

太陽系惑星運動の安定性

伊藤孝士 (国立天文台ADC/CfCA)

■ 論文紹介

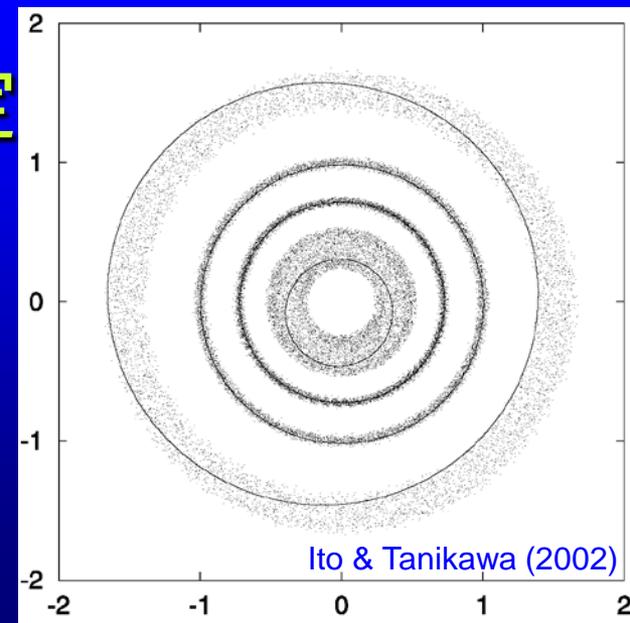
- Laskar & Gastineau (2009) *Nature* **459**, 817
- Batygin & Laughlin (2008) *Ap.J.* **683**, 1207
- Smith & Lissauer (2009) *Icarus* **201**, 381

■ 結論

- 太陽系惑星の運動は大概安定

■ 示唆

- 系外惑星なら色々有り得る
- 一般的理論の構築は困難
- 何らかの推定は非不可能



Laskar & Gastineau (2009)

平成21年6月16日 毎日新聞

衝突？：30億年後に地球、太陽系惑星と…英科学誌

ブックマーク



この記事印刷



地球が将来、火星や水星などの惑星と衝突する可能性があるとするフランスの研究チームの論文が、英科学誌ネイチャーに掲載された。地球と太陽系の他の惑星との衝突の可能性が初めて示されたとはいえ、約30億年後の話という。

太陽系は現在、惑星が楕円(だえん)軌道を描きながら太陽の周りを公転している。研究チームは、惑星の運動を50億年後までより詳細にシミュレーションしたところ、他の惑星の重力に影響されやすい水星の軌道が乱れ、その影響で他の惑星の軌道も相次いで乱れることで、約30億年後に地球が水星や金星、火星と衝突する可能性が見つかった。

小久保英一郎・国立天文台准教授(惑星系形成論)は「これまで太陽系の惑星は軌道が安定し、地球には衝突しないと考えられていたので、興味深い研究成果だ。非常にまれな現象なので、すぐに心配する必要はない」と話している。【河内敏康】

Laskar & Gastineau (2009)

