

オールト雲と長周期彗星

樋口有理可

東京工業大学

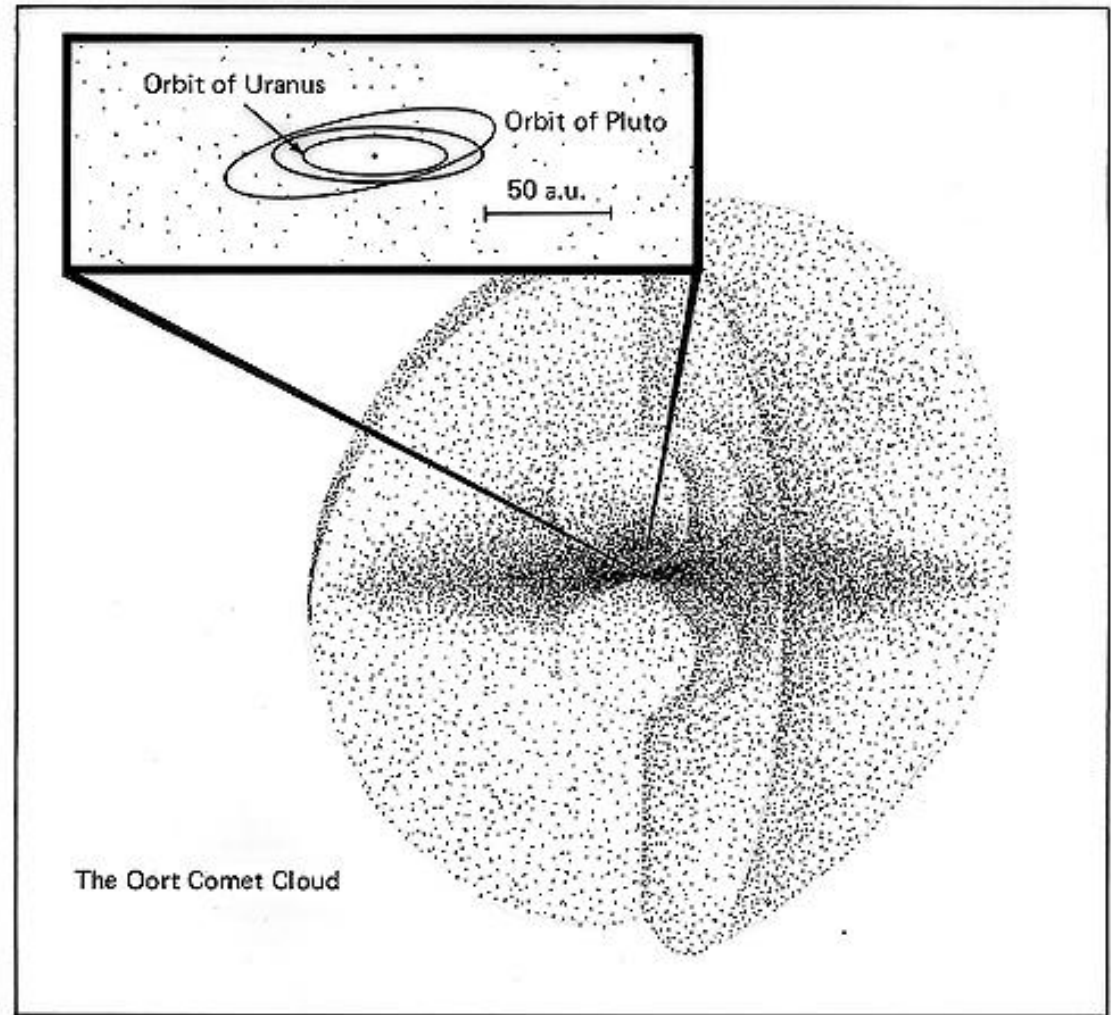
1. オールト雲の姿(想像)
2. 長周期彗星の分布の歴史(観測)
3. オールト雲の形成(理論)
4. オールト雲と長周期彗星の関係(観測+理論)

オールトの雲

e.g., Dones 2004

- 長周期彗星の巣
- 球(殻)状の構造
- $\sim 10^5$ AUまで広がる
- 10^{12-13} 個の彗星

- 誰も直接見られない
- 長周期彗星の観測から予測されたもの



Yeomans

百武彗星 (NASA)

長周期彗星の分布 (1)

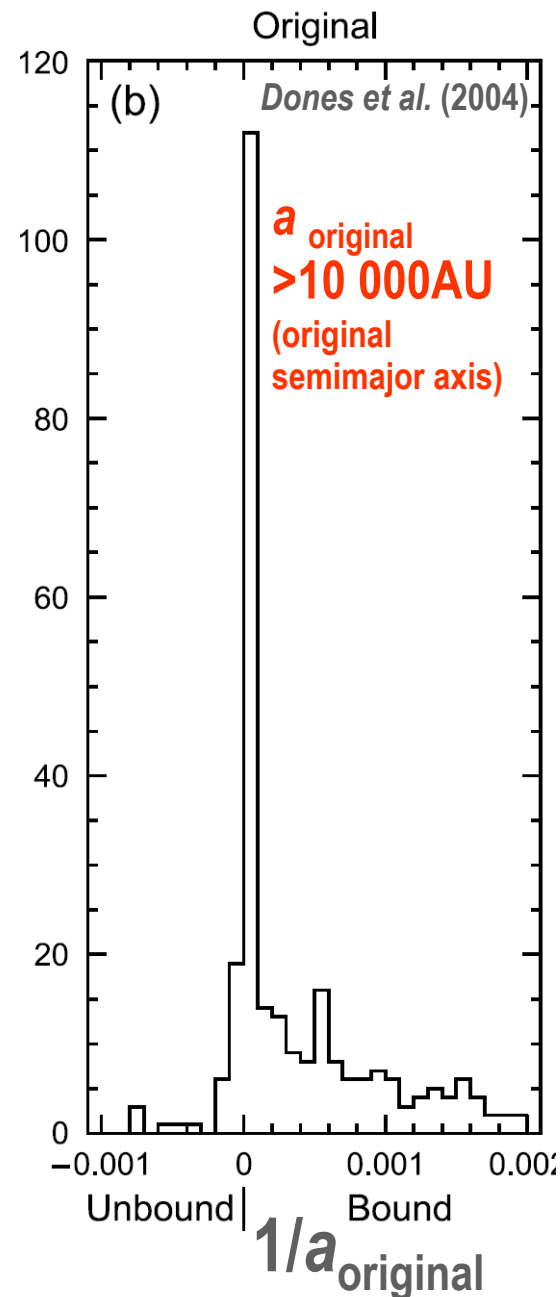
原初軌道長半径

Oort (1950)

TABLE I
Distribution of original semi-major axes
(a in Astronomical Units)

$1/a$	n
$< .00005$	10
$.00005 - .00010$	4
$.00010 - .00015$	1
$.00015 - .00020$	1
$.00020 - .00025$	1
$.00025 - .00050$	1
$.00050 - .00075$	1
$> .00075$	0

Catalogue of cometary orbits 2003 (SAO) →



長周期彗星の分布 (2)

軌道傾斜角

• 等方的

-Oort (1950)

TABLE 9
Distribution of inclinations of cometary orbits.

i	i/a	< '000 10	'000 10 to '001 00	'001 to '004	'004 to '010	'010 to '020	'020 to '040	$e = 1$
0° - 60°		3	3	4	6	2	8	20
60 90		6	6	5	2	8	1	30
90 120		2	3	3	3	1	1	24
120 180		6	6	4	0	5	0	36

• $i \sim 0$ & 140 deg あたりに超過あり

-e.g, T. Nakamura (1979)

• 等方的

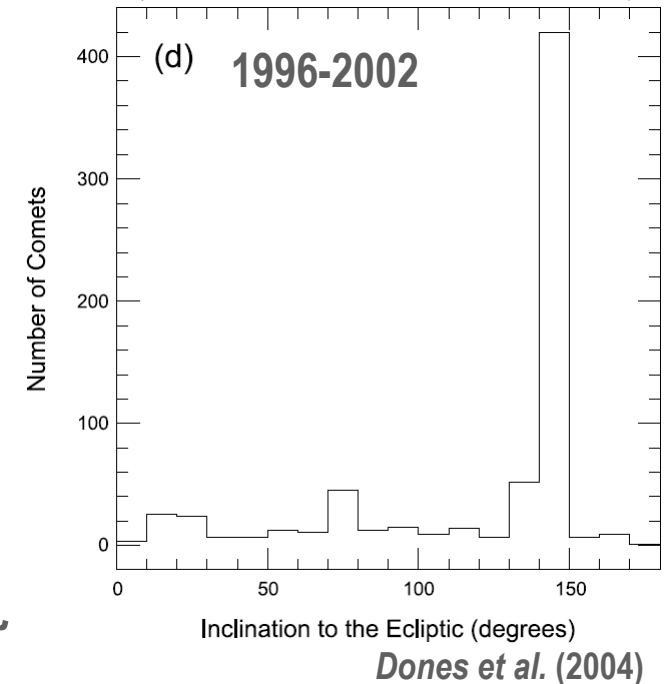
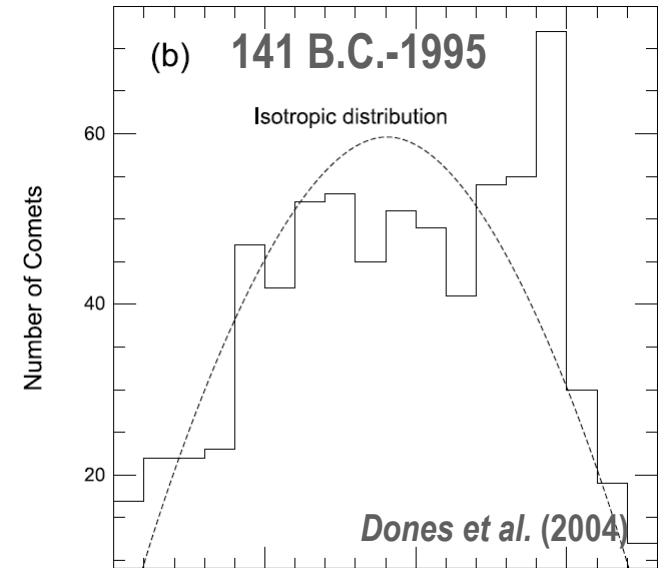
黄道面付近の超過

← 短周期彗星由来の天体が混ざっている

$i \sim 140$ 度のピーク

← クロイツ族 (分裂破片・元は1個?)

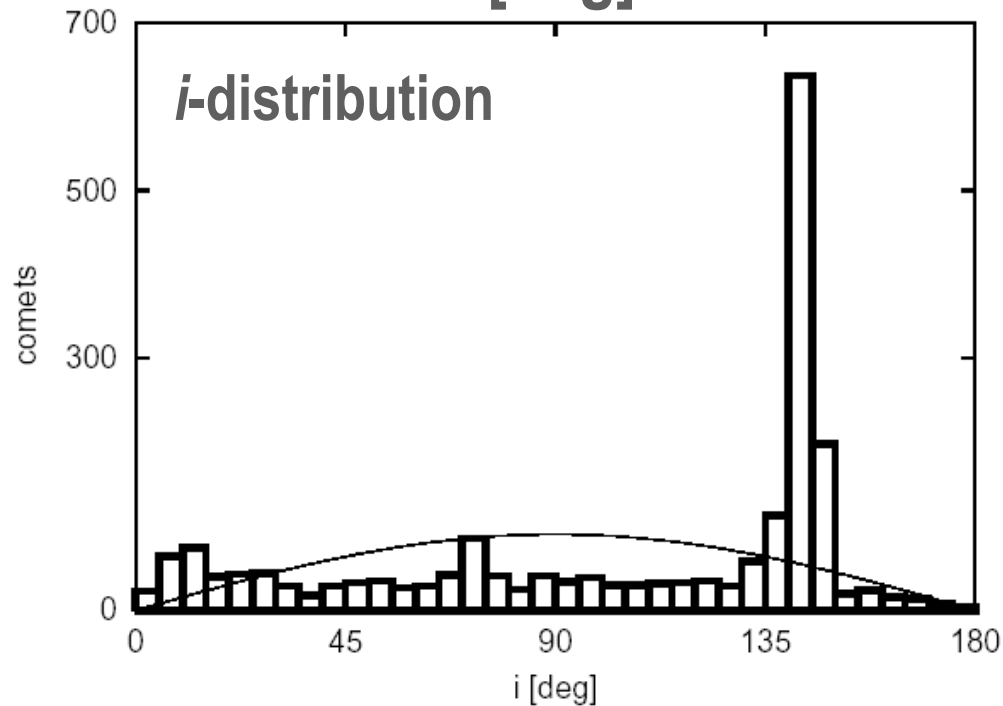
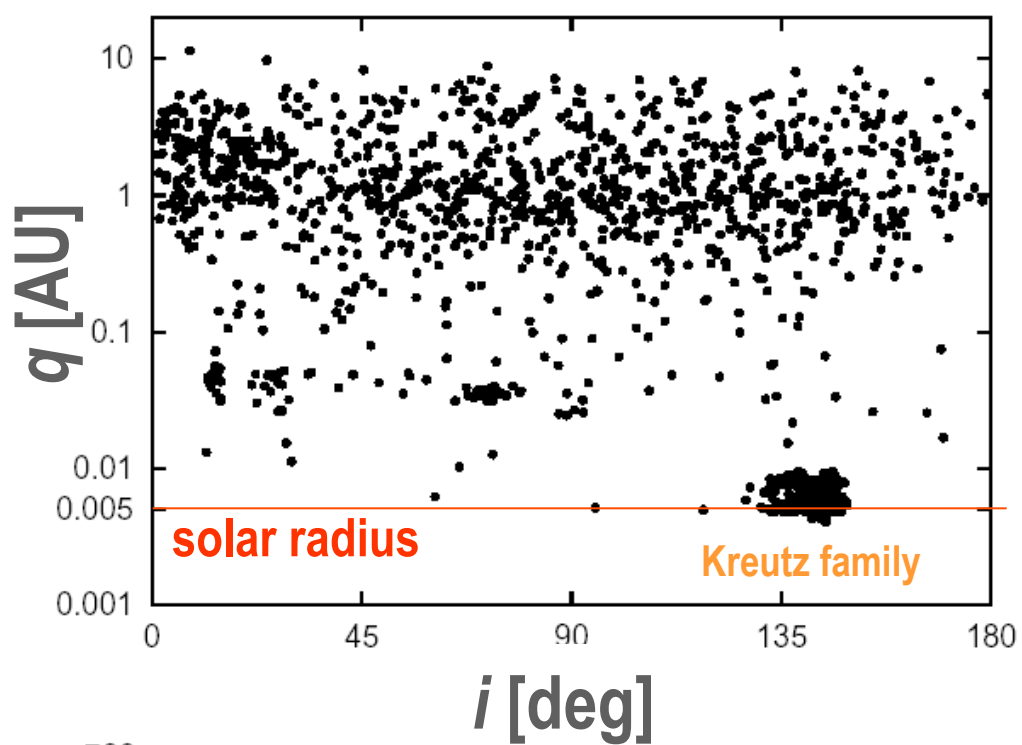
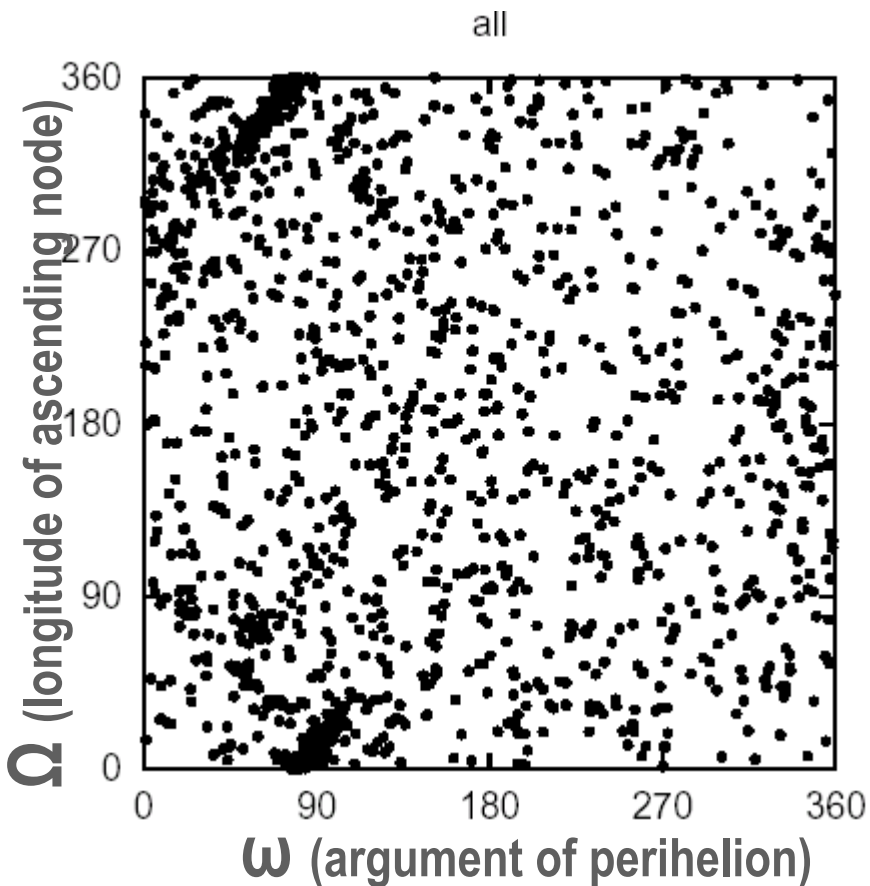
大半はSOHO(1995-)が発見



