ほぼ決める



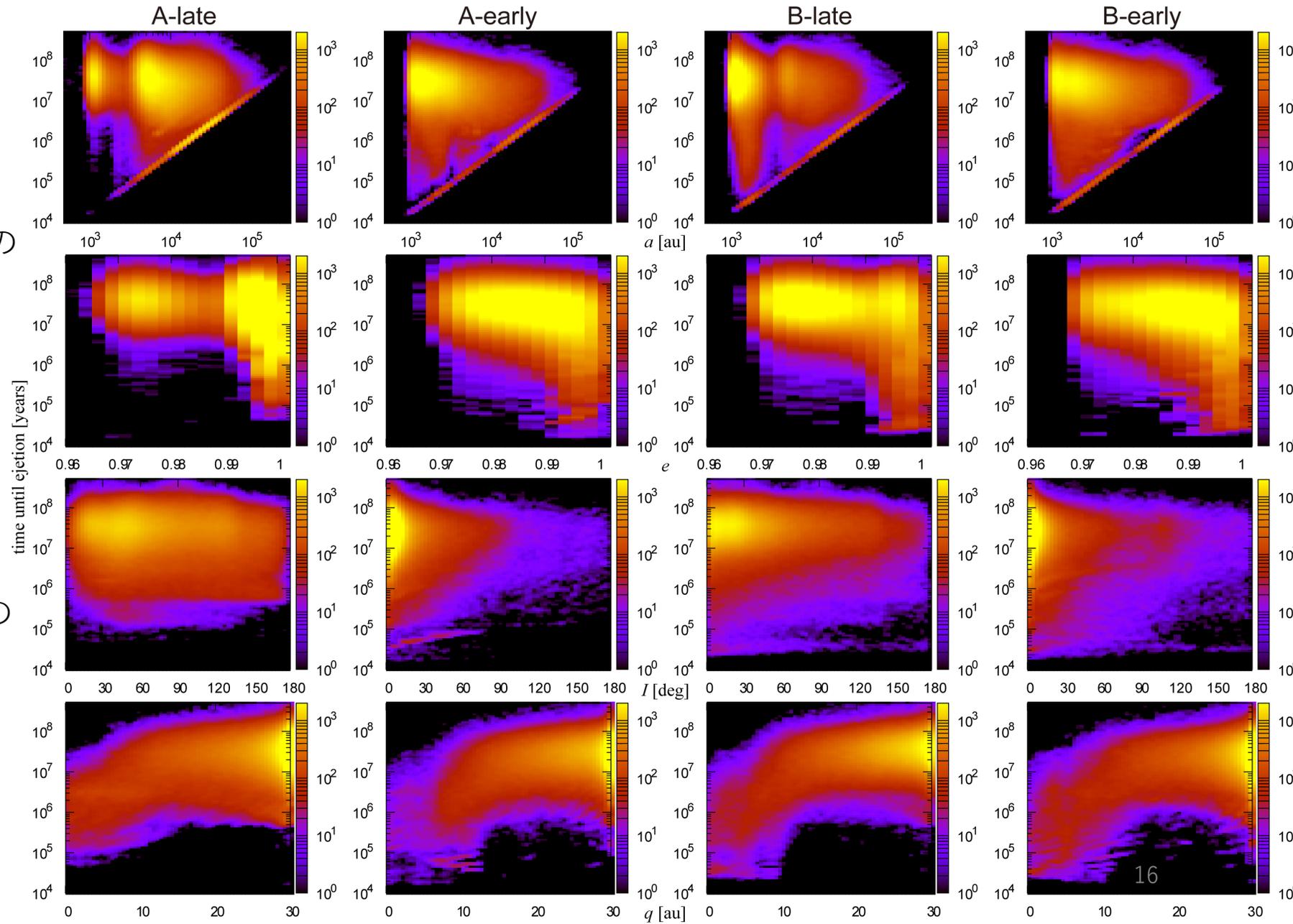
# 新彗星の 滞在時間

新彗星の滞在時間の  
初期軌道要素への依存性の  
頻度分布図。  
カラーバーは対数で  
規格化無し。

上段(軌道半長径)図内の  
右上がり直線は  
初回の回帰で放出される  
新彗星群を示す。これは  
この計算での滞在時間 $T_e$   
の下限を構成する。

- $T_{e, \min} = P/2 \propto a^{1.5}$

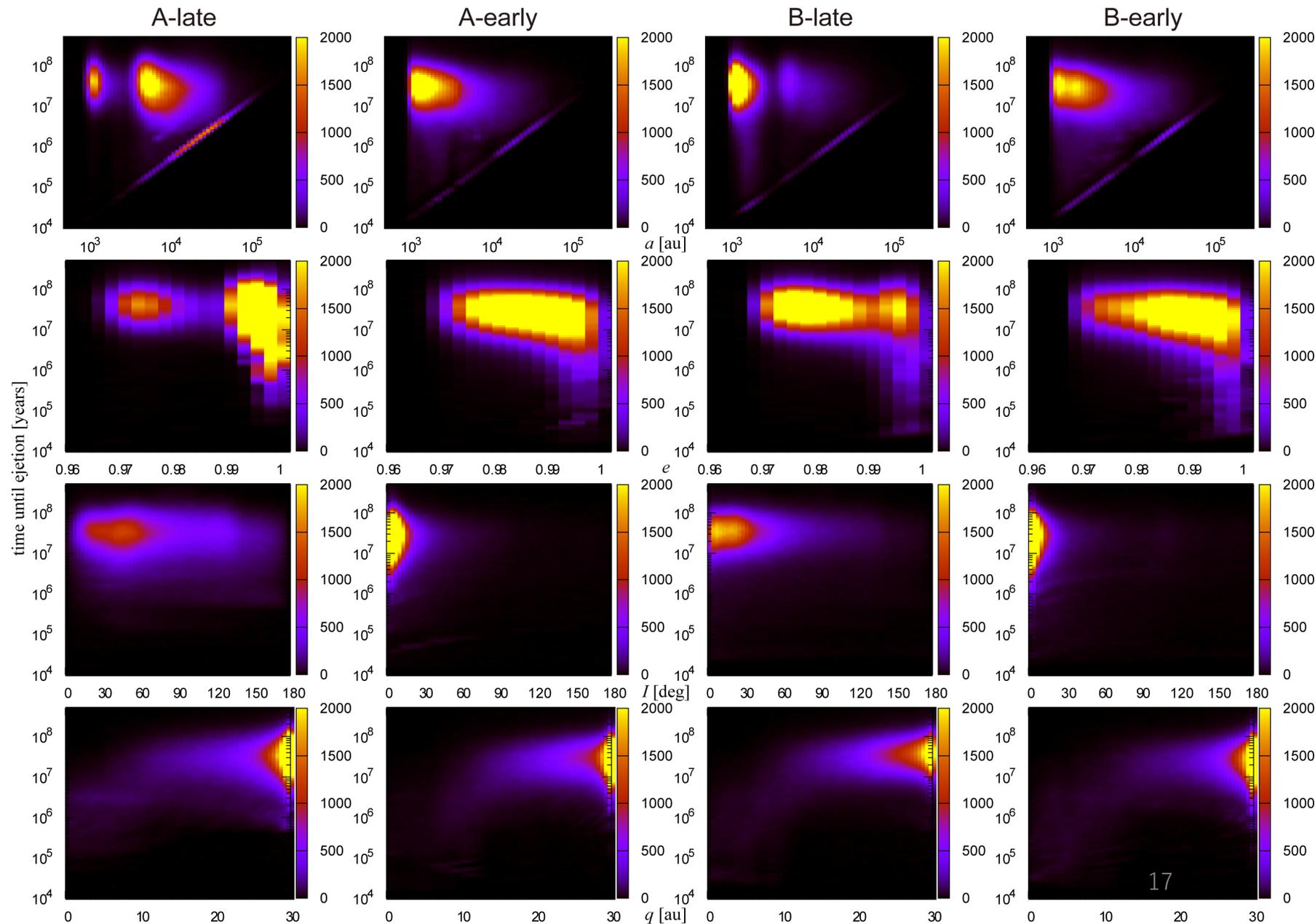
- 本研究では新彗星の滞在時間算出の起点を各天体の初期の回帰の遠日点に設定したためこの境界が生じる