■ 背景と目的

- 太陽系の惑星運動 → カオス性を持つ
- 初期値をたくさん使って長期数値計算

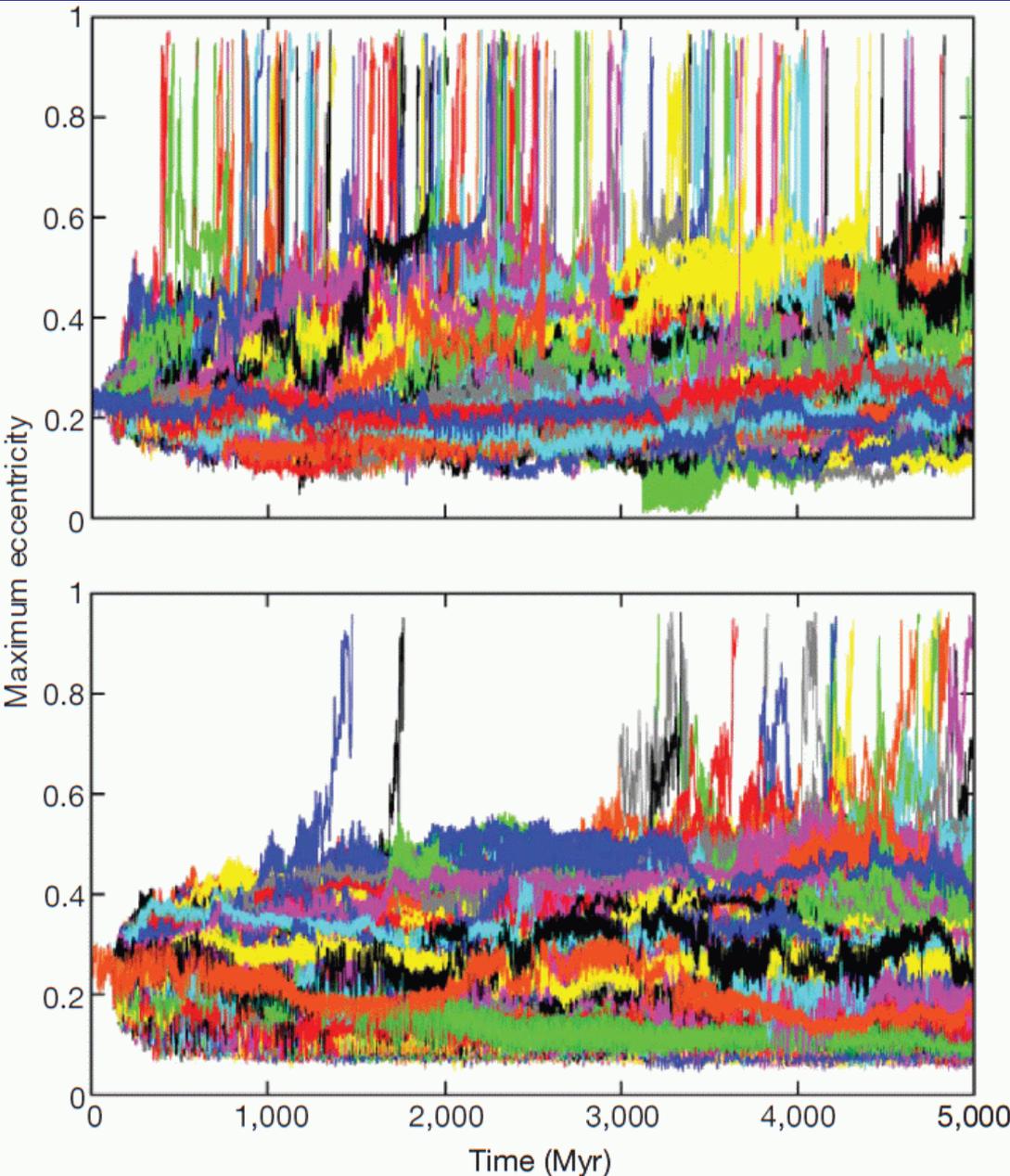
■ モデルと方法

- 太陽系惑星(8+1) + 太陽
- 質点系力学 + 月の効果 + 一般相対論
- 初期値 2500 種類、極近接軌道 $\Delta a < O(1\text{m})$

■ 結果

- 水星はそこそこの確率で $e > 1$ になり得る
- 火星と地球、金星と地球が衝突する例もあり

Laskar & Gastineau (2009)