Catalogue of Cometary Orbits 2005

2081 comets

(only once observed \cong not periodic)



カタログを加工する

新しいオールト雲由来彗星の分布

理論と比較できる、オールト雲からやってきた彗星の分布を作るためには以下を取り除く必要がある:

- 短周期彗星由来天体

- (1) $a < 100, 500, 1000, 2000 \text{AU}$ などを省く

- 分裂破片 (Kreutz & others)

- (2) 似た i, ω, Ω を持つ天体はまとめて1個と数える

- if ($|i_1 - i_2| < \Delta$ && $|\omega_1 - \omega_2| < \Delta$ && $|\Omega_1 - \Omega_2| < \Delta$),

- \Rightarrow 同一天体

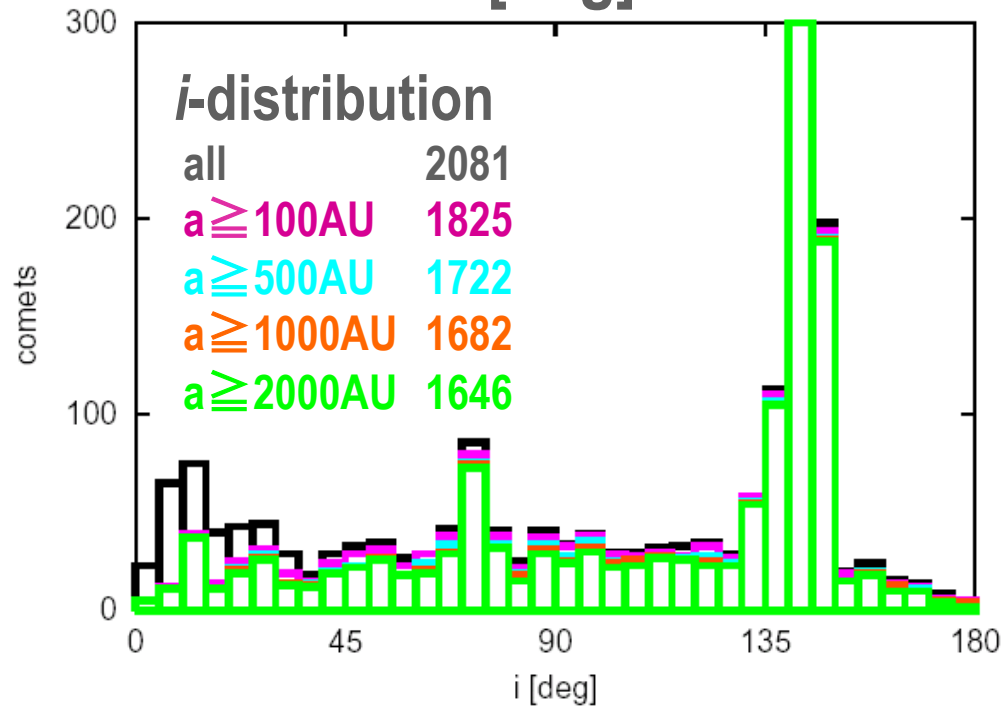
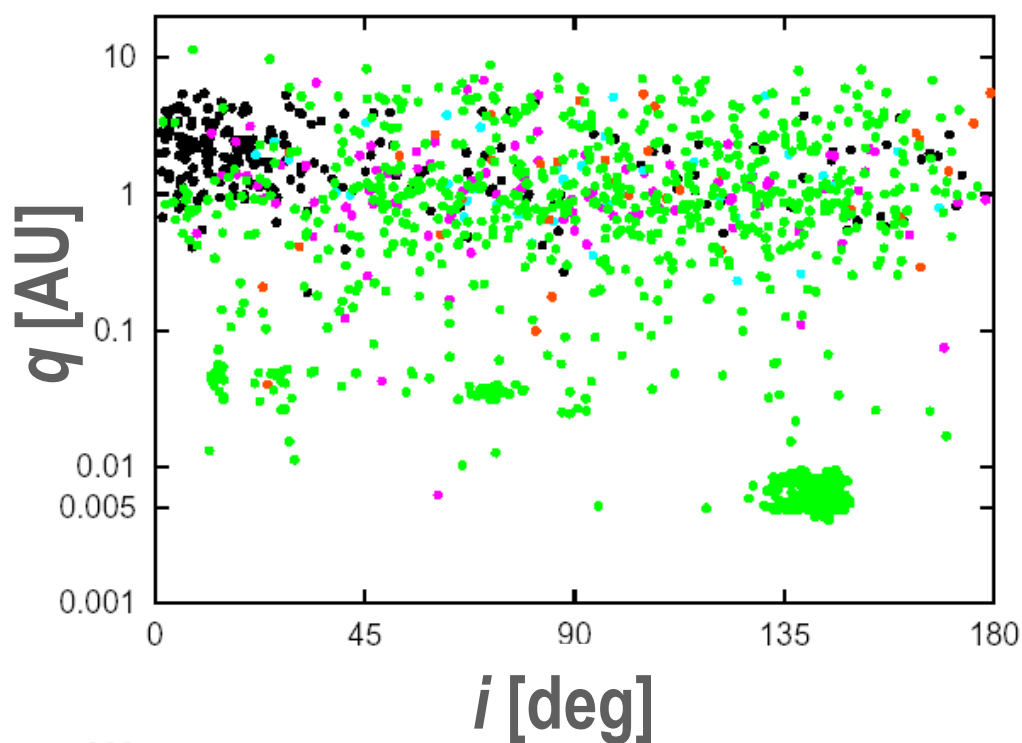
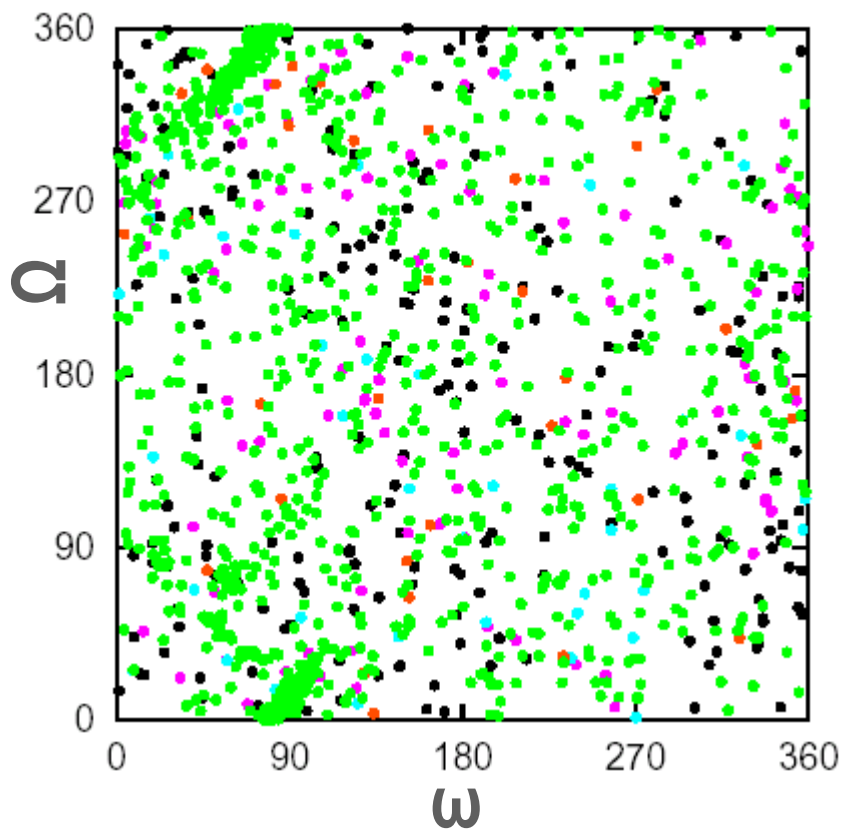
- $\Delta = 0.5, 1, 2, 5 \text{deg}$

- (3) 近日点が小さい天体 $q < 0.01, 0.02, 0.05, 0.1 \text{AU}$

Catalogue of Cometary Orbits 2005

短周期彗星由来天体を除く

- $a < 100\text{AU}$ ● $100\text{AU} \leq a < 500\text{AU}$
- $500\text{AU} \leq a < 1000\text{AU}$
- $1000\text{AU} \leq a < 2000\text{AU}$ ● $a \geq 2000\text{AU}$



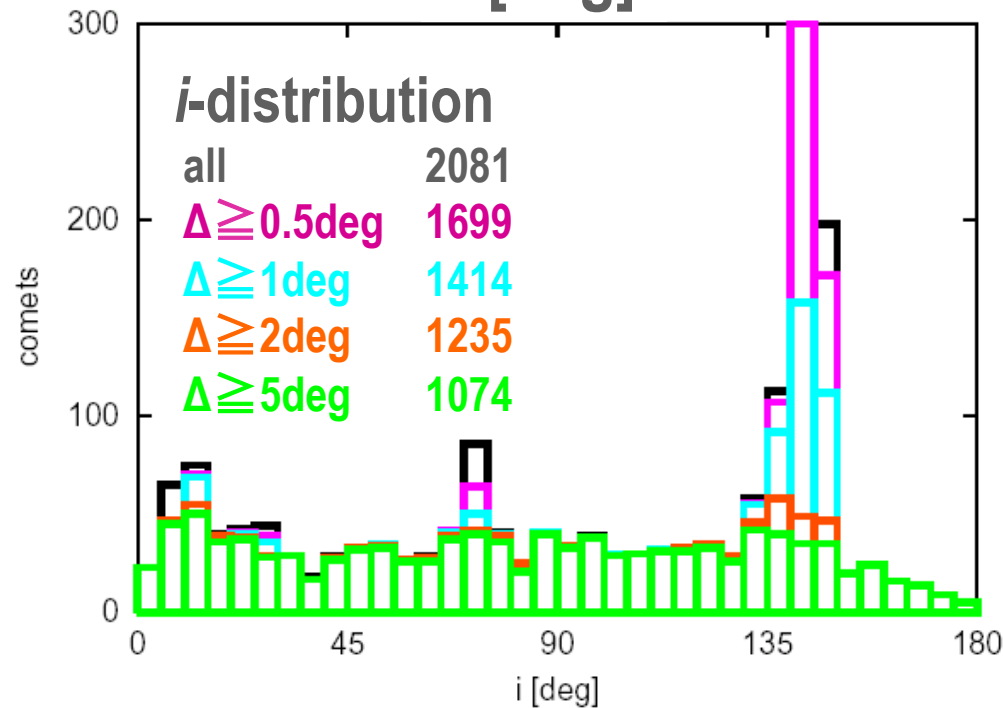
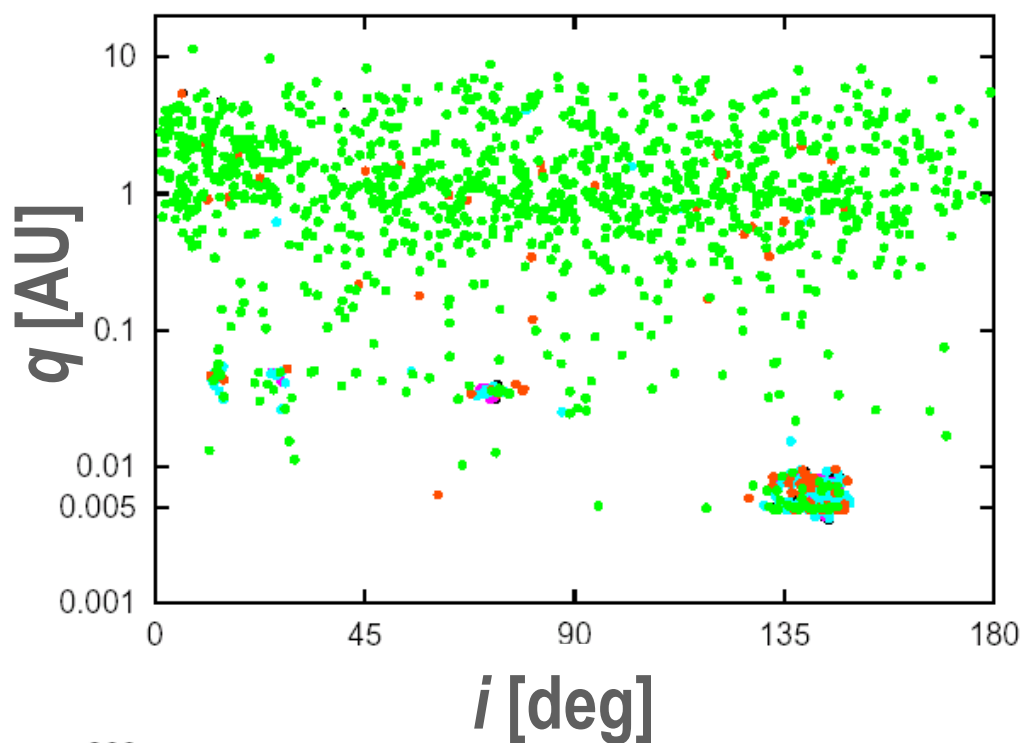
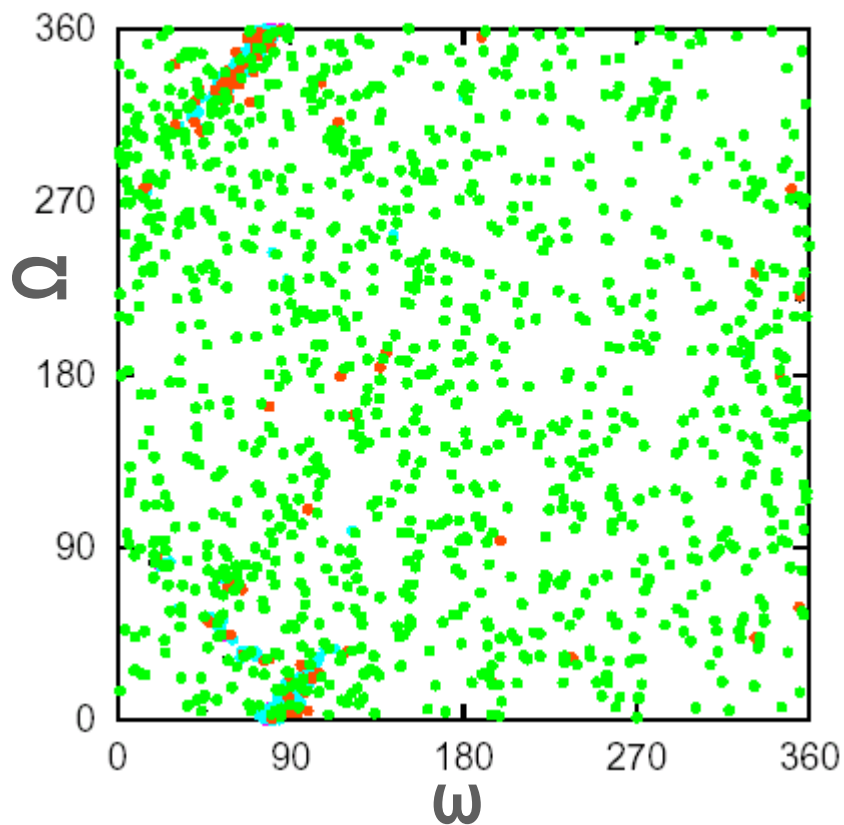
Catalogue of Cometary Orbits 2005