# 新彗星の 滞在時間

新彗星の滞在時間の  
初期軌道要素への  
依存性の頻度図。  
カラーバーは線形で  
規格化無し。

滞在時間の頻度分布の  
ピークが  $O(10^7)$  年  
であることが明白である。



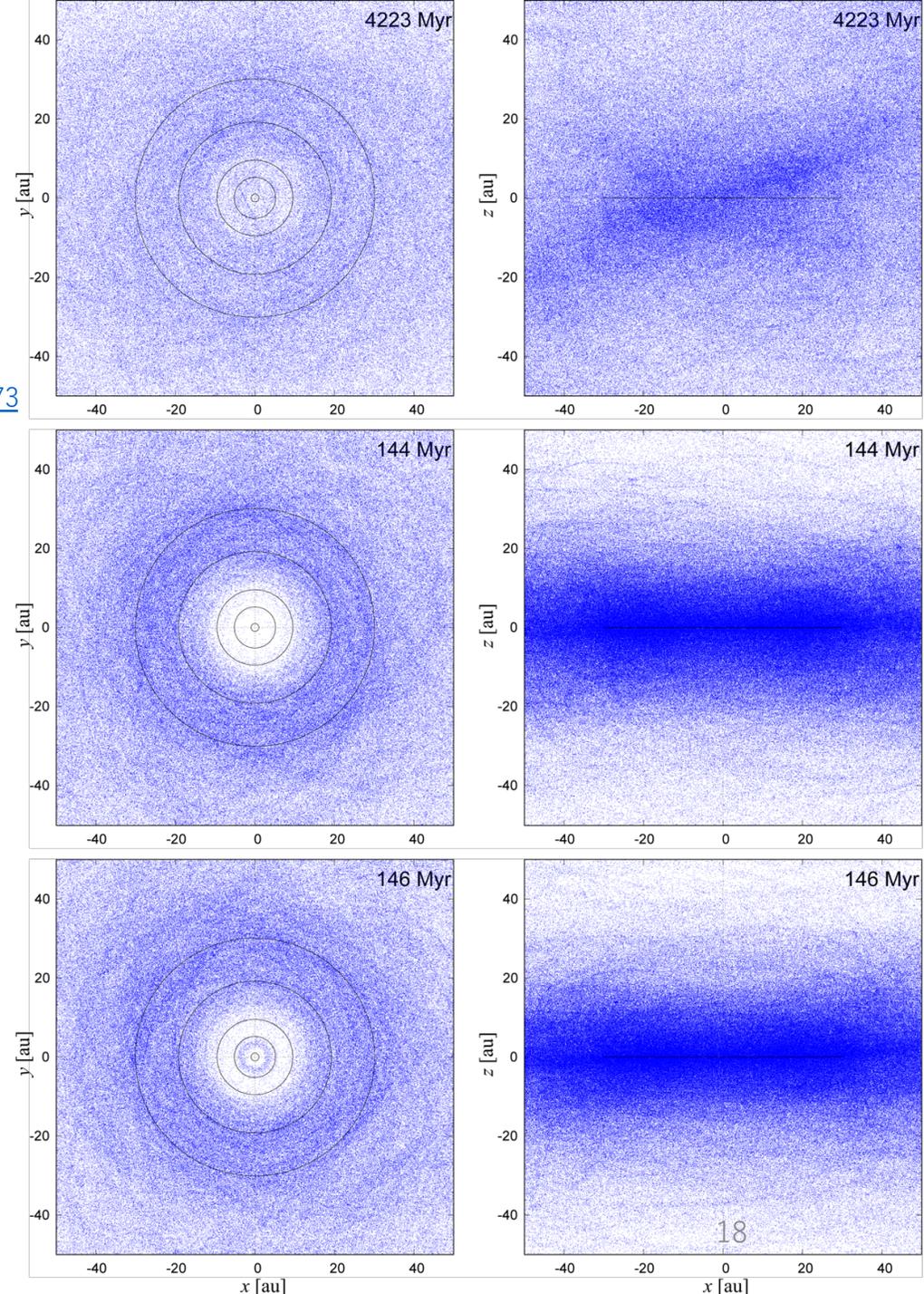
# 土星-木星バリア

彗星が多く飛来しても木星が地球をそれらの衝突から守ってくれるという予想は1970年代から存在した。[e.g. Everhart, 1973](#)  
しかしその定量的な実証は最近まで実現しなかった。  
この計算ではそれがよく見えている。  
バリアは土星+木星により作られることが分かった。  
以下は今回の計算のスナップショット三種。

- 右欄：黄道面の北極方向から見た図群
- 左欄：黄道面方向から見た図群

それぞれ以下の状態が実現されている。

- 上段：バリアが実質的に働いていない状態。A-late
  - ✓ この時期は新彗星がほぼ等方的に飛来するため
- 中段：典型的バリア。土星軌道以内に彗星が少ない。B-early
- 下段：バリアが彗星達を木星軌道以内に封じている。B-early
  - バリアによる捕獲状態は $O(10^3)$ 年は続いた
  - これらの時期は彗星雲がまだ平面的であり、新彗星も黄道面に沿って飛来する。よってバリアの効率が高い