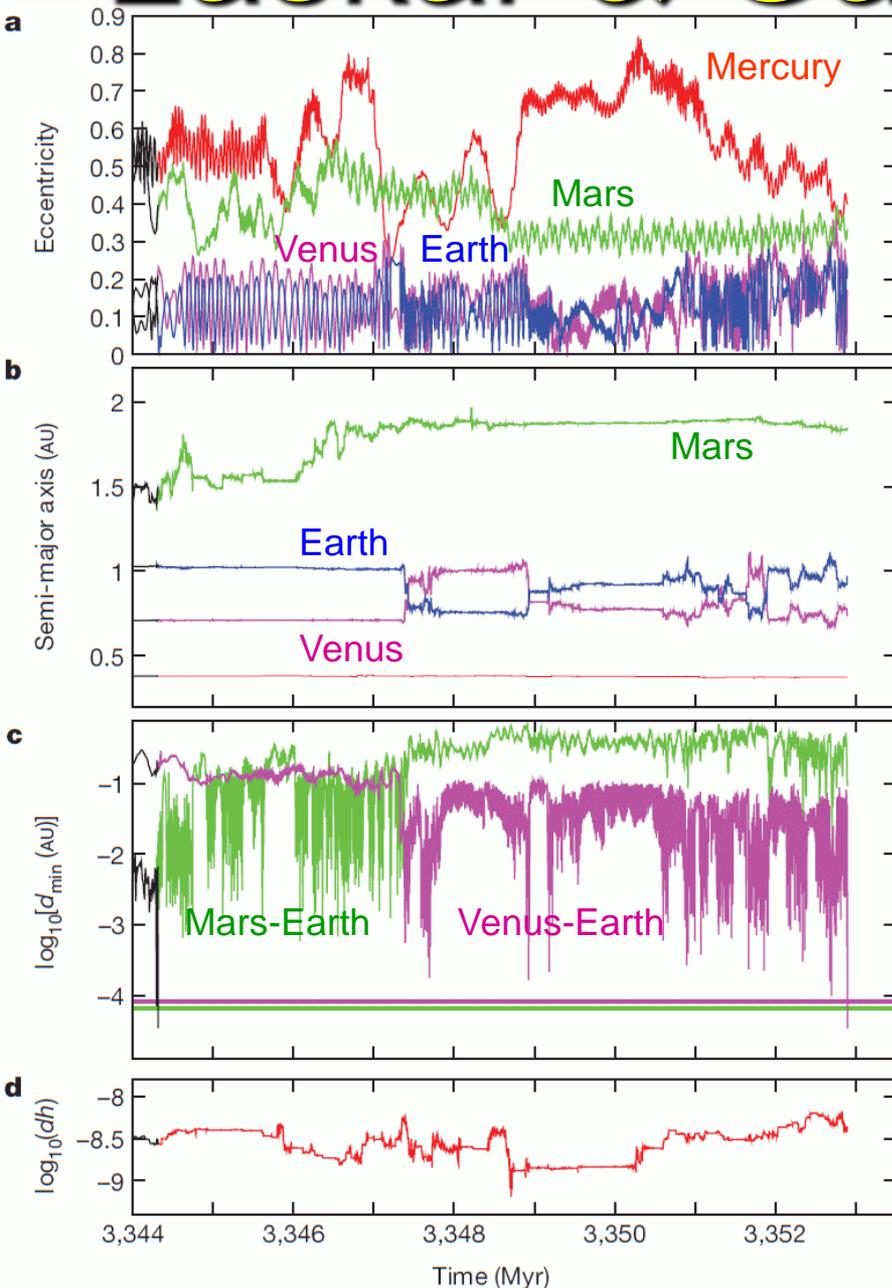
水星の離心率進化

- 一般相対論なし
- 201例の計算
- $\Delta a < 3.8$ m
- 60%で $e > 0.9$

水星の離心率進化

- 一般相対論あり
- 2501例の計算
- $\Delta a < 3.8$ m
- 0.8%で $e > 0.9$

Laskar & Gastineau (2009)



火星と地球の近接遭遇

- 1例 / 2501例
- 最接近距離 = 794 km
- $t = 3.34$ Gyr

3.34Gyr以降を196例計算

- 地球と水星または火星の衝突が幾つも発生
- 地球と金星が衝突する例もあり(1/196例)