分裂破片を除く

● $\Delta < 0.5\text{deg}$ ● $0.5\text{deg} \leq \Delta < 1\text{deg}$

● $1\text{deg} \leq \Delta < 2\text{deg}$

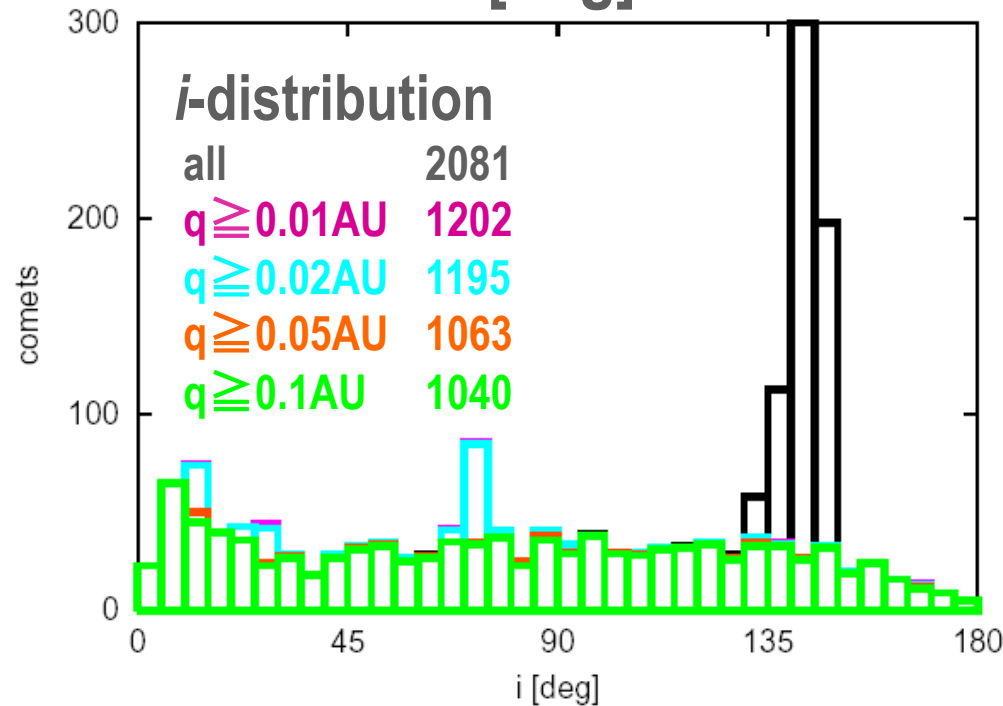
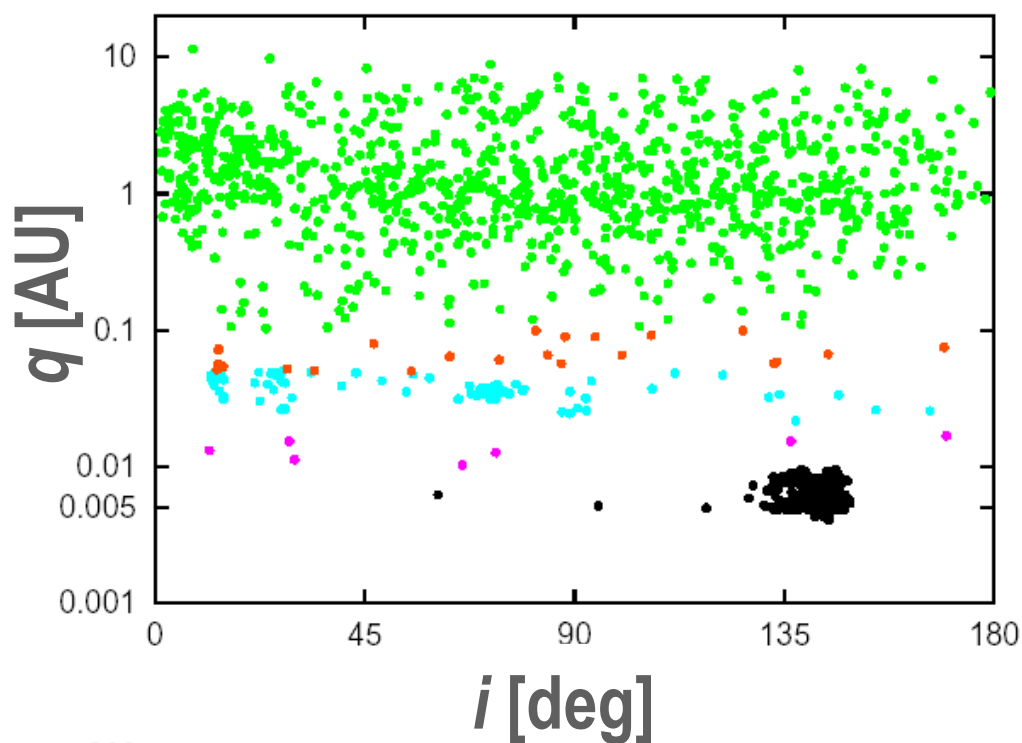
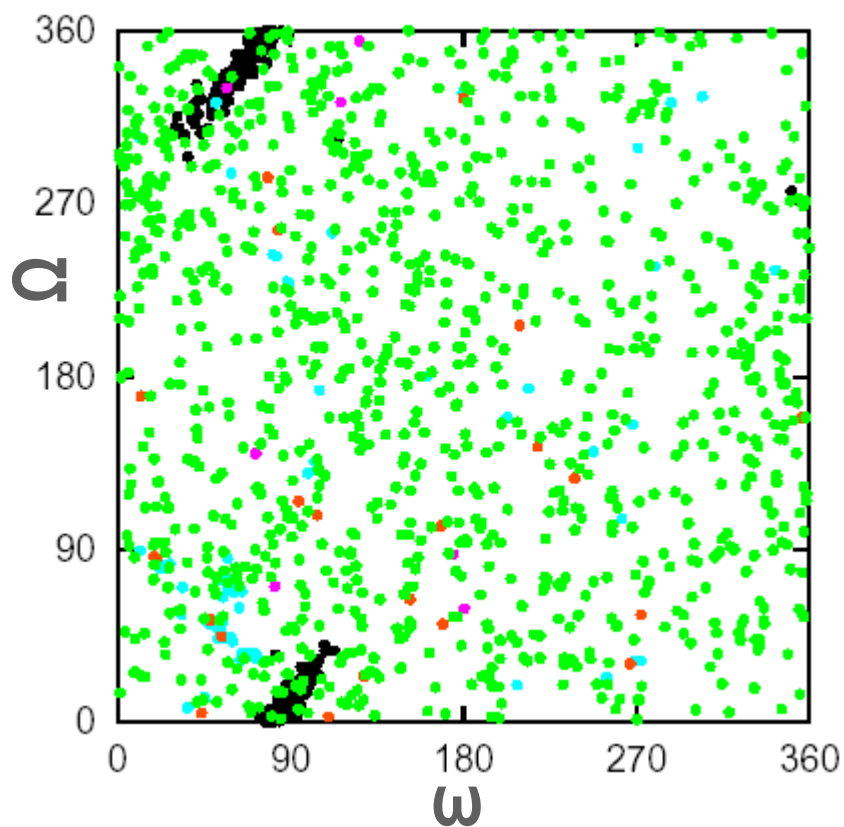
● $2\text{deg} \leq \Delta < 5\text{deg}$ ● $\Delta \geq 5\text{deg}$



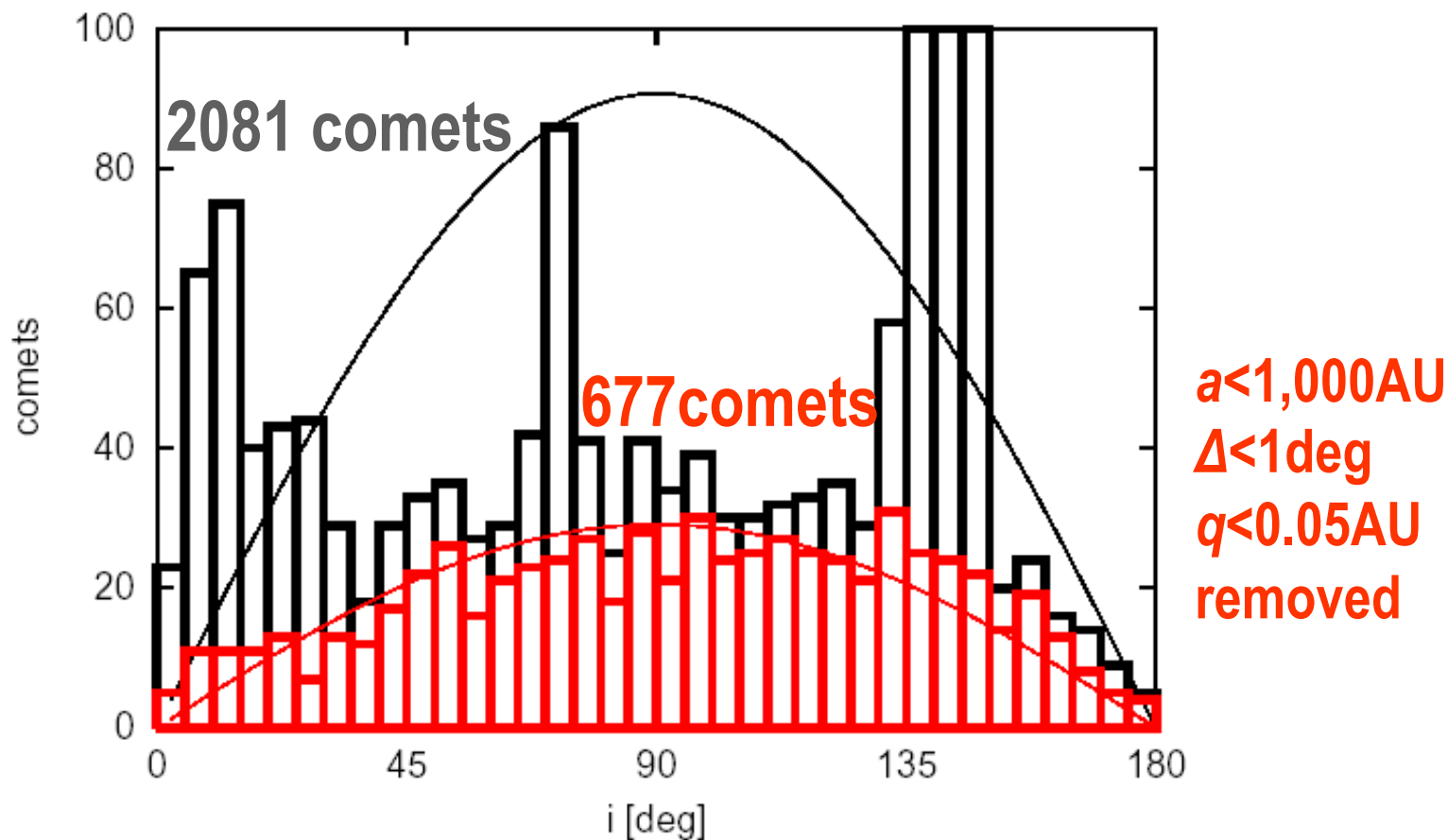
Catalogue of Cometary Orbits 2005

Sun-grazing cometsを除く

- $q < 0.01\text{AU}$ ● $0.01\text{AU} \leq q < 0.02\text{AU}$
- $0.02\text{AU} \leq q < 0.05\text{AU}$
- $0.05\text{AU} \leq q < 0.1\text{AU}$ ● $q \geq 0.1\text{AU}$



新しい軌道傾斜角分布



等方的? (K-S test=0.2%)

- 0 & 140度付近に超過?
- 90度付近に不足?

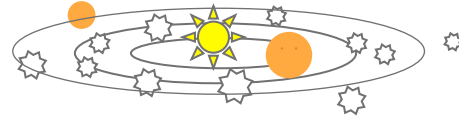
オールト雲形成

(0) 惑星形成後に残る微惑星

空間分布

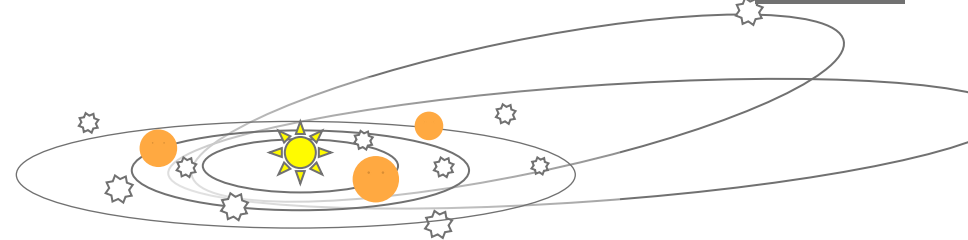
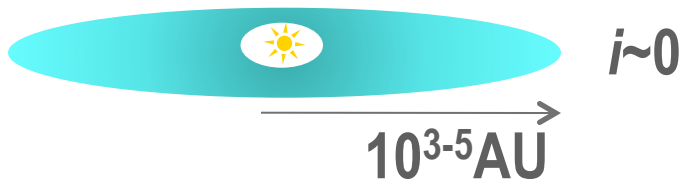


軌道



摂動天体
惑星

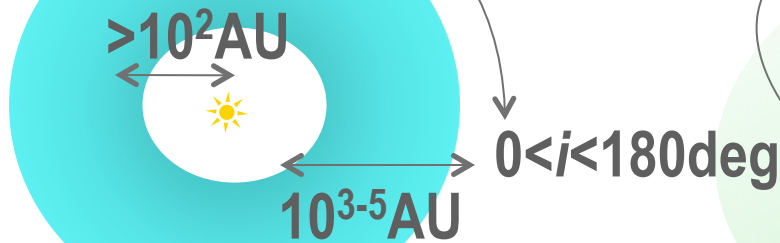
(1) 遠日点の増大



(2) - 近日点の増大

- 軌道傾斜角のランダム化

- **new cometsの生成**

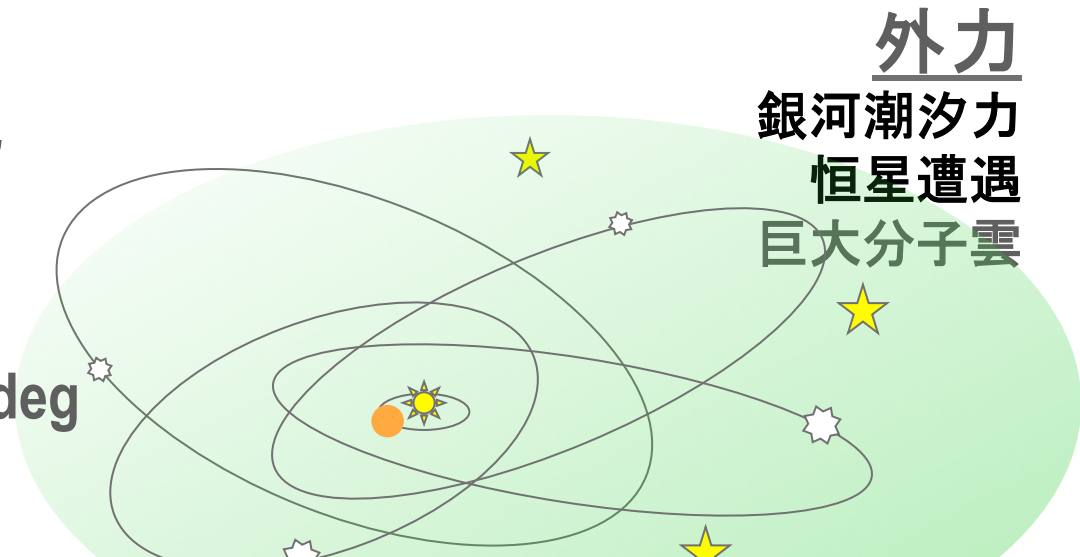


外力

銀河潮汐力

恒星遭遇

巨大分子雲



外力による軌道進化(概要)

The Galactic tide (GT)

- 動径方向成分を無視することで、銀河ポテンシャルのもとでは彗星のエネルギー Φ 、角運動量の z 成分 h は保存する。

$$\Phi = -\frac{GM_{\text{Sun}}}{2a} + \langle 2\pi G\rho_0 z^2 \rangle = \text{const.}$$

$$h_z = \sqrt{GM_{\text{Sun}}(1-e^2)} \cos i_{\text{galactic}} = \text{const.}$$

Heisler & Tremaine (1986)

G gravitational constant
total density in the solar

ρ_0 neighborhood

z distance from galactic plane

M_{Sun} solar mass

i_{galactic} inclination to the galactic plane

⇒ a は変化しない,

その他の軌道要素は周期的な変化をする

(計算で使った値: $\rho_0 = 0.1 M_{\text{Sun}}$, $i_{\text{ecliptic}} = 63 \text{ deg}$).

Higuchi+ (2007)

Passing Stars (PS)

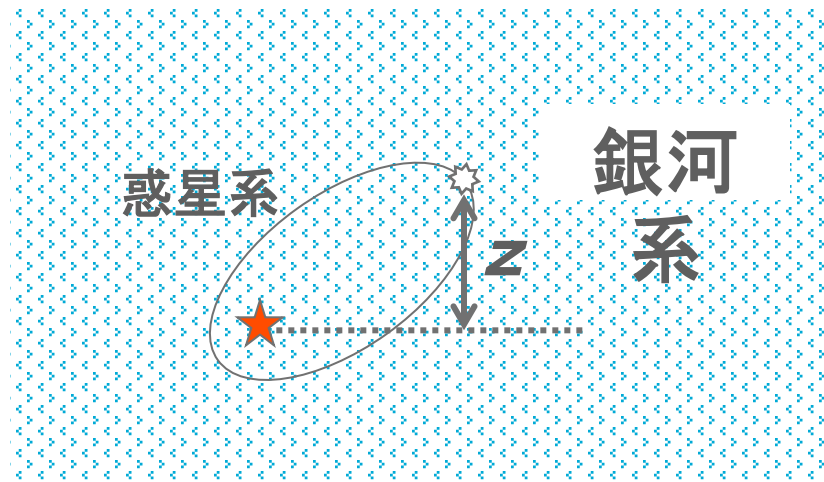
- 全軌道要素をrandomize vs. 彗星の個数を減らす(星間空間に放出)
⇒ 軌道要素が等方的分布になる頃には、彗星はほとんど残っていない

(計算方法: 衝撃近似).