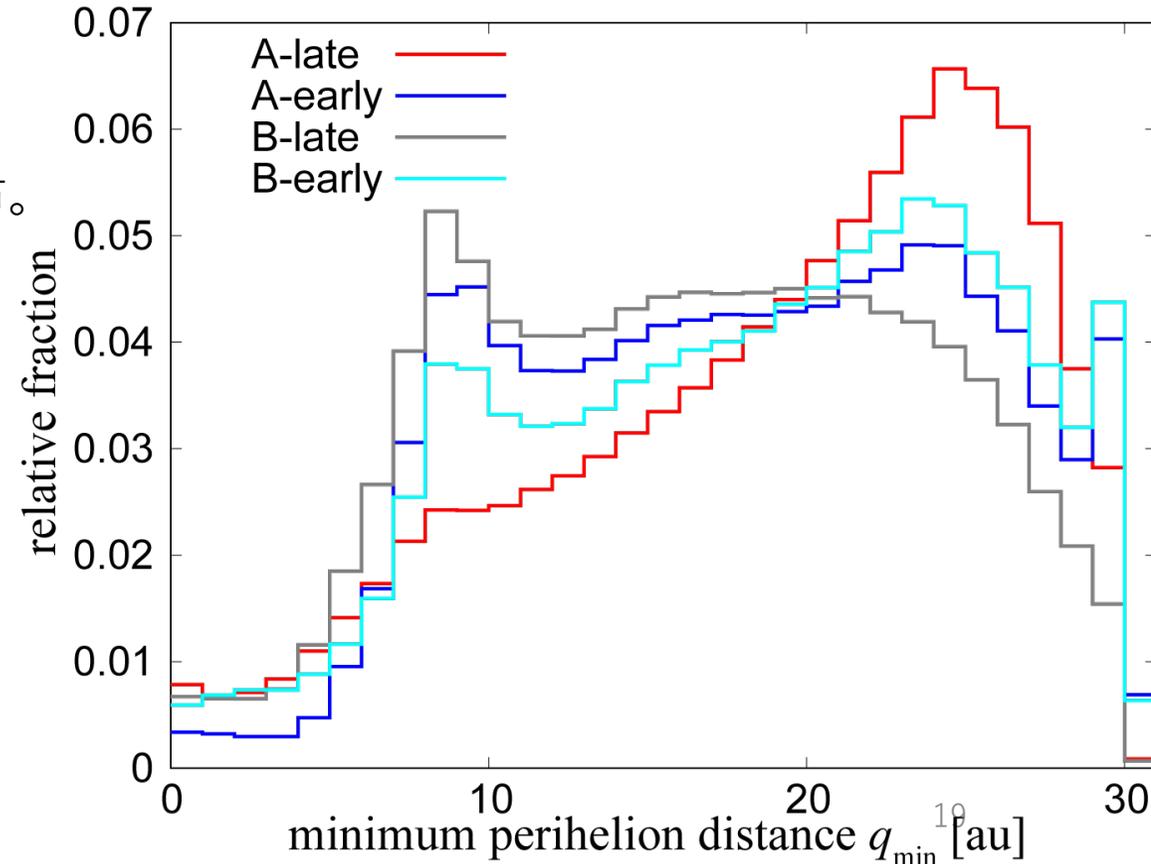


# バリアの定量化 – 最小近点距離の分布

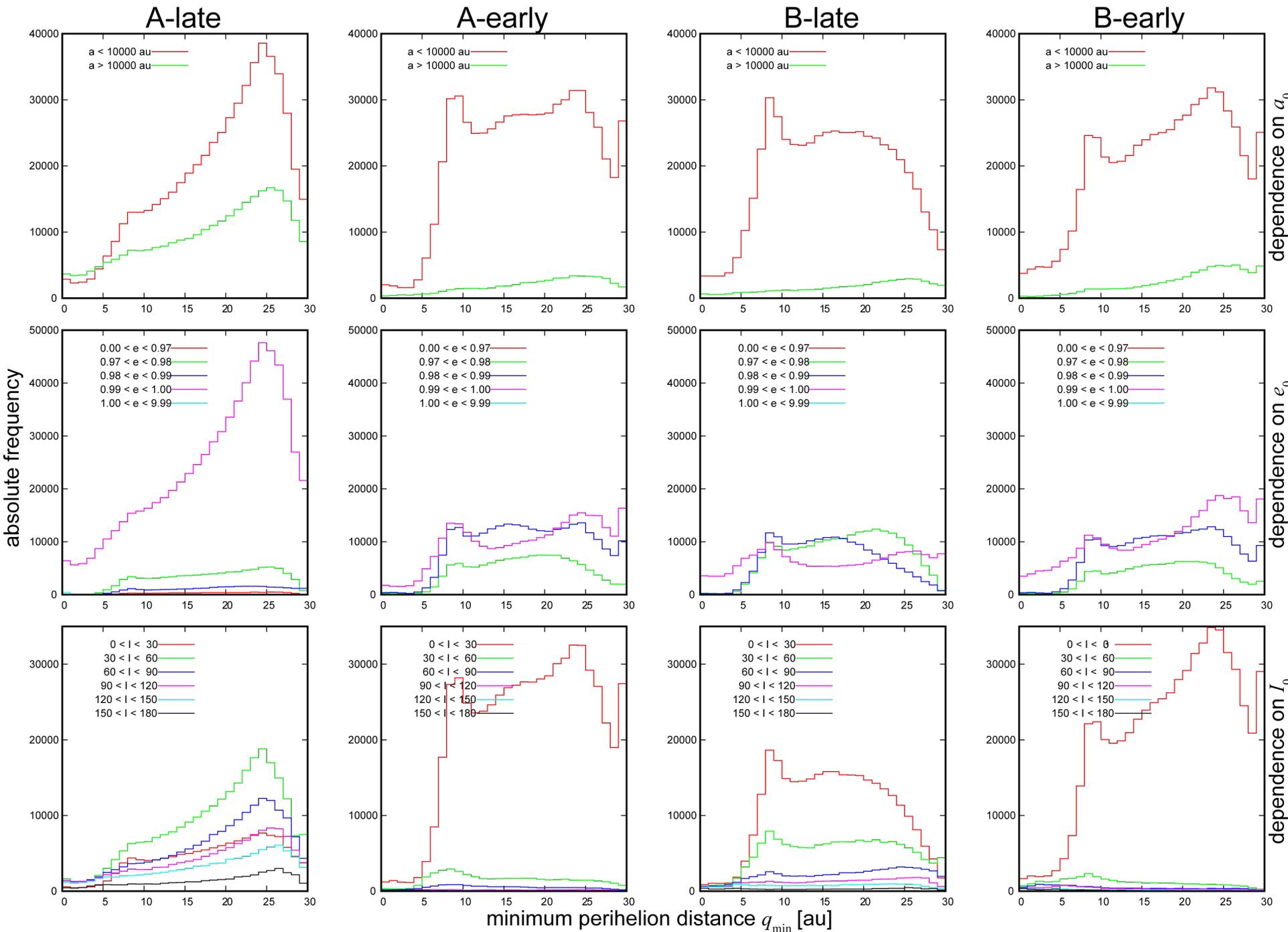
土星-木星バリアの強度やそれが働く条件を詳しく定量化する方法は実は自明でない。本発表では各新彗星がその滞在中に起こした全回帰中の近点距離の最小値  $q_{\min}$  の頻度分布を作る。土星-木星バリアがよく働いたら  $q_{\min}$  の分布が土星-木星軌道の周囲に極大値を持ち、その高さが土星-木星バリアの強度を示すものとする。

図：新彗星の発生(惑星領域への突入)後、p. 12の条件を満たして取り除かれるまでに達成された  $q_{\min}$  の頻度分布。各時期について積分値が1となるよう規格化済み。

- 時期 A-late ではバリアはほぼ効いていない。
- 一方、時期 B-late ではバリアが有効であり、土星軌道と木星軌道の間で極大値が現れる。
  - 時刻  $t \sim 4.4$  Gyrに発生した彗星シャワーにより黄道面近辺に新彗星が大量発生したため
- 時期 A-early, B-early にも同様に極大値が見られる。
  - この時期は彗星雲がまだ平面的なため