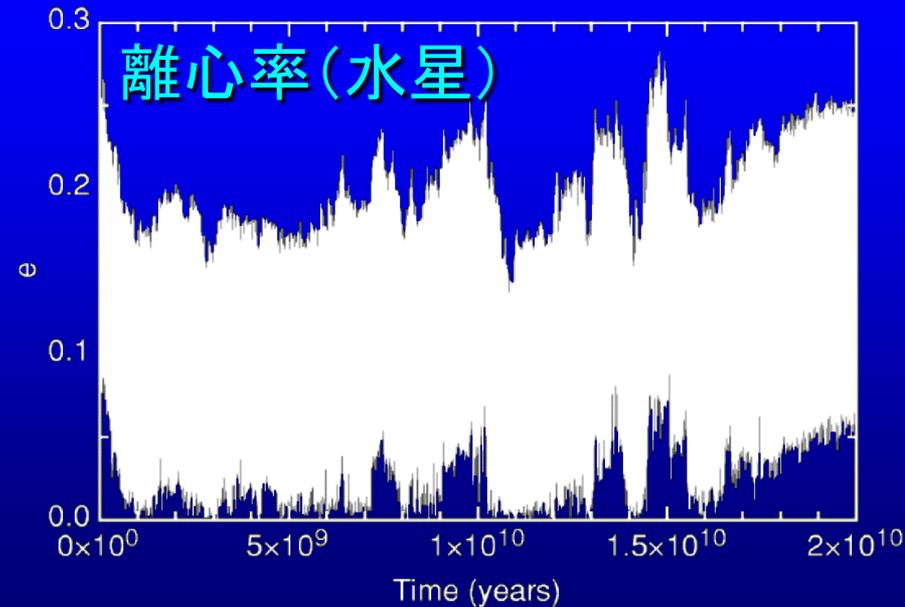
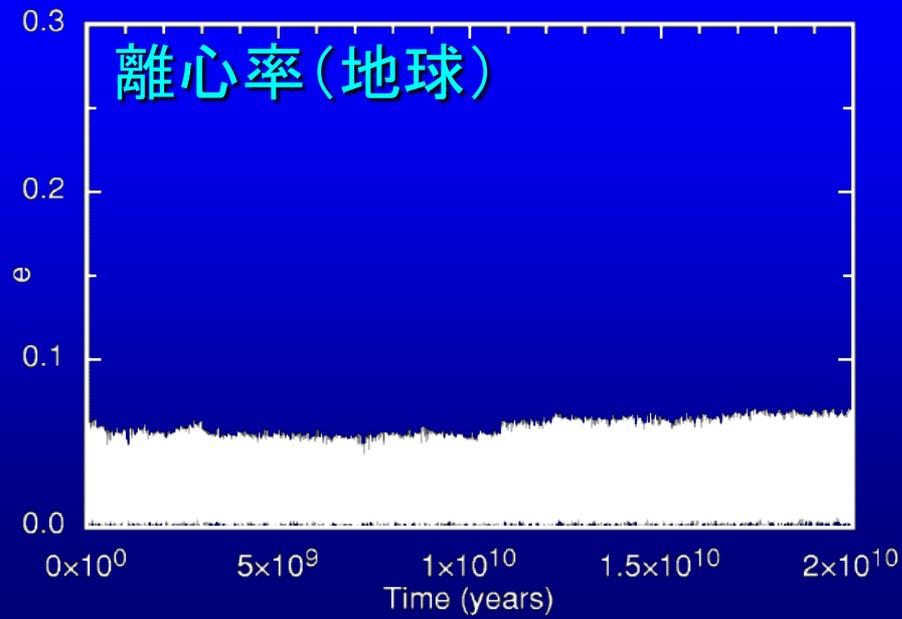
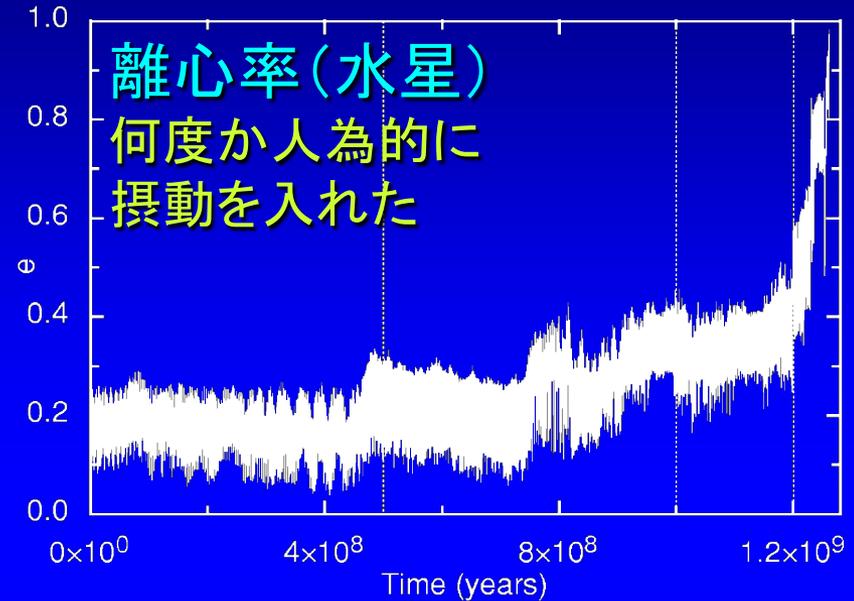
現実との対応

- 「こういう系ではこうなる」
- 実際には様々な過程有り
- しかしまあ、こんなものでは

Batygin & Laughlin (2008)