銀河潮汐力(1)

* ここで考える銀河系

- 銀河の質量分布は一様
- z方向の成分のみ考慮
- 黄道面傾斜角=63度

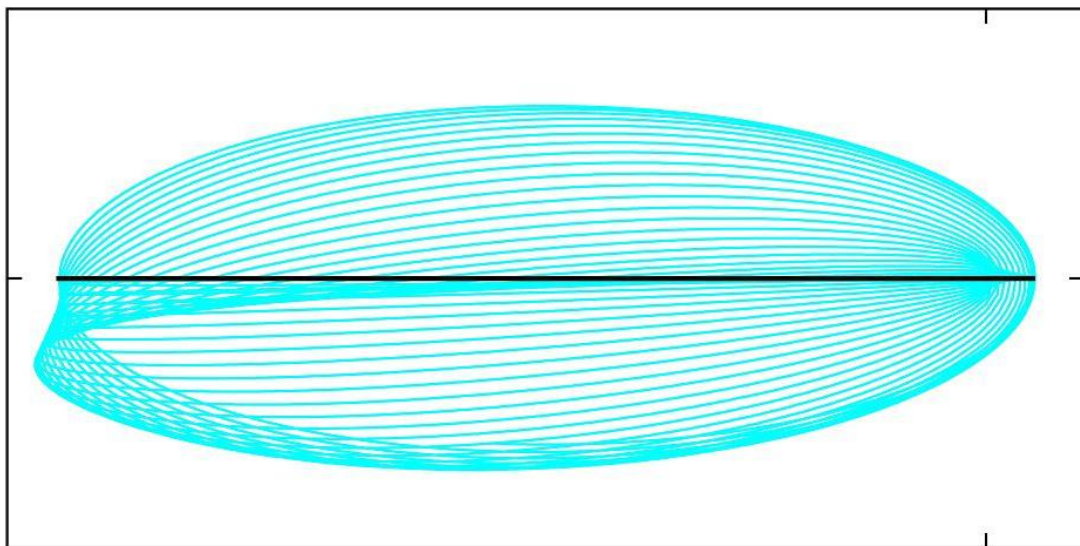
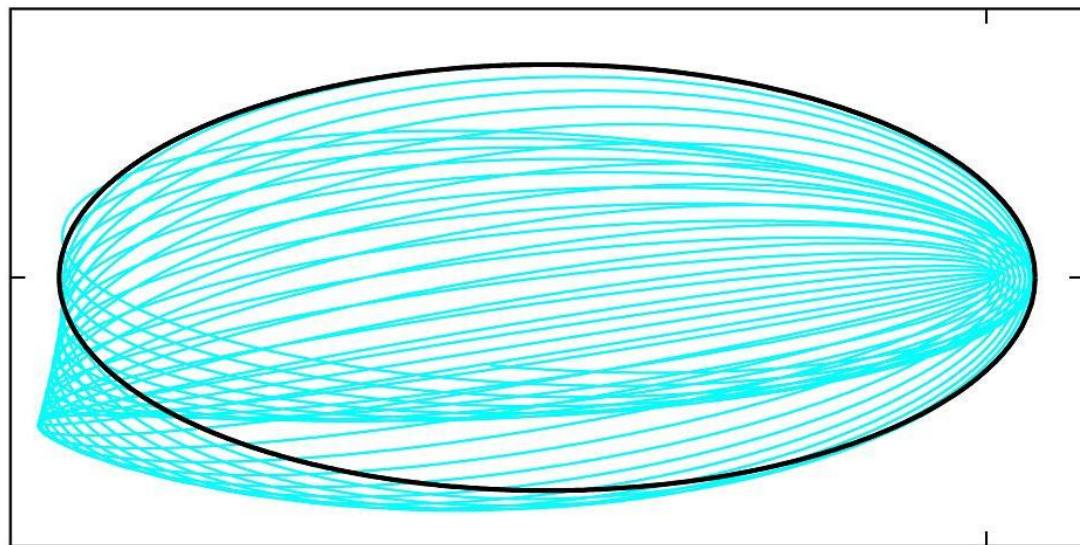


* 微惑星の運動方程式

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \underbrace{-GM_{\text{Sun}} \frac{\mathbf{r}}{r^3}}_{\text{中心星重力}} - \underbrace{4\pi G \rho_0 z}_{\text{銀河潮汐力}}$$

G : 万有引力定数
 M_{Sun} : 中心星質量
 r : 中心星に対する位置
 ρ_0 : 銀河密度
 z : z方向の距離の差

銀河潮汐力(2) 軌道進化の例(数値計算)



初期の軌道 ———

銀河面から 63度
の傾き

軌道の形・方向



離心率(e)
近点引数(ω)

傾きの大きさ・方向



軌道傾斜角(i)
昇交点経度(Ω)

銀河潮汐力(3-1) 軌道要素の進化の解析解

* 微惑星のエネルギー $\Phi = -\frac{GM_{\text{Sun}}}{2a} + \underbrace{2\pi G\rho_0 z^2}_{\text{摂動関数}} = \text{const.}$

摂動関数を軌道要素であらわし、1ケプラー周期で平均すると、 $\langle \text{摂動関数} \rangle = \pi G\rho_0 a^2 \sin^2 i_{\text{銀河面}} (1 - e^2 + 5e^2 \sin^2 \omega) = R$

Heisler & Tremaine (1986)

R をラグランジュの惑星方程式に代入して以下を得る。

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial \varepsilon} = 0 \rightarrow a \text{ は時間変化しない}$$

$$\frac{de}{dt} = -20\pi G\rho_0 a^{3/2} (1 - e^2)^{1/2} e^2 \sin^2 i_{\text{銀河面}} \sin \omega \cos \omega$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = 2\pi G\rho_0 a^{3/2} \frac{\cos i_{\text{銀河面}}}{\sqrt{1 - e^2}} (1 - e^2 + 5e^2 \sin^2 \omega)$$

銀河潮汐力(3-2) 軌道要素の進化の解析解

$d e / d t$ を積分すると $e^2 = e_{\min}^2 + (e_{\max}^2 - e_{\min}^2) \text{cn}^2(\theta, k^2)$

cn: ヤコビ楕円積分

$$\theta = \theta(a, \rho_0, c, L_z, t) \quad k = k(c, L_z)$$

Matese & Whitman (1989), Kinoshita & Nakai (1999, 2007)

* 微惑星の2個の保存量

エネルギー

$$c = \sin^2 i_{\text{銀河面}} (1 - e^2 + 5e^2 \sin^2 \omega) = \text{const.}$$

角運動量のz成分

$$L_z = (1 - e^2)^{\frac{1}{2}} \cos i_{\text{銀河面}} = \text{const.}$$

e がわかれば $i_{\text{銀河面}}$ も ω もわかる

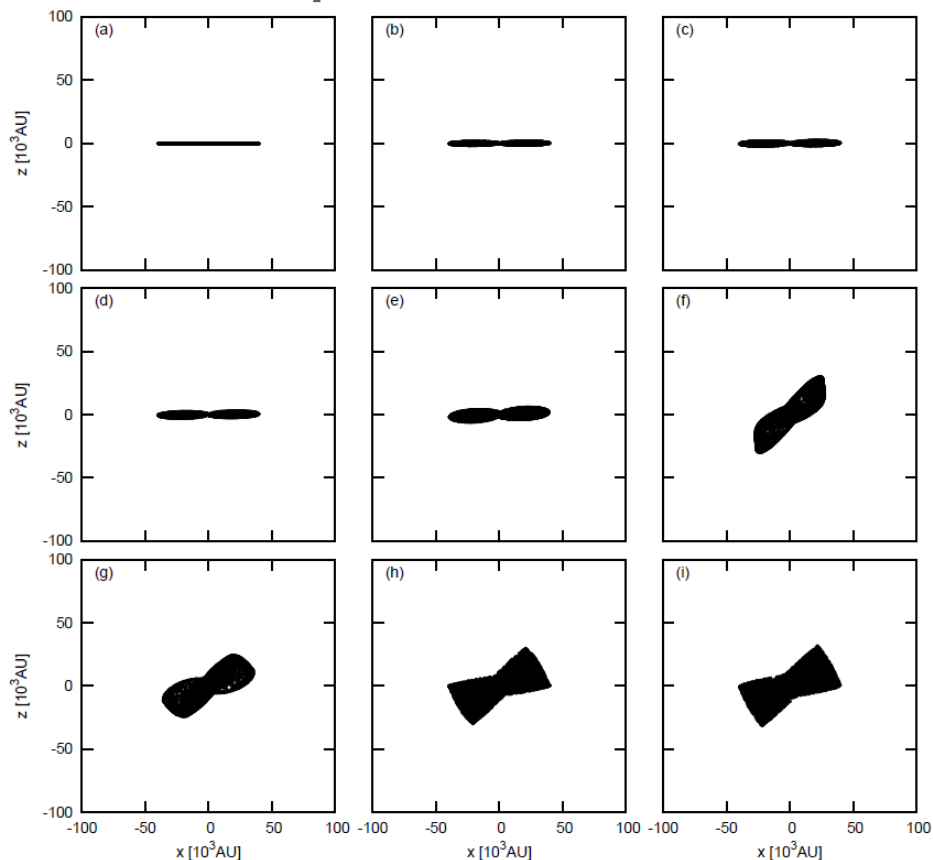
$d\Omega/dt$ を積分すると $\Omega = \Omega_{\text{initial}} - A\Pi(\theta, \alpha^2)$

Π : 第3種一般楕円積分 $A = A(a, \rho_0, c, L_z) \quad \alpha = \alpha(c, L_z)$

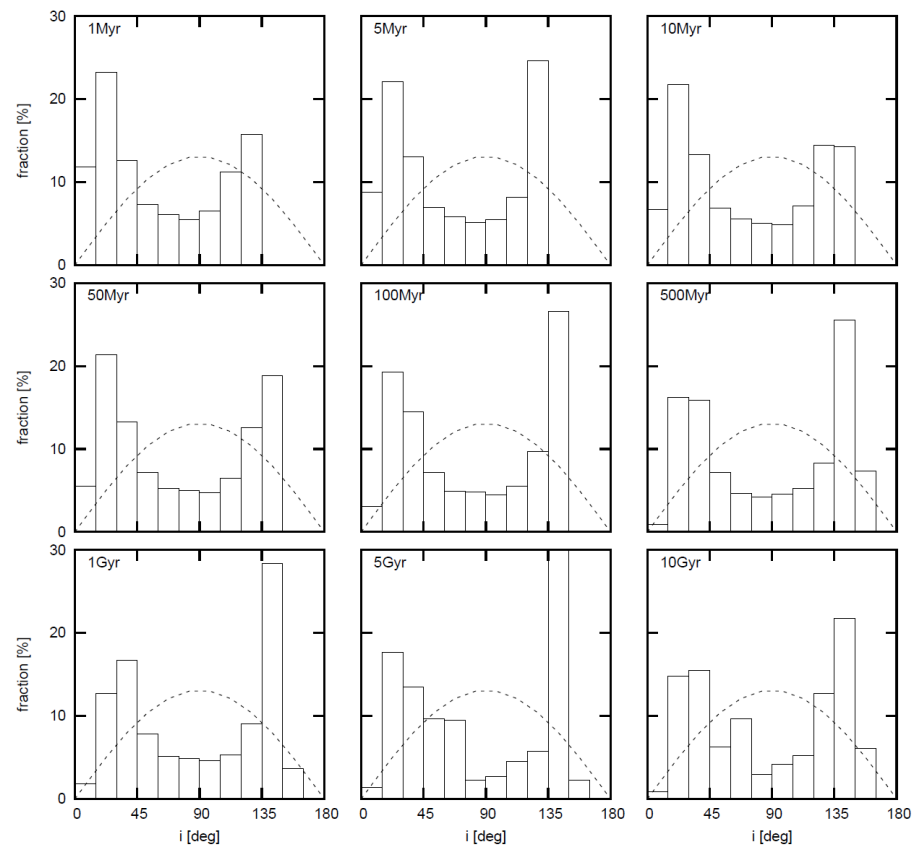
Breiter & Ratajczak (2005)

銀河潮汐力によるオールト雲形成 ($a_{\text{initial}}=20000\text{AU}$)

spatial distribution



inclination distribution



- 似た周期での似た軌道進化
- 等方的にはならない

恒星遭遇(1)

恒星遭遇の頻度:

10万年に1個・太陽から1pc以内
→オールト雲形成に影響を与える

i の等方化に効くので
は？(銀河潮汐力だけでは無理)

先行研究 (e.g., Heisler et al. 1987, Dybczyński 2002)

- new comet の生成に着目
- 初期条件はすでに球殻状に進化したオールト雲
- ぶつける恒星セットは1種類

本研究

- オールト雲の**形成**に着目
- 初期条件は円盤分布
- 恒星が微惑星に与える速度変化を衝撃近似を用いて見積もる

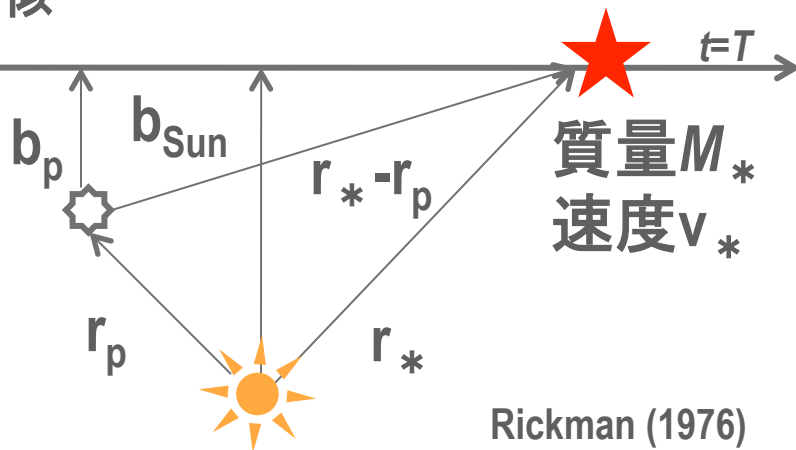


恒星遭遇(2) 衝撃近似

恒星遭遇が天体に与える速度変化を表す近似

仮定

1. 太陽に対して微惑星は静止している。
2. 恒星遭遇は、太陽系との最接近点を中心に対称である。
3. 恒星の通過速度は一定である。



Rickman (1976)

太陽に対する微惑星
の
速度変化 Δv

$$= \text{微惑星の速度変化} - \text{太陽の速度変化}$$

$$= \int_{-T}^T \left(\begin{array}{c} \text{恒星から} \\ \text{微惑星が受ける} \\ \text{力} \end{array} \right) dt - \int_{-T}^T \left(\begin{array}{c} \text{恒星から} \\ \text{太陽が受ける力} \end{array} \right) dt$$

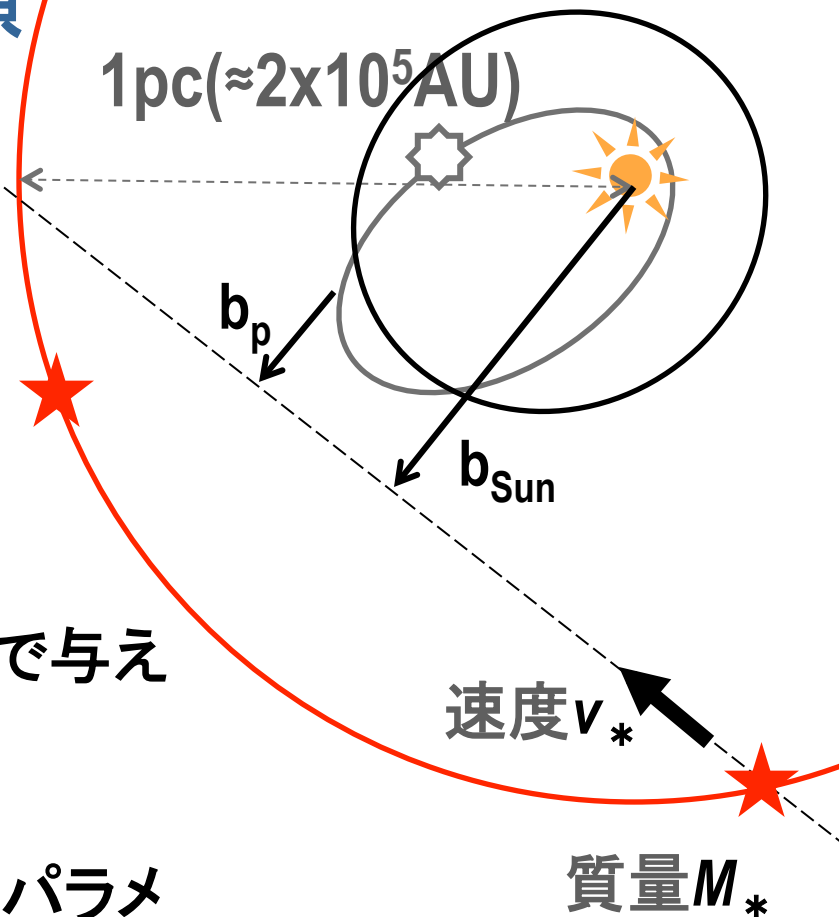
$$= GM_* \left(\int_{-T}^T \frac{\mathbf{r}_* - \mathbf{r}_p}{|\mathbf{r}_* - \mathbf{r}_p|^3} dt - \int_{-T}^T \frac{\mathbf{r}_*}{|\mathbf{r}_*|^3} dt \right)$$

- 位置 r をインパクトパラメータ b と恒星速度 v_* で表す
- $v_* T \gg b$ とする

$$\Delta \mathbf{v} = \frac{2GM_*}{v_*} \left(\frac{\mathbf{b}_p}{b_p^2} - \frac{\mathbf{b}_{\text{Sun}}}{b_{\text{Sun}}^2} \right)$$