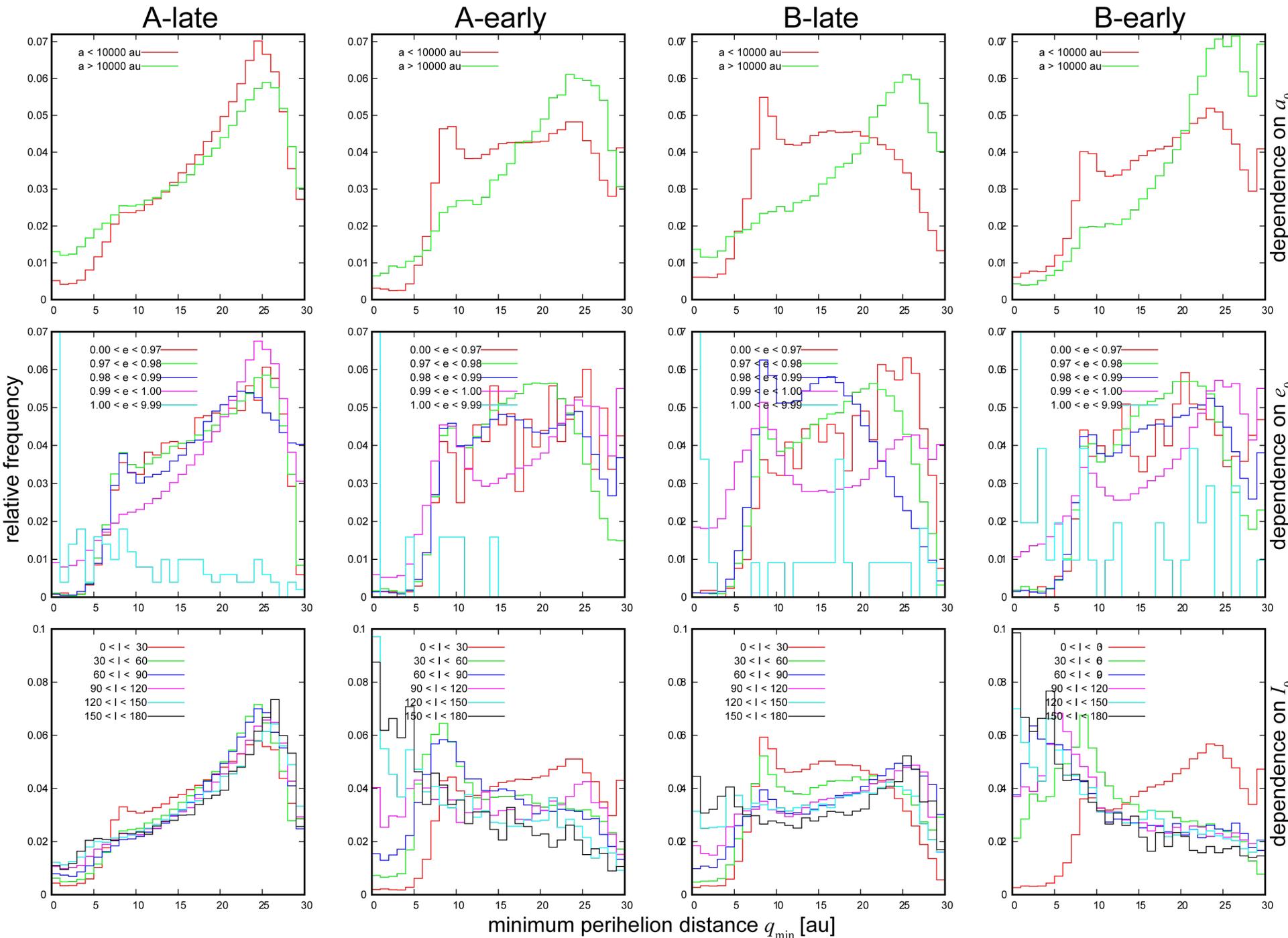
初期の軌道要素への  
 $q_{\min}$  分布の依存性  
 (規格化無し)



この図を見ても実は  
 余りよく分からない。  
 どの軌道要素の天体が  
 多い/少ないかは見える。

どの時期でも**初期に**  
 双曲軌道( $e > 1$ )に乗る  
 新彗星は数が少なすぎ、  
 この図では目視が困難。  
 p. 20の図と併せて見よ。

# 初期の軌道要素への $q_{\min}$ 分布の依存性 (規格化有り)



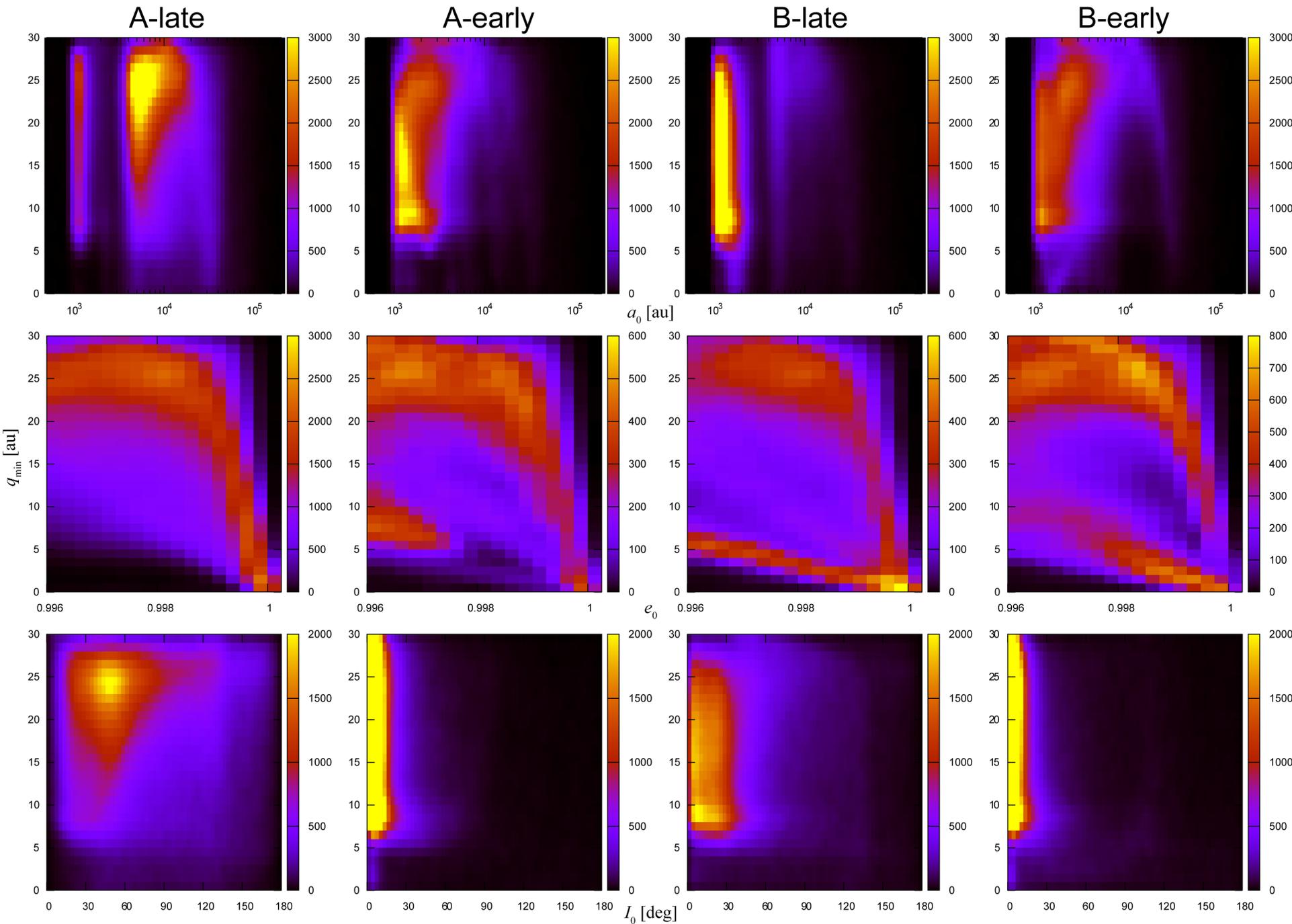
- 彗星雲が平面的な時期は  $q_{\min}$  の軌道傾斜角  $i$  への依存性が高い。  
{A,B}-earlyが典型、また平面的な彗星シャワーが来襲したB-lateも同様。
- 離心率が大きな天体は土星-木星バリアを突破しやすい  
• 時期A-lateで  $i$  依存性が小さいのは、多くの天体の離心率が大きいから (p. 19)