恒星遭遇(3) 計算手順

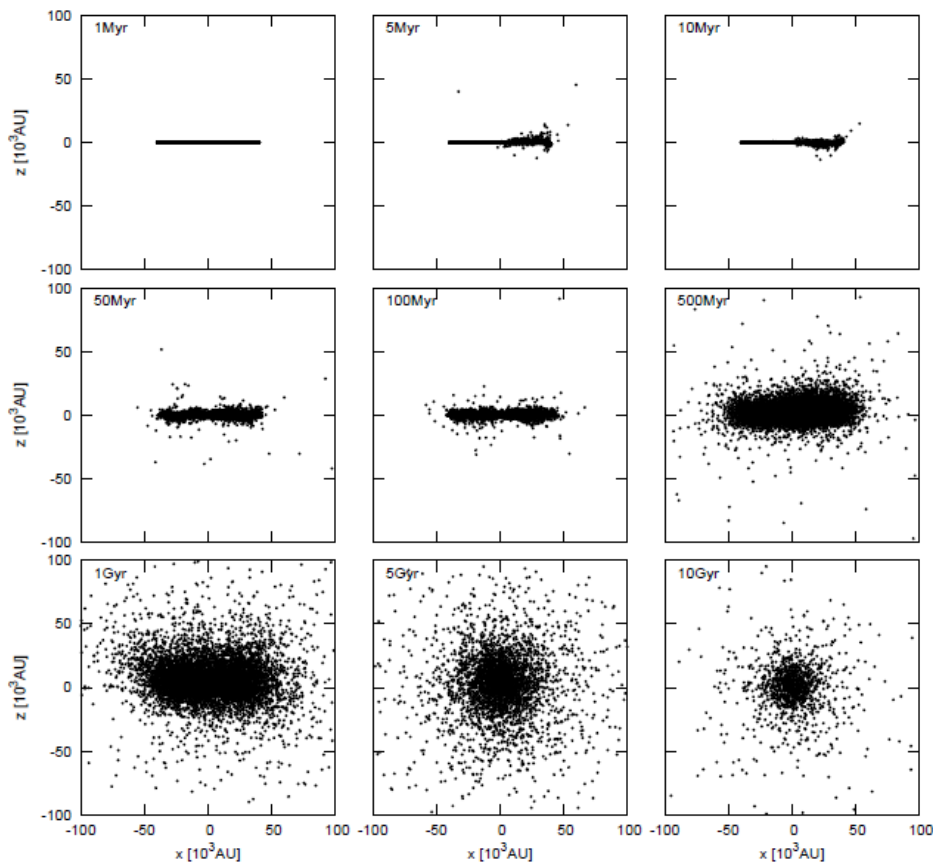
1. 恒星が遭遇するまでの時間 Δt を計算し、微惑星軌道を Δt 進める。
2. 恒星のパラメータを決める。
 - ① 位置 ($r_* = 1\text{pc}$) を決める。
 - ② 質量 M_* を決める。
 - ③ 速度 v_* の各成分をガウス分布で与える。
3. 微惑星の軌道変化を計算する。
 - ① 恒星と太陽・微惑星のインパクトパラメータ b_{Sun} 、 b_p を計算する。
 - ② 微惑星の速度変化 Δv を衝撃近似で計算し、速度を $v \rightarrow v + \Delta v$ と変化させる。



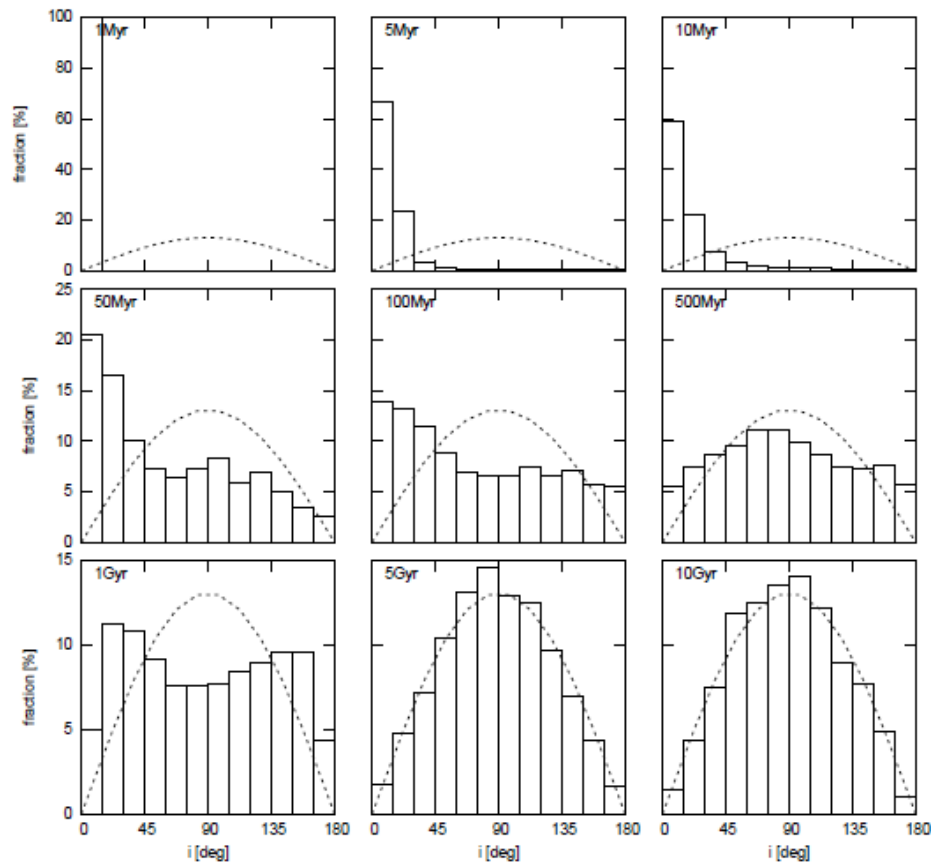
$$\Delta \mathbf{v} = \frac{2GM_*}{v_*} \left(\frac{\mathbf{b}_p}{b_p^2} - \frac{\mathbf{b}_{\text{Sun}}}{b_{\text{Sun}}^2} \right)$$

恒星によるオールト雲形成 ($a_{\text{initial}}=20\,000\text{AU}$)

spatial distribution



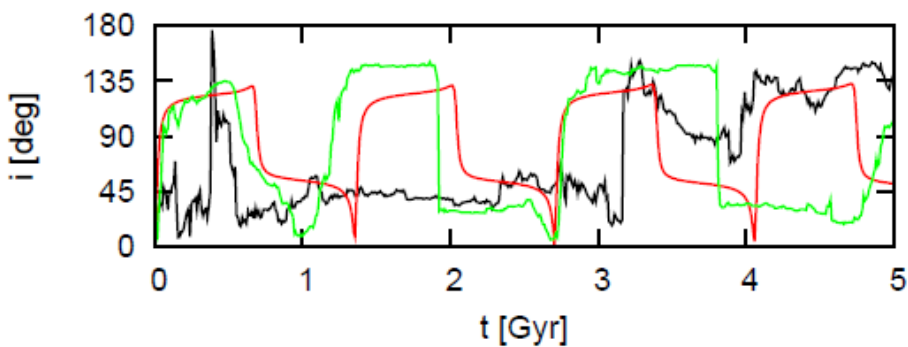
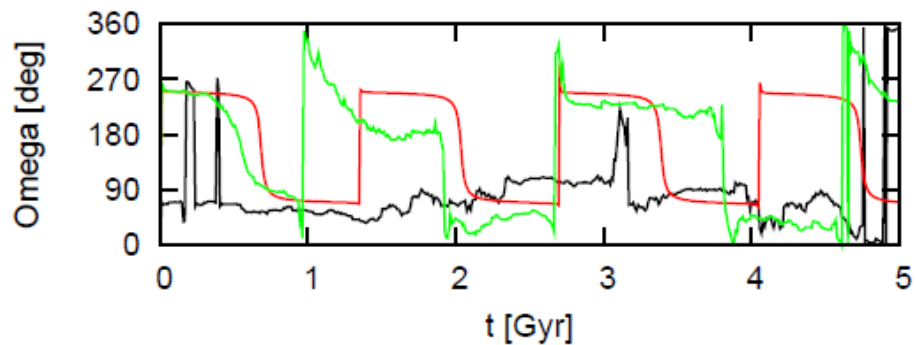
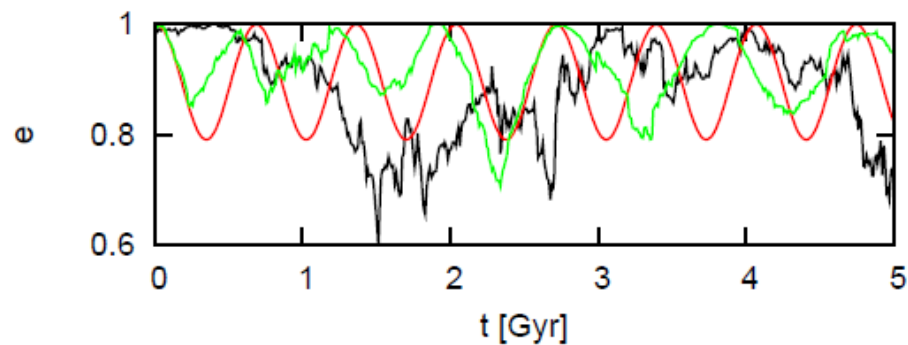
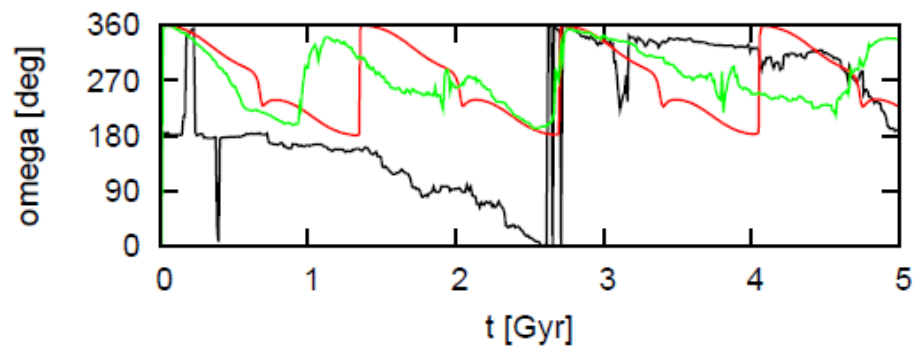
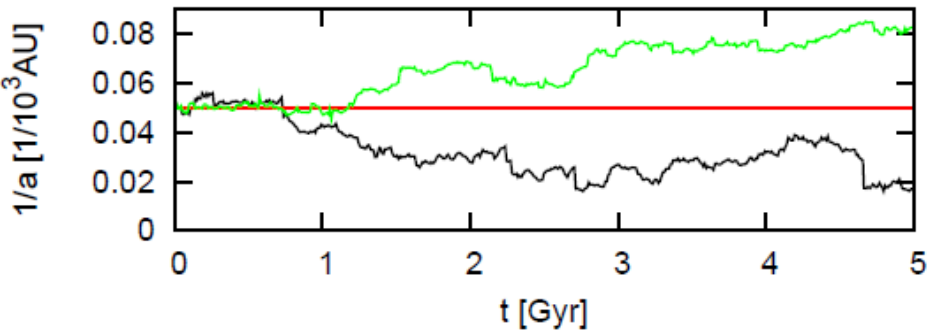
inclination distribution



- 軌道傾斜角はすぐに初期値を忘れる
- 平坦な分布を経て等方に近づく
- この例では50億年でおおよそ半減

両外力による軌道進化例

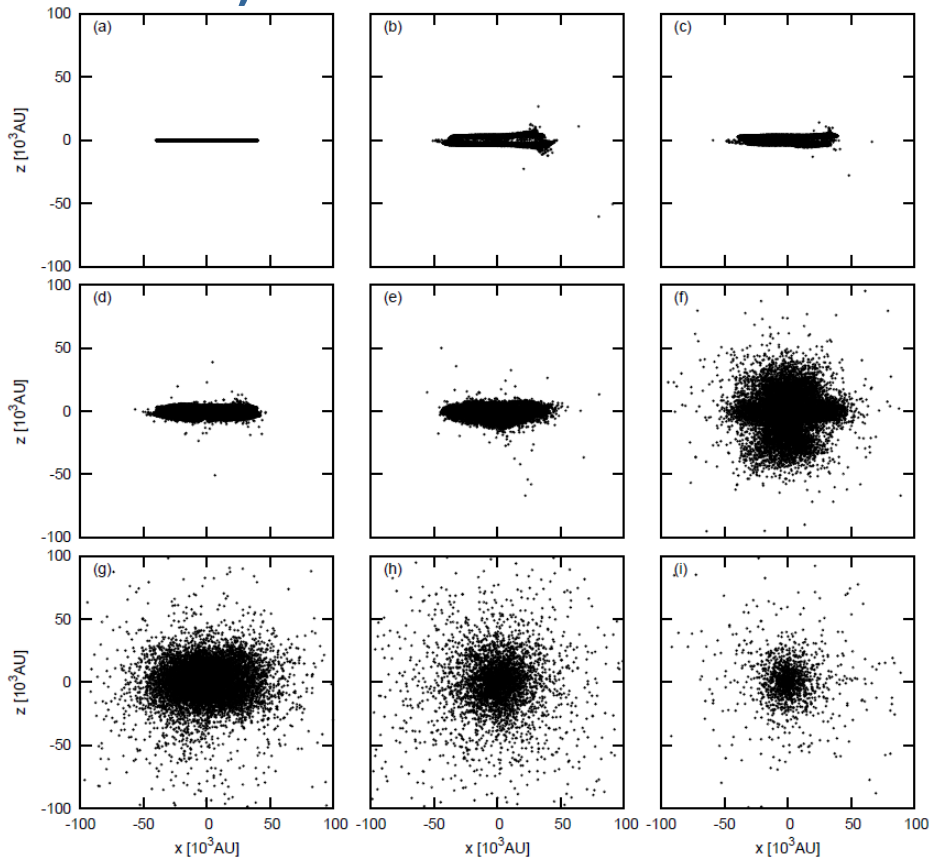
($a_{\text{initial}}=20\,000\text{AU}$)



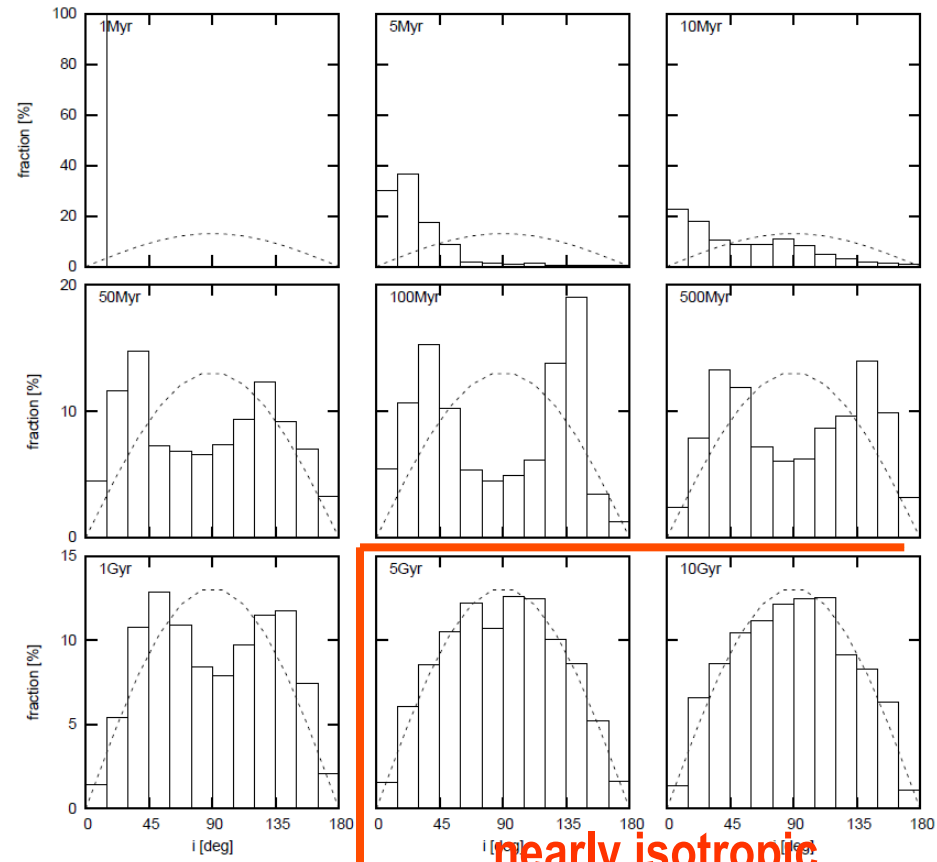
軌道進化に考慮した外力
恒星 (ランダム)
銀河潮汐力 (a 以外周期的)
両方 (中間的)

恒星と銀河によるオールト雲形成 ($a_{\text{initial}}=20$

000AU) spatial distribution



inclination distribution



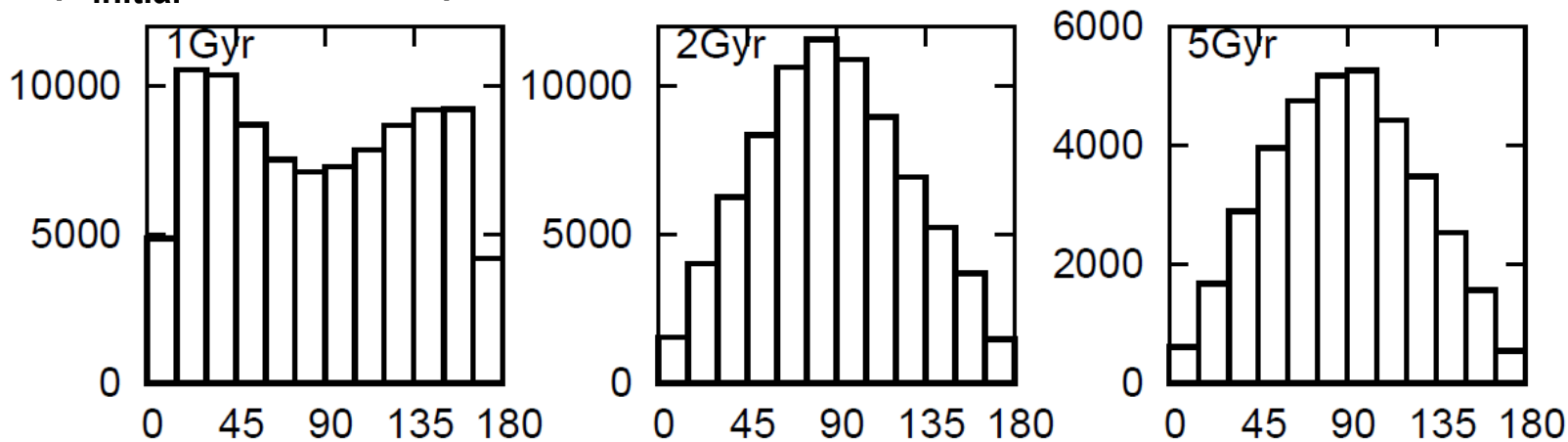
知りたいこと

- (1) オールト雲彗星の軌道傾斜角分布
- (2) オールト雲由来の長周期彗星の軌道傾斜角分布
- (3) (1)と(2)の関係

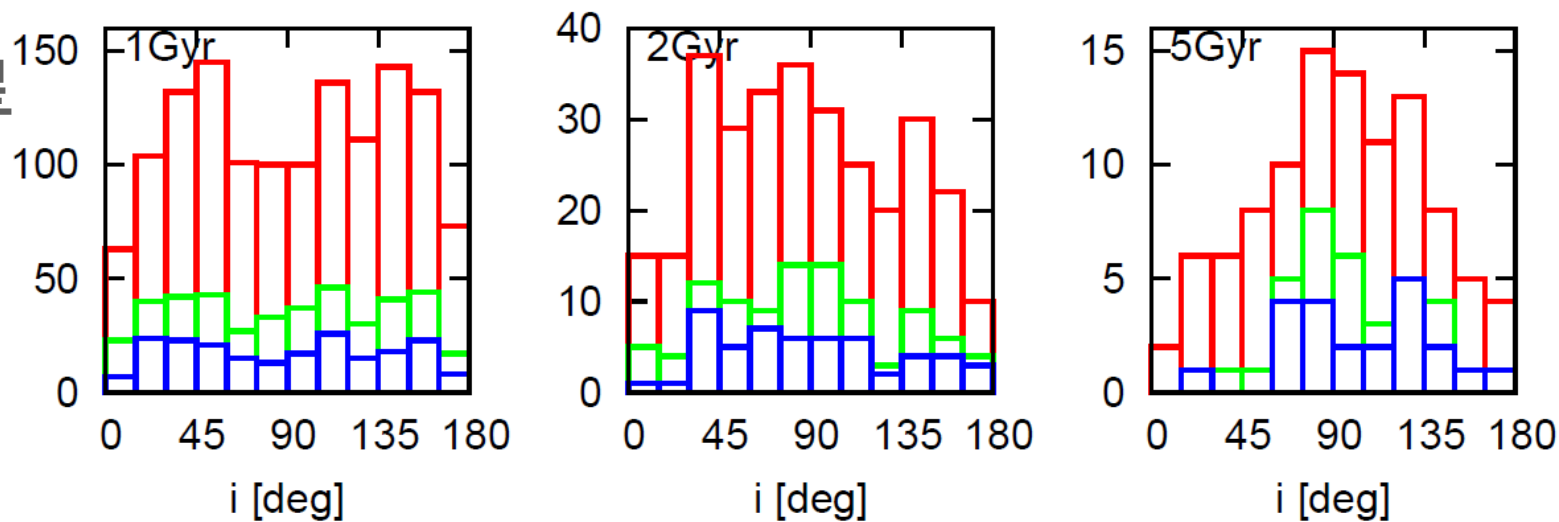
恒星遭遇によるnew cometの傾斜角分布 (1)

時間進化 ($a_{\text{initial}}=20\,000\text{AU}$)

(1) 全彗星
c



(2) 内側彗星
 $q < 30\text{AU}$
 $q < 10\text{AU}$
 $q < 5\text{AU}$
c



(1) と (2) に強い相関は見られない

恒星遭遇によるnew cometの傾斜角分布 (2)

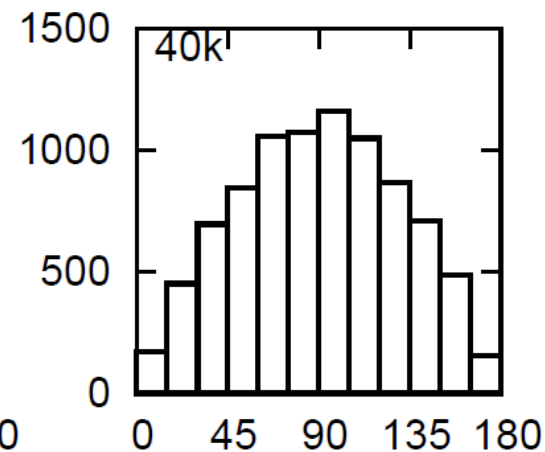
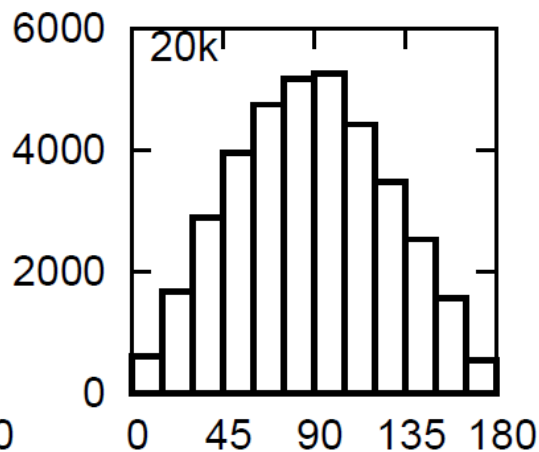
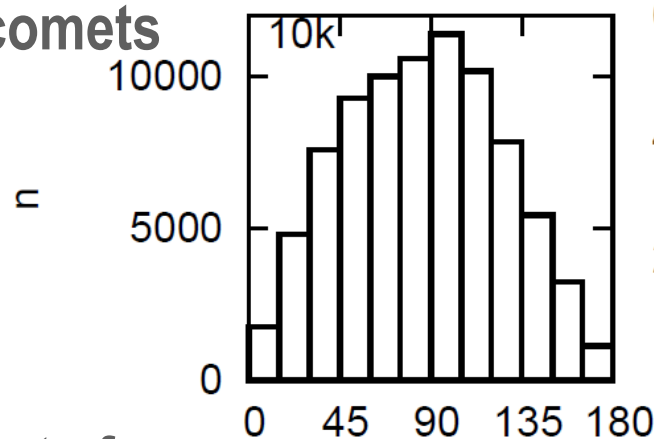
a_{initial} による違い (50億年後)

$a_{\text{initial}}=10\ 000\text{AU}$

$a_{\text{initial}}=20\ 000\text{AU}$

$a_{\text{initial}}=40\ 000\text{AU}$

(1) All comets

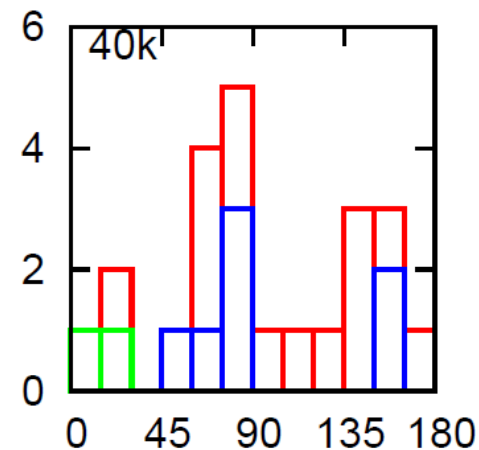
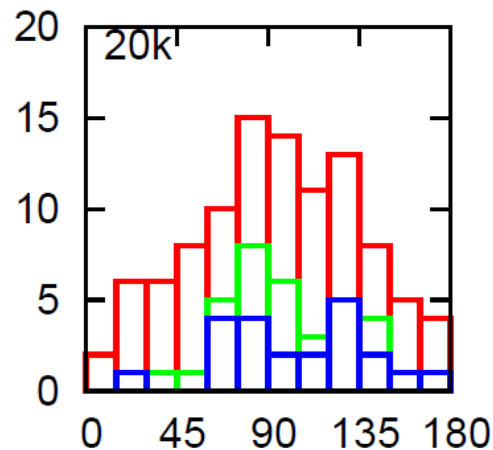
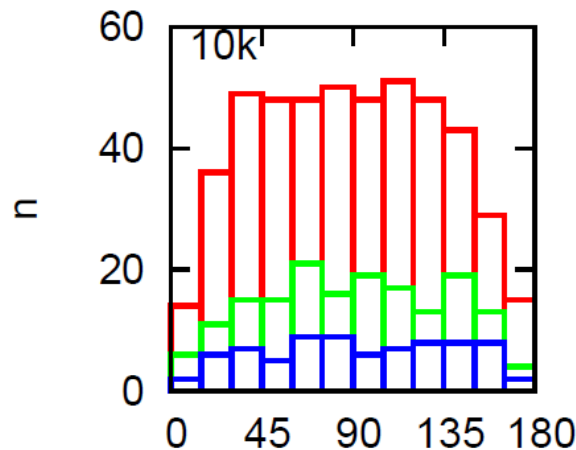


(2) comets for

$q < 30\text{AU}$

$q < 10\text{AU}$

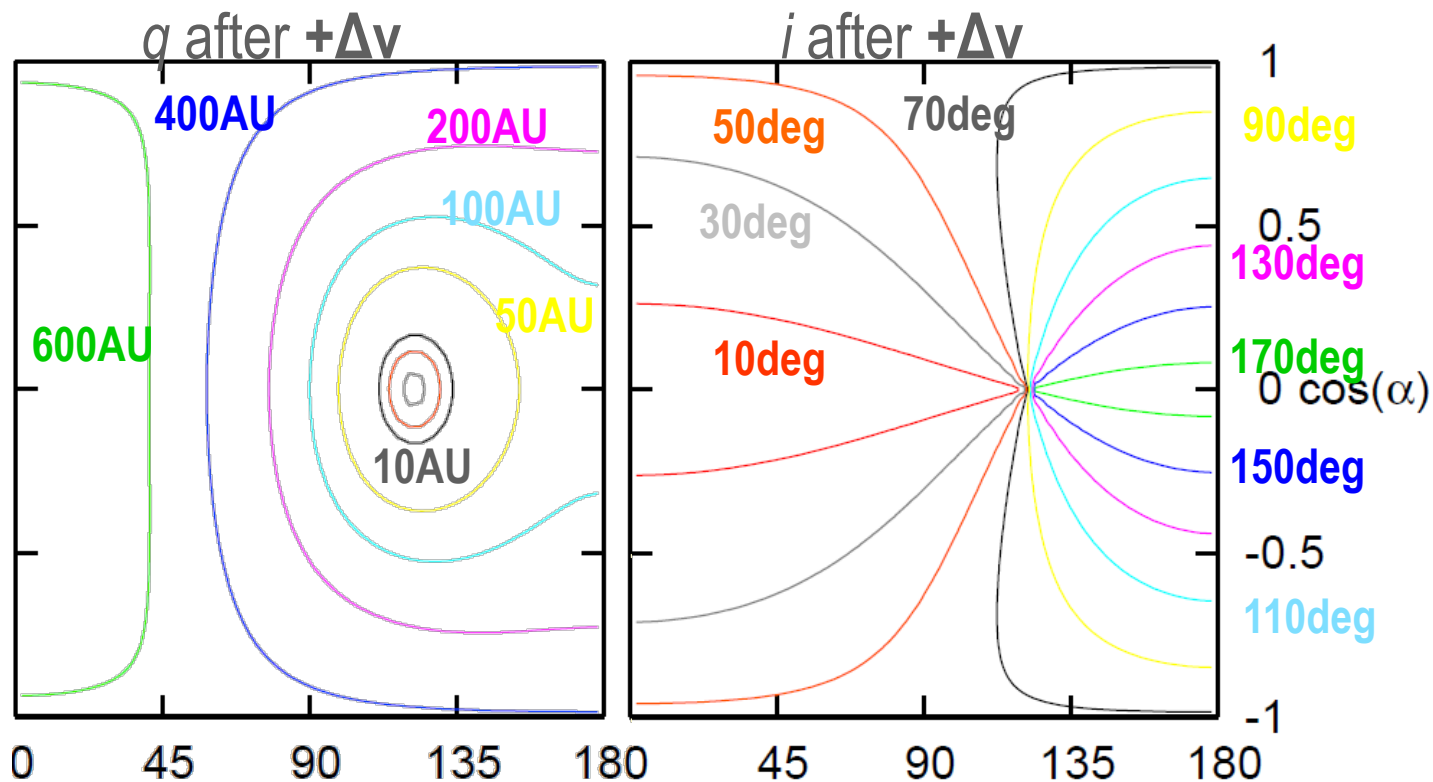
$q < 5\text{AU}$



(1) と (2) に強い相関は見られない

1回の恒星遭遇による i, q の変化

$a=20,000\text{AU}$, $q=100\text{AU}$, $i=0$ の彗星が遠日点で $\Delta v(=20\text{m/s})$ の速度変化を角度 α & β 方向に受けた場合の近日点距離と傾斜角の変化



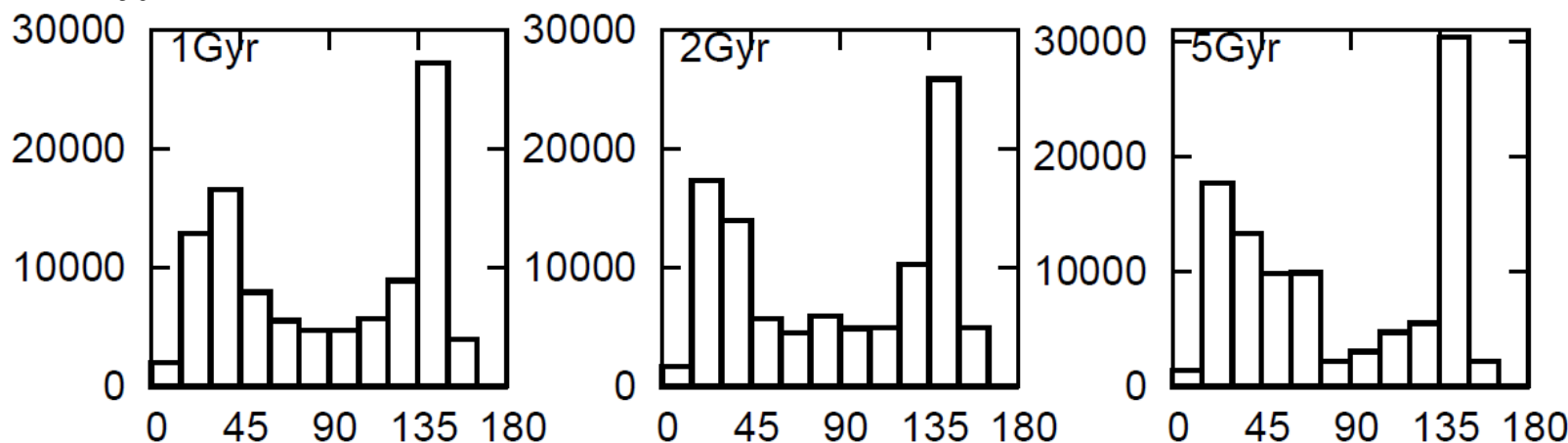
new cometのとりうる傾斜角の範囲は0-180度でほぼ一様分布

- new cometは元の傾斜角を忘れて内側にやってくる
- 1回の恒星遭遇で作られたnew comet showerの傾斜角分布は一様

銀河潮汐力によるnew cometの傾斜角分布

(1) 時間進化 ($a_{\text{initial}}=20\,000\text{AU}$)