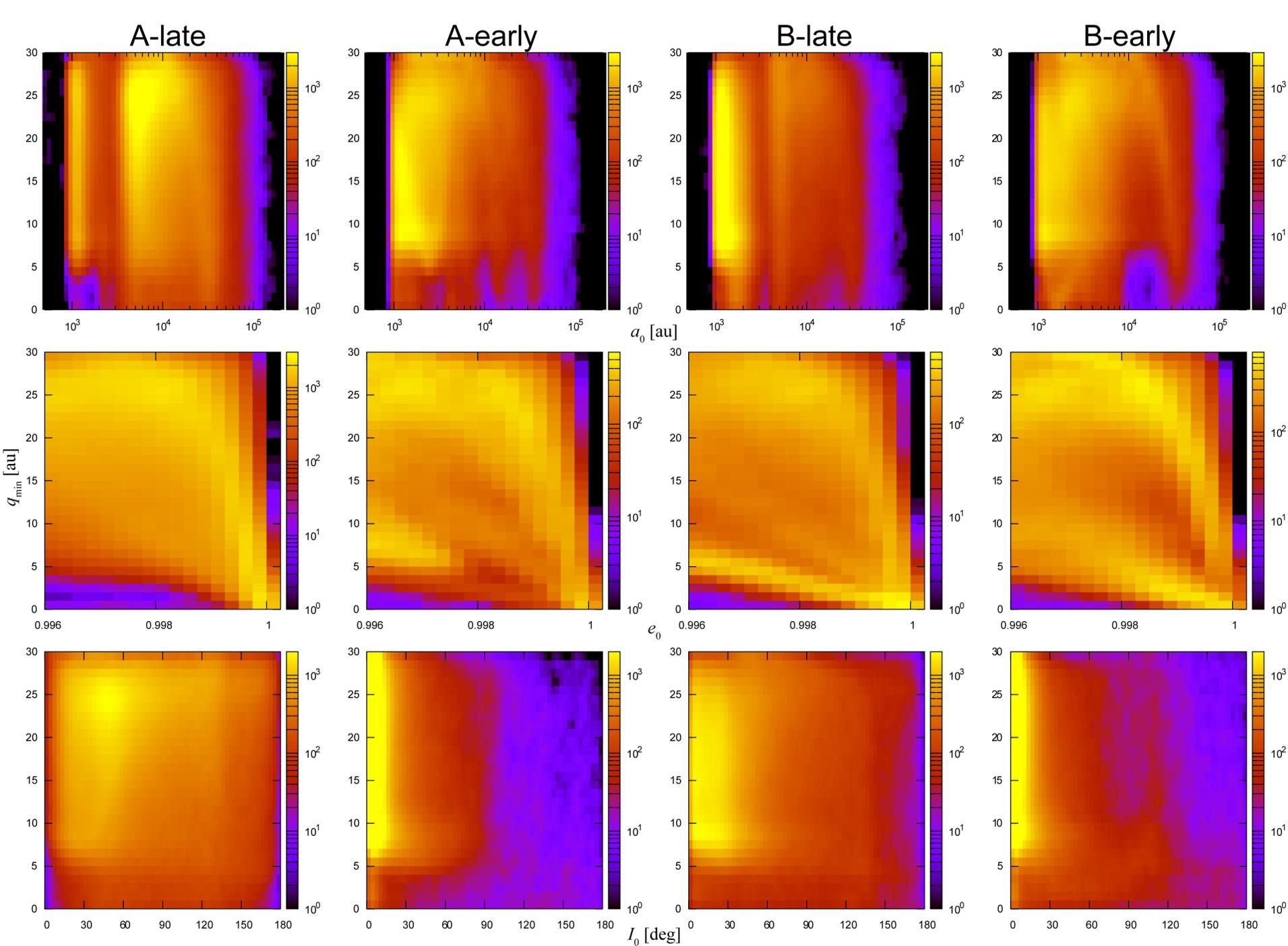
実験事実・軌道傾斜角の大きな天体、特に逆行天体は内側にまで入り込む。これは逆行天体は惑星との相互作用が小さいとされる(遭遇時の相対速度の大きさ)。逆行天体は一般に順行天体よりも安定性が高いとされるが(例. [Donnison+ 1994](#))、それは近点距離  $q$  が同程度の場合である。ここで扱っているモデルでは逆行天体は順行天体よりも内側に入り込む。即ち概して近点距離が順行天体より小さくなるので、不安定までの時間が短くなってしまふ。つまり逆行軌道の持つ安定性という特徴が見え難くなる。p. 21-23 に関連図がある。

$q_{\min}$  の頻度分布の  
 初期軌道要素への  
 依存性(規格化有り)

カラーバーは線形

- 初期離心率の大きな天体は  $q_{\min}$  が小さくなる傾向がある。
- $q_{\min}$  の初期軌道傾斜角への依存性は次ページの対数カラーバーの図にやや明瞭に見える。





$q_{\min}$  の頻度分布の  
 初期軌道要素への  
 依存性(規格化有り)