(1) 全彗星
c

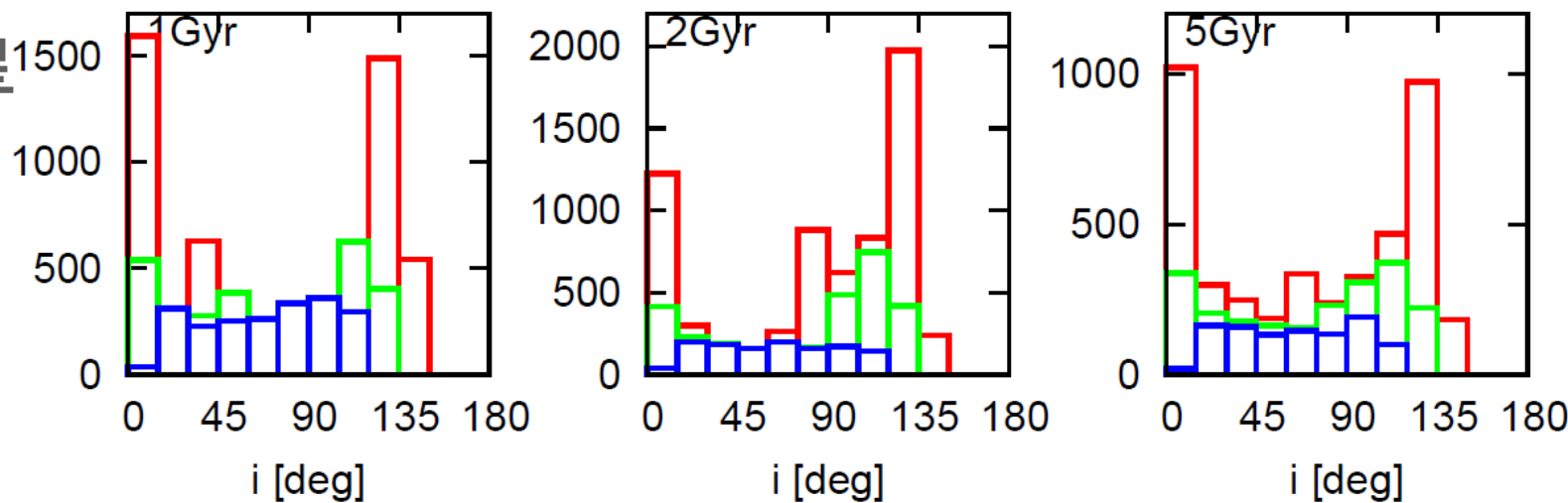


(2) 内側彗星
c

$q < 30\text{AU}$

$q < 10\text{AU}$

$q < 5\text{AU}$



(1) と (2) に強い相関は見られない

銀河潮汐力によるnew cometの傾斜角分布

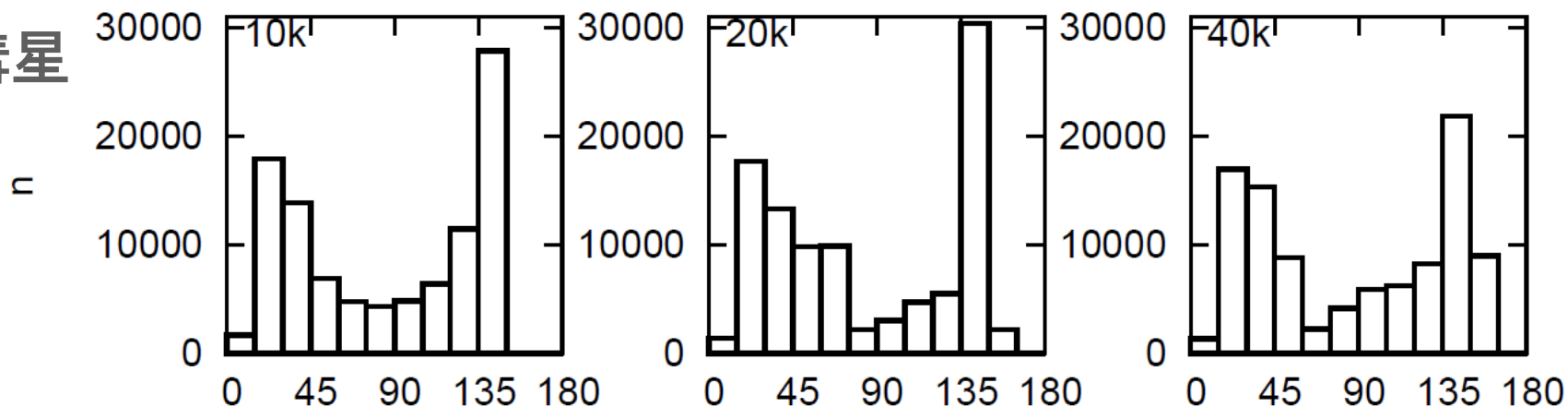
(2) a_{initial} による違い (50億年後)

$a_{\text{initial}}=10\,000\text{AU}$

$a_{\text{initial}}=20\,000\text{AU}$

$a_{\text{initial}}=40\,000\text{AU}$

(1) 全彗星

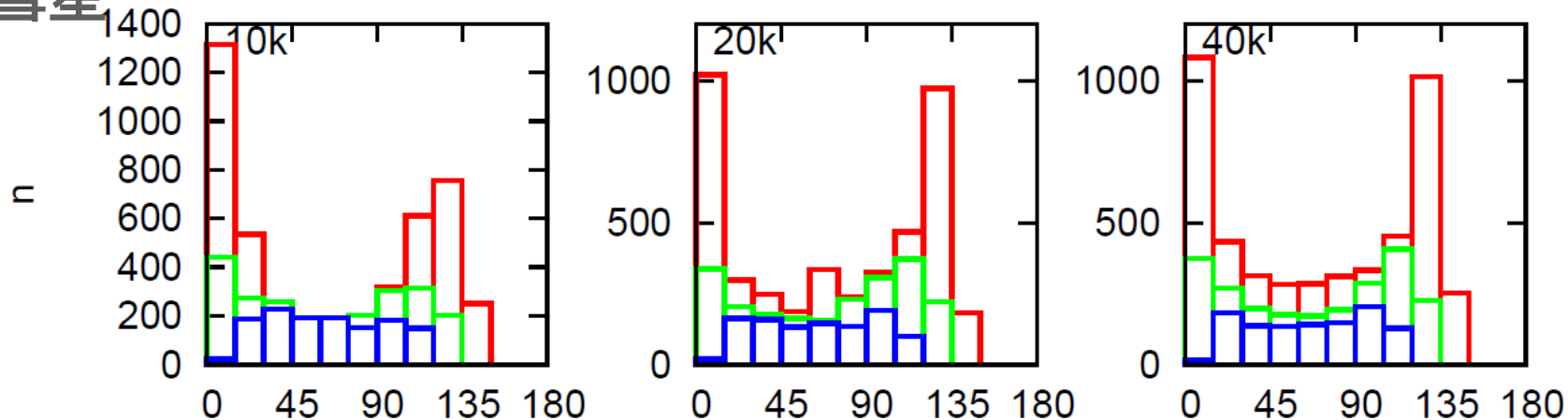


(2) 内側彗星

$q < 30\text{AU}$

$q < 10\text{AU}$

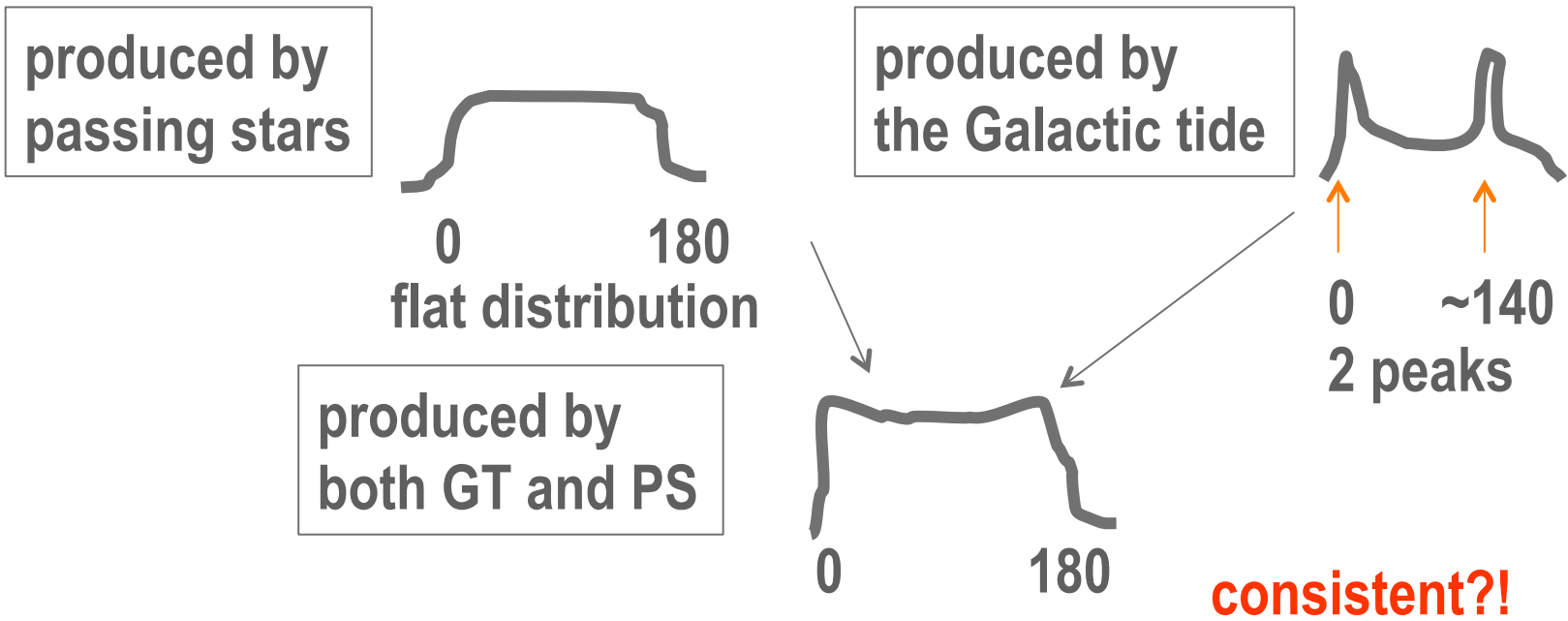
$q < 5\text{AU}$



(1) と (2) に強い相関は見られない

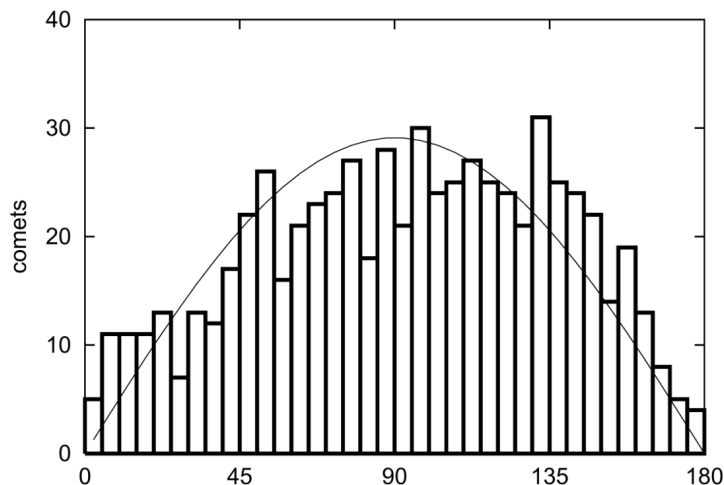
理論と観測の比較

理論からは、new cometsの傾斜角分布は以下のようなになる。



Catalogue of Cometary Orbits 2005 を加工した新しい軌道傾斜角分布

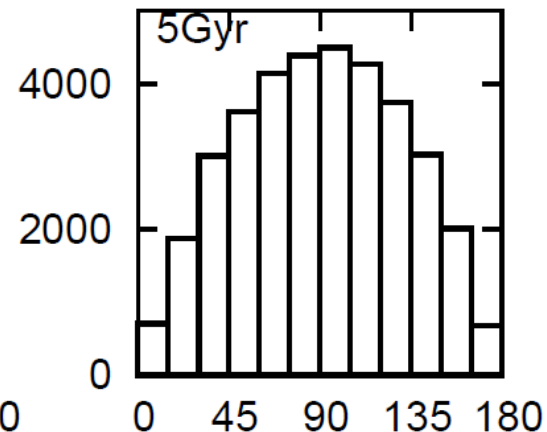
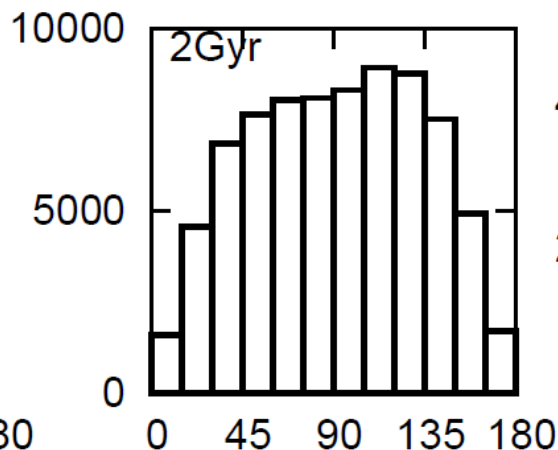
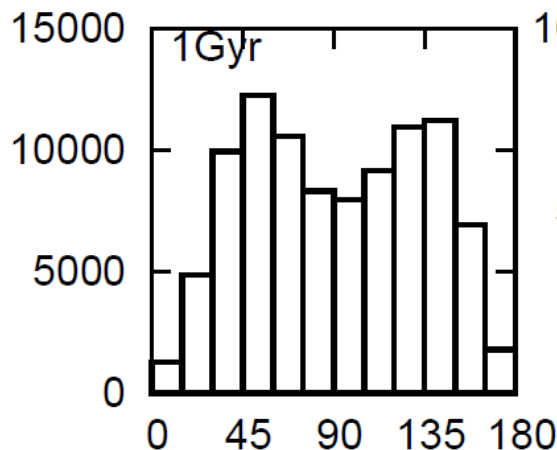
- 0 & 140度付近に超過?
- 90度付近に不足?



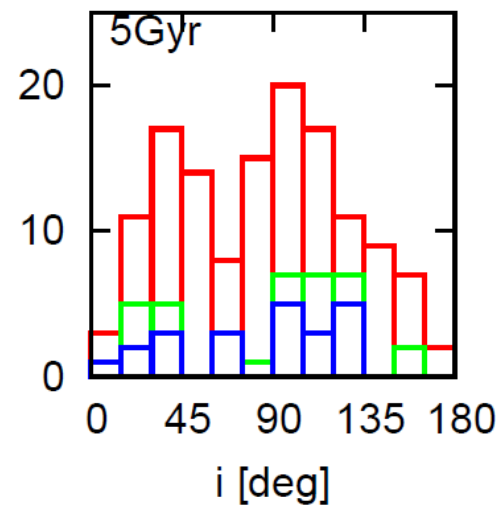
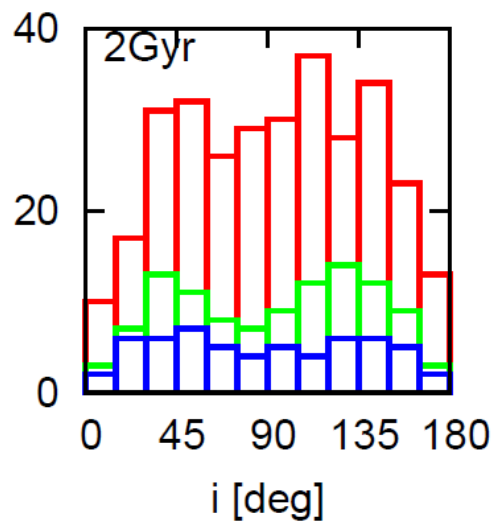
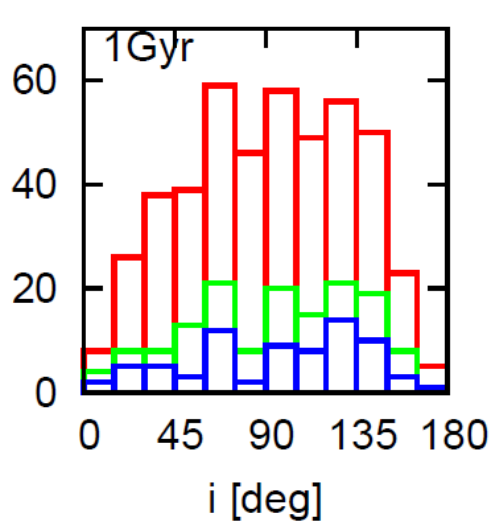
GTとPSによるnew cometの傾斜角分布 (1)

時間進化 ($a_{\text{initial}}=20\,000\text{AU}$)