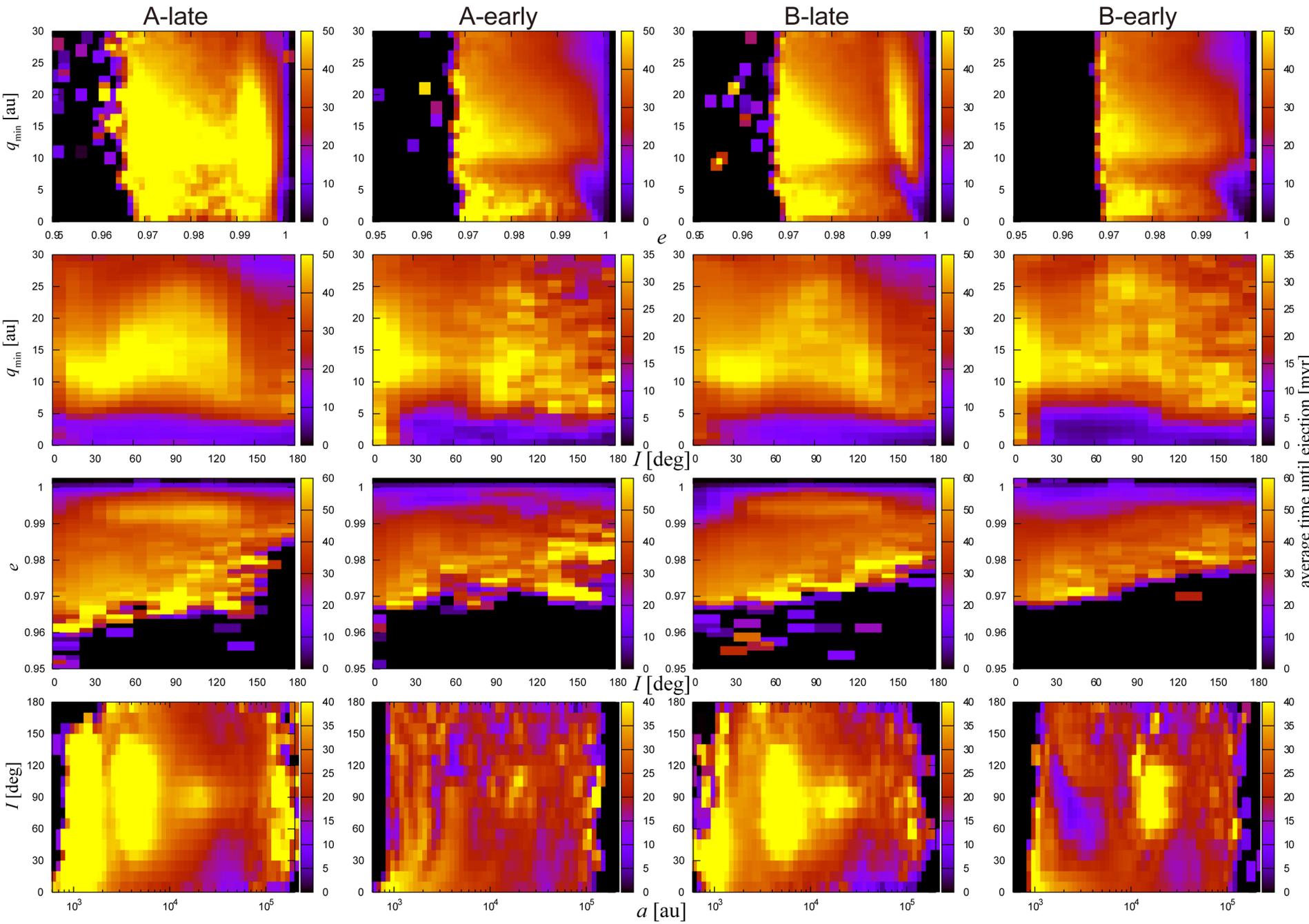
カラーバーは対数

- $q_{\min}$  の初期軌道傾斜角への依存性が p. 21 の線形カラーバー図よりもやや明瞭。やや、という程度だが。

# 新彗星の平均的な滞在時間の $q_{\min}$ 及び初期軌道要素への依存性

カラーバーは線形

(各要素,  $q_{\min}$ )という空間で滞在時間の平均値がどう分布するのかを見た。



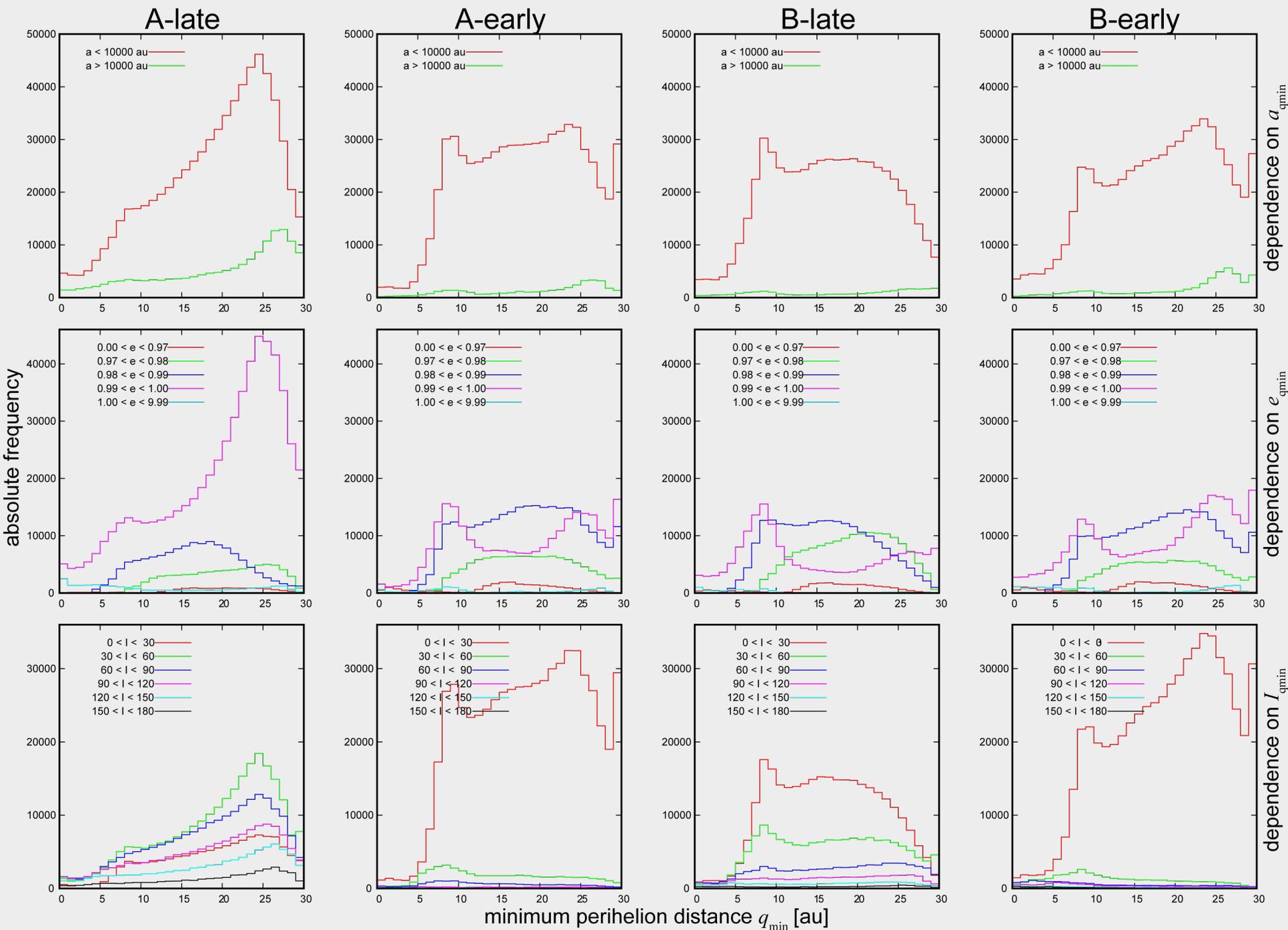
- $e - q_{\min}$  (一段目) これと云って顕著な傾向は見られない。
- $I - q_{\min}$  (二段目)  $q_{\min}$  が小さな領域 ( $q_{\min} < 5$  au) では逆行天体が若干のみ平均滞在時間が長い(安定)。だが順行天体との差はさほど大きく無い。
- $I - e$  (三段目) 逆行天体には離心率の小さなものが存在しない。また、離心率が大きな領域 ( $e > 0.98$ ) では逆行天体の滞在時間がやや長く見える。だがこれも明快ではない。
- $a - I$  (四段目) これと云って顕著な傾向は見られない。

# まとめ

- 惑星領域に入った新彗星の滞在時間は $O(10^7)$ 年である
  - 初期軌道半長径の大きな天体が先に放出される
    - 初期離心率が大きいため
  - 滞在時間は新彗星の定義や彗星雲の初期軌道分布に依存する
  - 新彗星の初期軌道傾斜角への依存性は小さい
- 或る条件下では土星-木星バリアが実効的である
  - バリア： 近日点距離最小値  $q_{\min}$  の分布が 5-10 au の間に極大値を持つ
  - 新彗星が黄道面方向から飛来する時期に有効 (例. 太陽系の初期)
  - 逆行する新彗星や離心率の大きな天体はバリアを突破しやすい
    - 軌道半長径が等しければ両者とも惑星との相対速度が大きくなり、遭遇時間が短くなるから
- (参考)同様な内容の発表を [こちらでも](#) 行なっています

## 以下は補足説明

- 土星木星バリアに関し、新彗星の初期軌道要素ではなく、 $q_{\min}$ が実現された時点での軌道要素との関係を示す図群を掲載する。

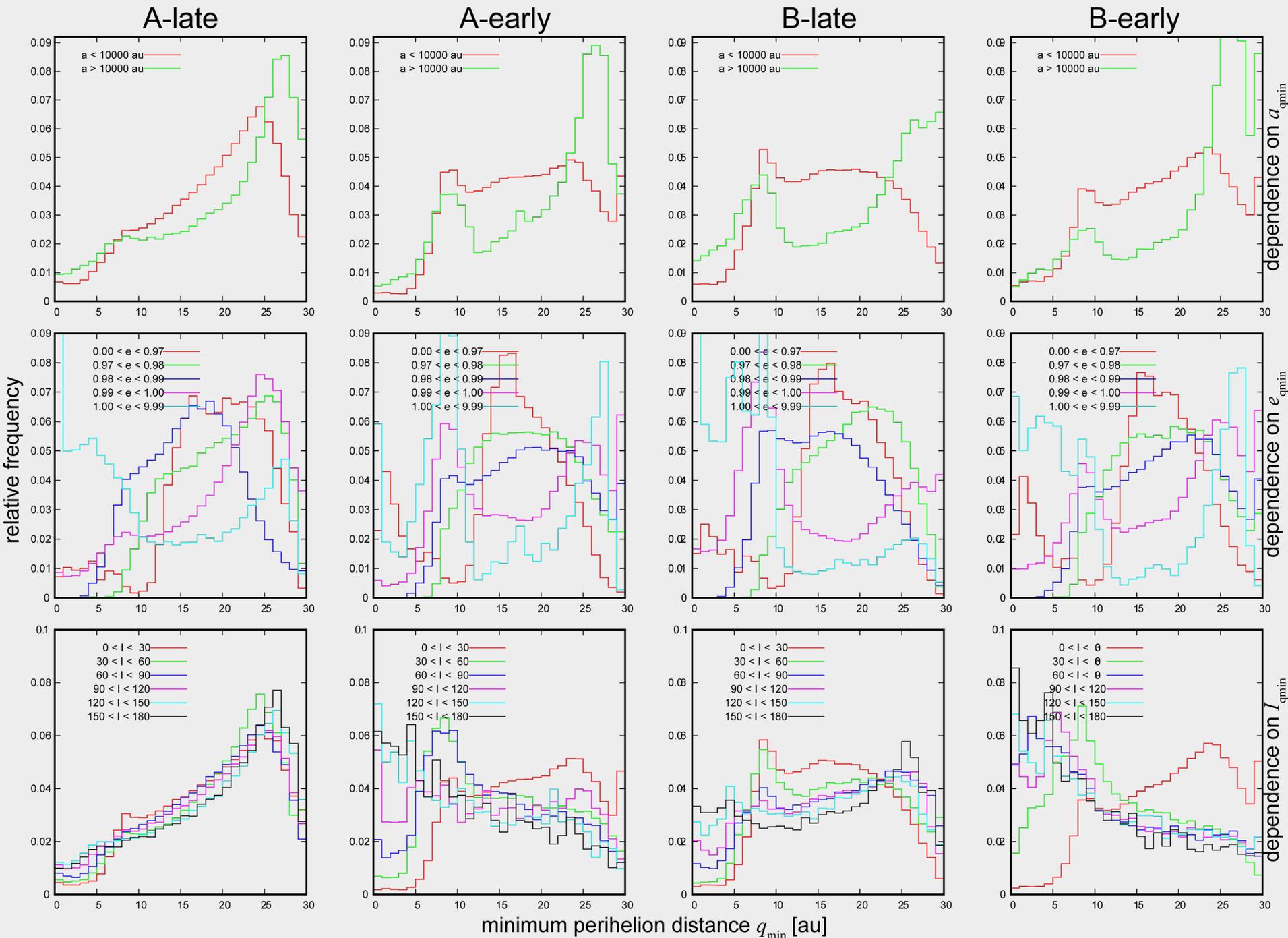


Dependence of  $q_{\min}$  on the orbital elements that realized  $q_{\min}$  (not normalized 規格化無)