(1) 全彗星
c

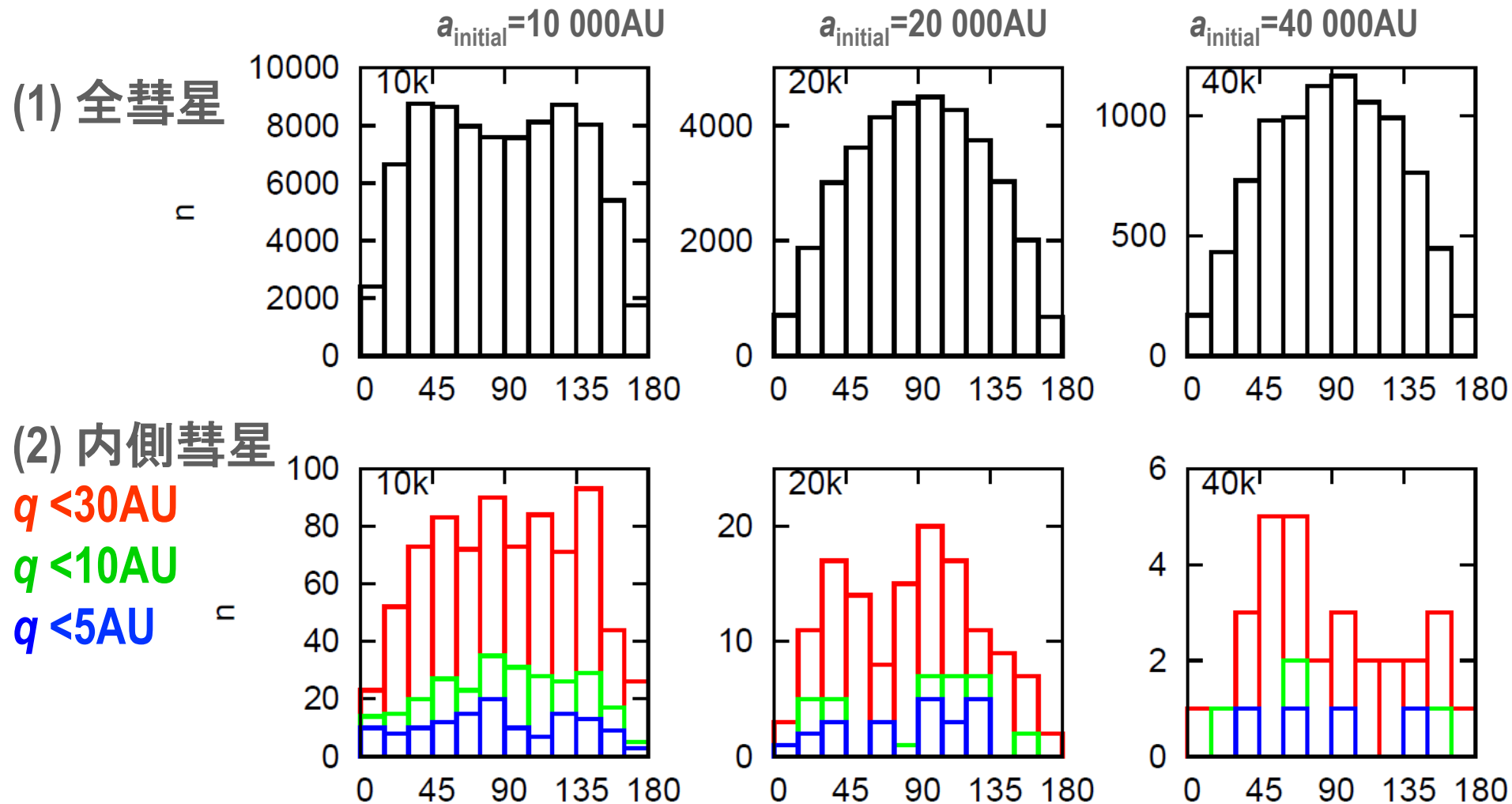


(2) 内側彗星
 $q < 30\text{AU}$
 $q < 10\text{AU}$
 $q < 5\text{AU}$
c



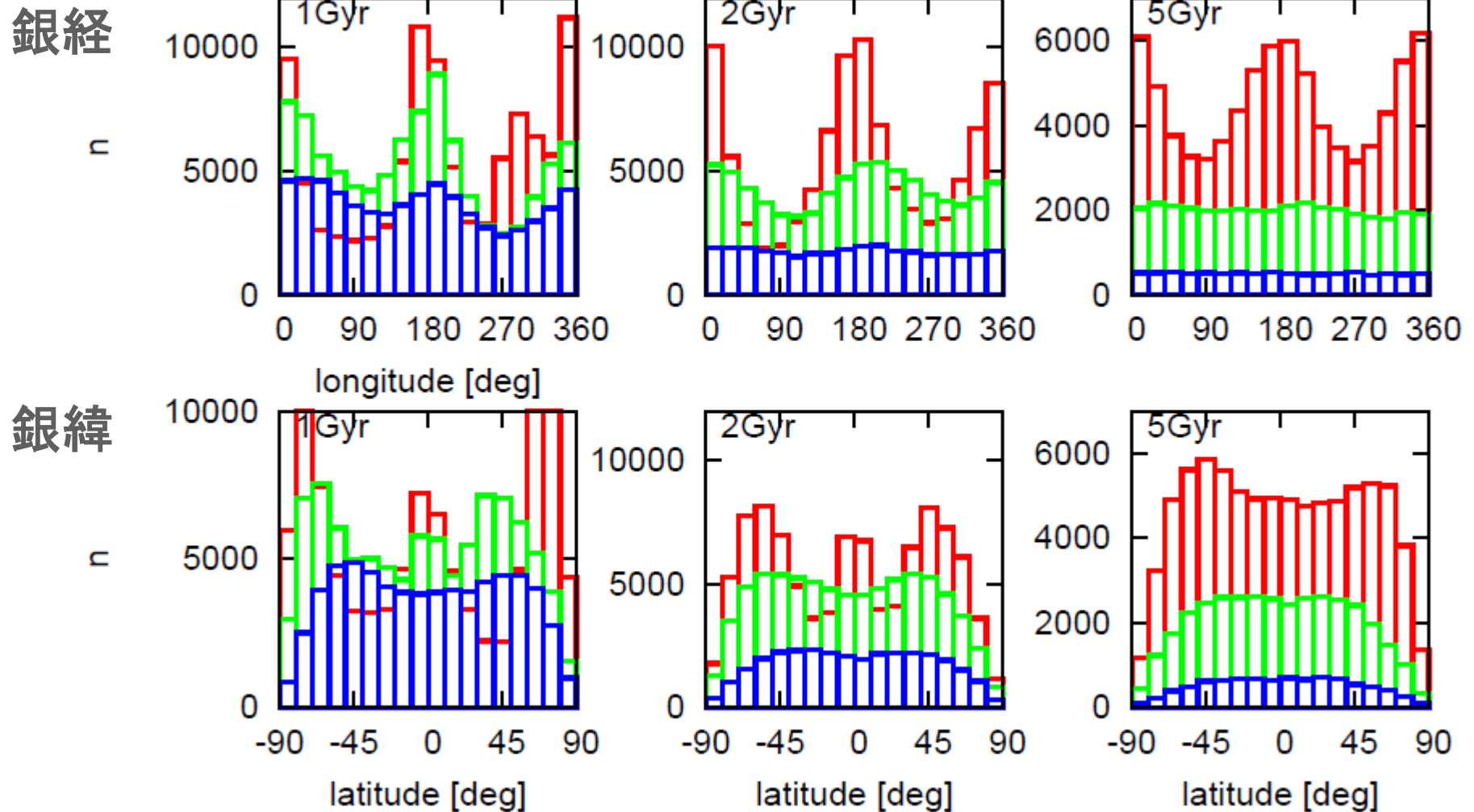
GTとPSによるnew cometの傾斜角分布 (2)

a_{initial} による違い (50億年後)



軌道傾斜角より、軌道の向き(遠日点の銀経・銀緯)をみるべきか？

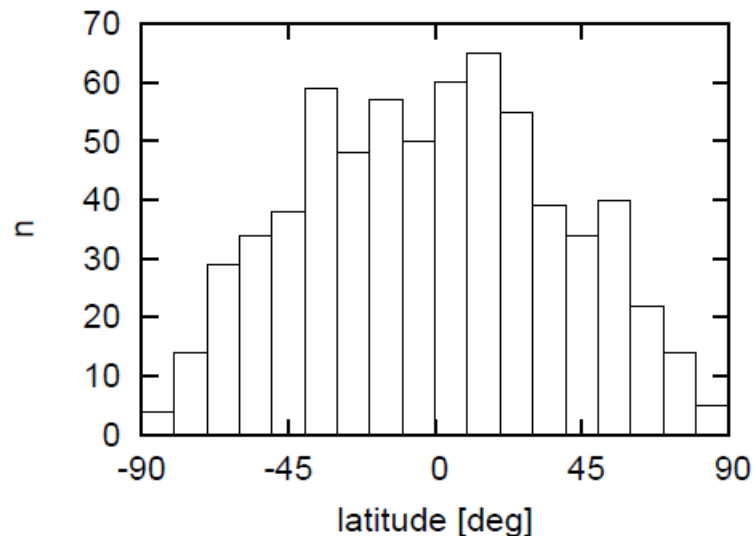
GT&PSによるオールト雲の銀経・銀緯分布



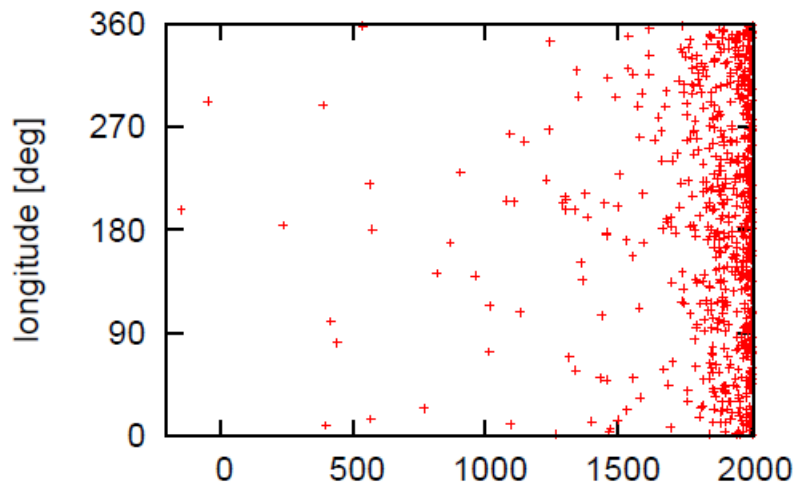
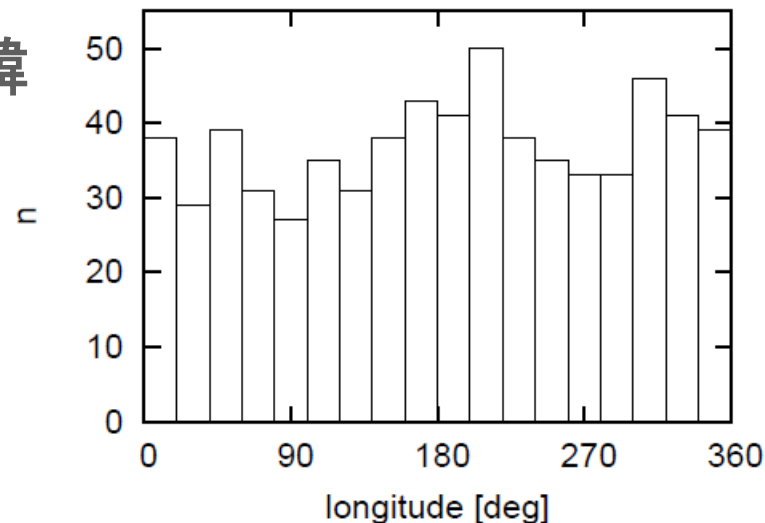
$a_{\text{initial}} < 10,000 \text{ AU}$ $a_{\text{initial}} < 20,000 \text{ AU}$ $a_{\text{initial}} < 40,000 \text{ AU}$

遠日点の銀経・銀緯分布(1) catalogue 2005

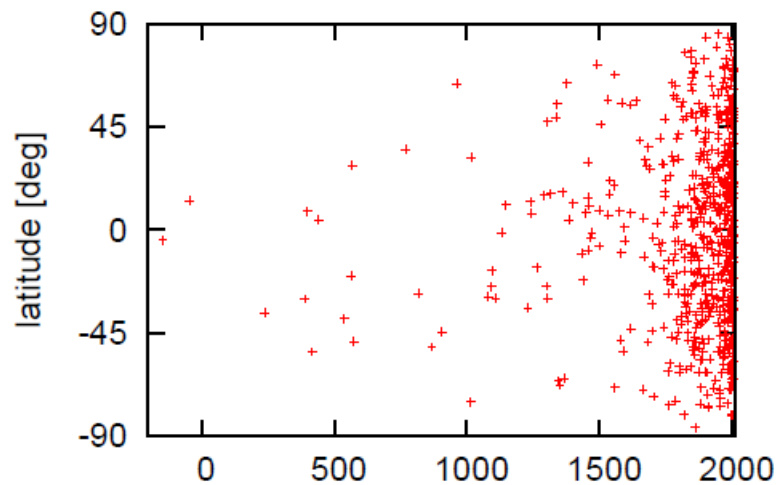
銀経



銀緯



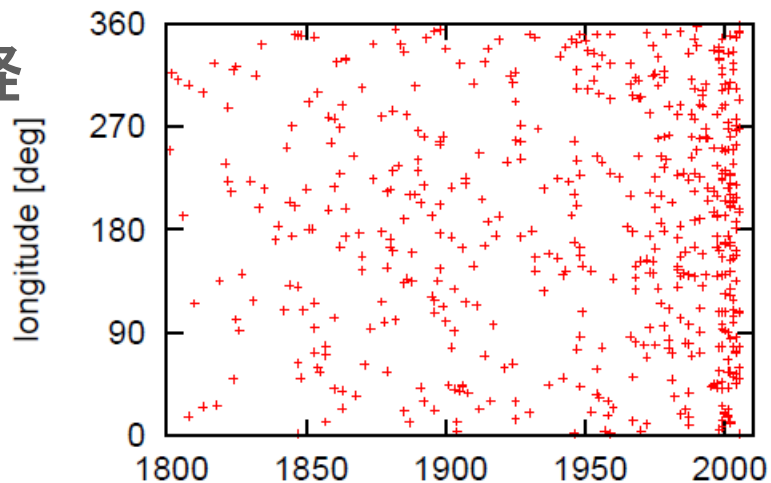
発見された
年



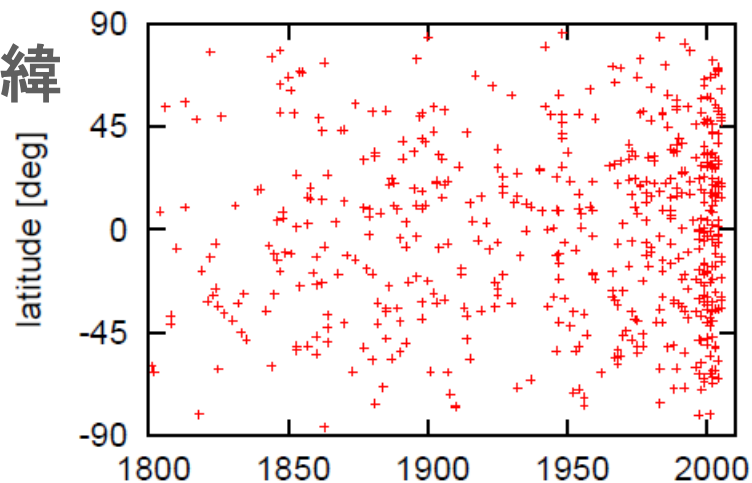
発見された
年

遠日点の銀経・銀緯分布(2) catalogue 2005

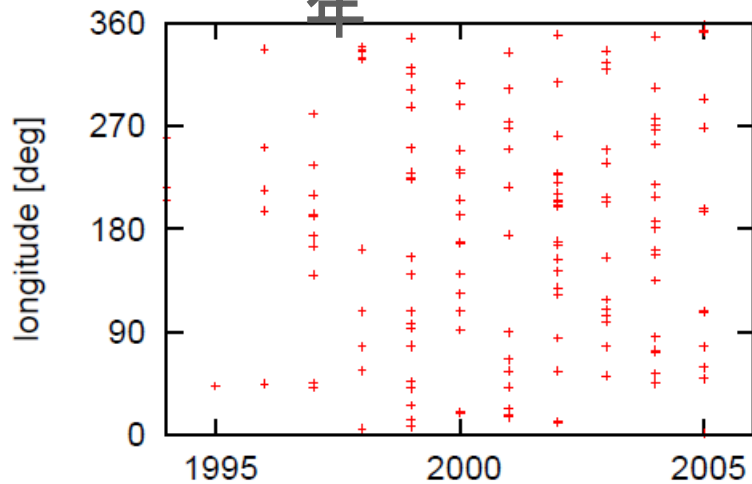
銀経



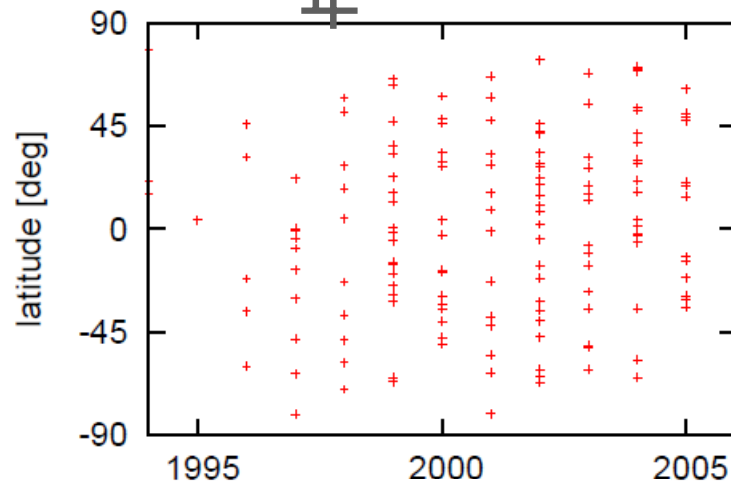
銀緯



発見された
年



発見された
年



発見された
年

発見された
年

まとめ

- Catalogue of Cometary Orbits 2005からのオールト雲彗星を取り出し
 - 外力によるオールト雲形成の計算:
 - 銀河潮汐力: 解析解
 - 恒星遭遇: 衝撃近似
 - 長周期彗星の軌道傾斜角分布の予想と観測の比較
 - **長周期彗星の傾斜角分布はオールト雲のそれを必ずしも反映しない**
 - 1回の恒星遭遇によるinjection -> 平らな傾斜角分布
 - 銀河潮汐力によるinjection -> 0-140deg
 - **~0 と ~140度付近の超過と、90 度付近の不足は理論予測と調和的**
- ⇒ **長周期彗星の軌道傾斜角分布は等方的ではない**

観測の銀経分布からは、まだ円盤に近いオールト雲が予測される