初期の軌道要素ではなく  $q_{\min}$  を実現した時の軌道要素との関係。

p. 19の頻度分布図と比較されるべきもの。

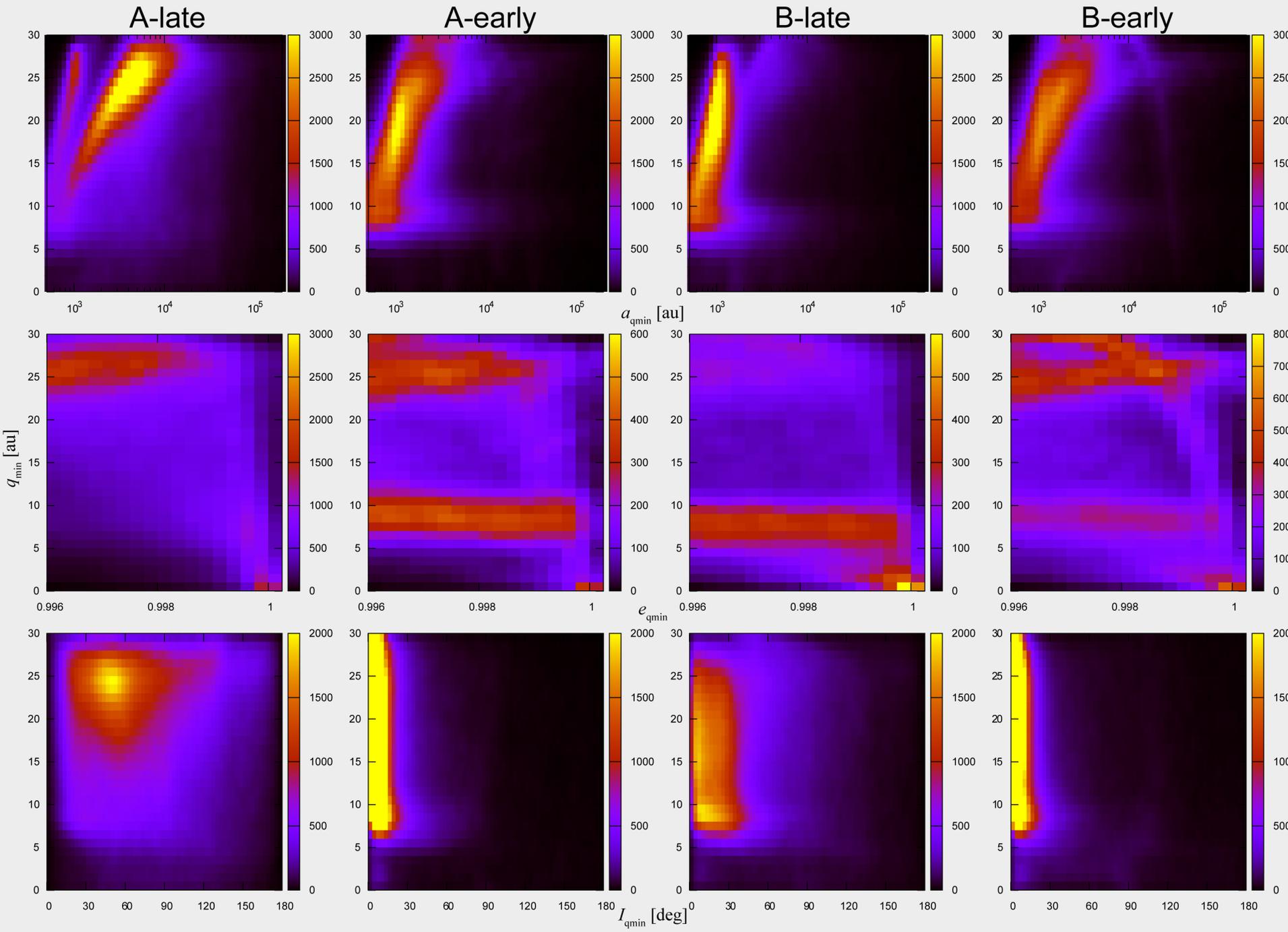
が、さほど重要な情報が含まれるとは見えない。次ページの図(規格化有)に説明を加える。



Dependence of  $q_{\min}$  on the orbital elements that realized  $q_{\min}$  (normalized 規格化有)

p. 20の頻度分布図と比較されるべきもの。

上段をp. 20の図と比較すると、 $a > 10,000$  au の天体も土星-木星バリアの影響下にある様に見える。だがこれは、バリア即ち土星・木星に散乱されてその辺りに留まる天体の軌道半長径が散乱により増したことを意味するだけと思われる。

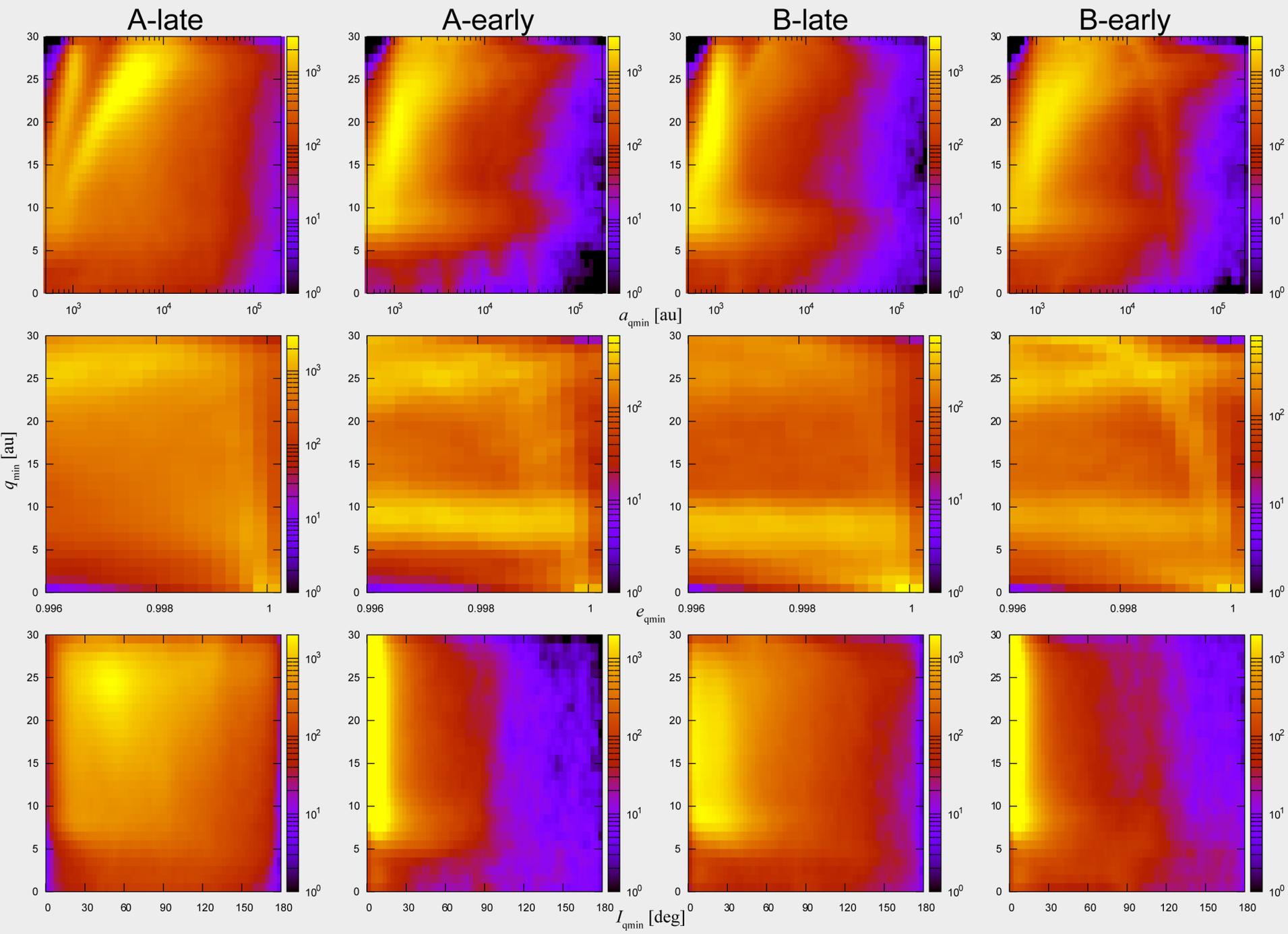


Dependence of  $q_{\min}$  on the orbital elements that realized  $q_{\min}$

頻度分布図  
カラーバーは線形

p. 21の頻度分布図と比較されるべきもの。

説明は次ページの対数カラーバーの図に加える。



Dependence of  $q_{\min}$  on the orbital elements that realized  $q_{\min}$

頻度分布図  
カラーバーは対数

p. 22の頻度分布図と比較されるべきもの。

p. 27で述べた事柄  
「バリア即ち土星・木星に散乱されてその辺りに留まる天体の軌道半長径が散乱により増した」  
は、この図をp. 22の図と比べるとやや読み取れる。