相対論なしの超長期計算

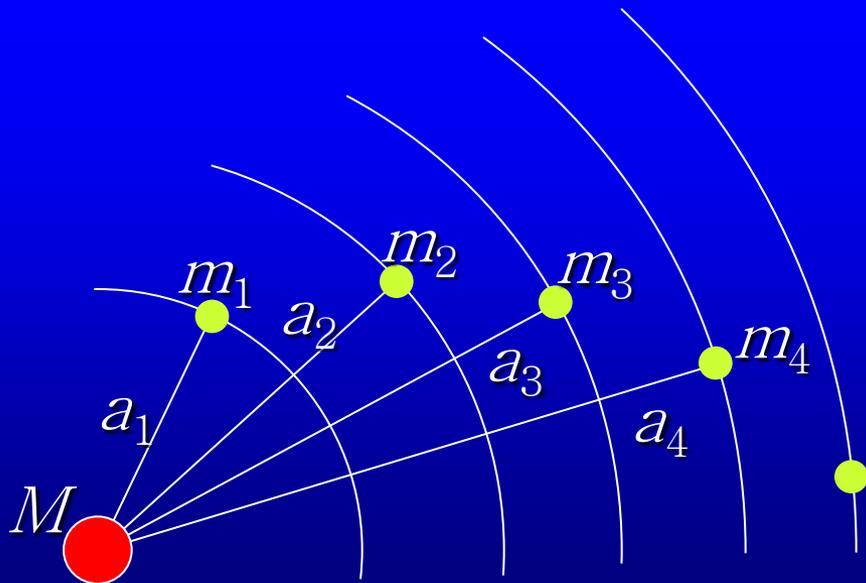
- 1例のみ、200億年
- 軌道の大変化は特に無し
- 人為的に摂動を入れると水星の軌道が大きく変わることはある



一般論はあるか

「この惑星系の軌道運動はいつ不安定化するか？」

- 一般論があるのかもしれないが、簡単ではない
- Newton, Laplace, Lagrange あたりが最初
- 太陽系的な系だと以下のような実験が盛ん
 - ほぼ等質量の天体を相互Hill距離に等間隔に並べる
 - 初期の軌道交差や接近遭遇が生じるまでの時間計測



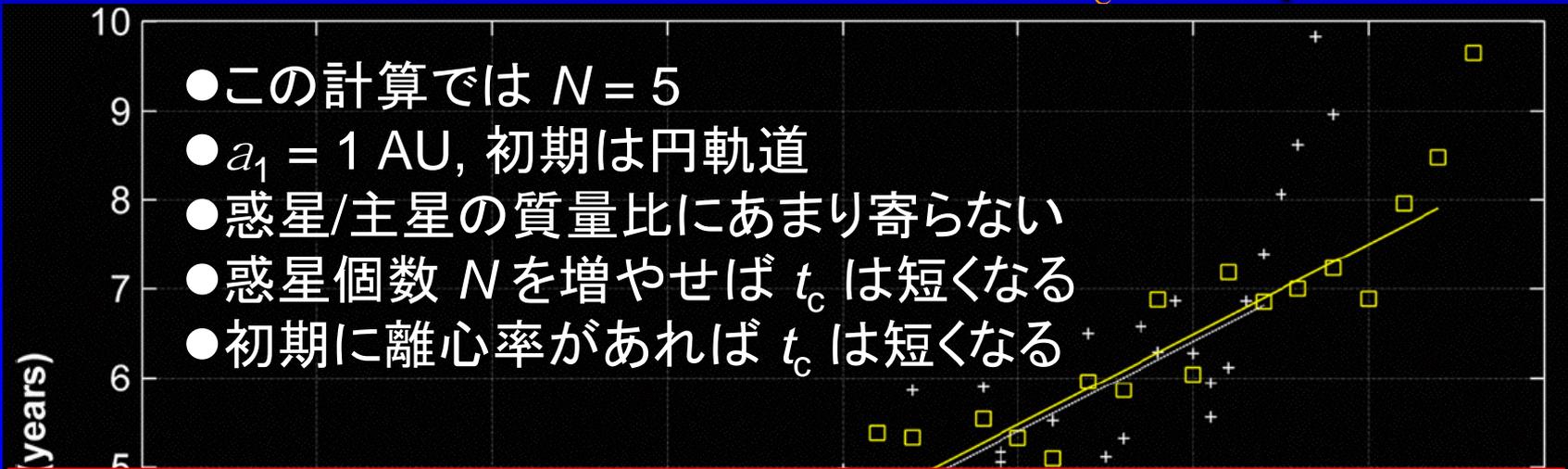
$$\bullet a_{i+1} = a_i + \Delta * R_H^{i,i+1}$$
$$R_H^{i,j} = \left(\frac{m_i + m_j}{M} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{a_i + a_j}{2} \right)$$

- Δ を系のパラメータとする
- 初期不安定発生時刻と Δ の関係をプロット

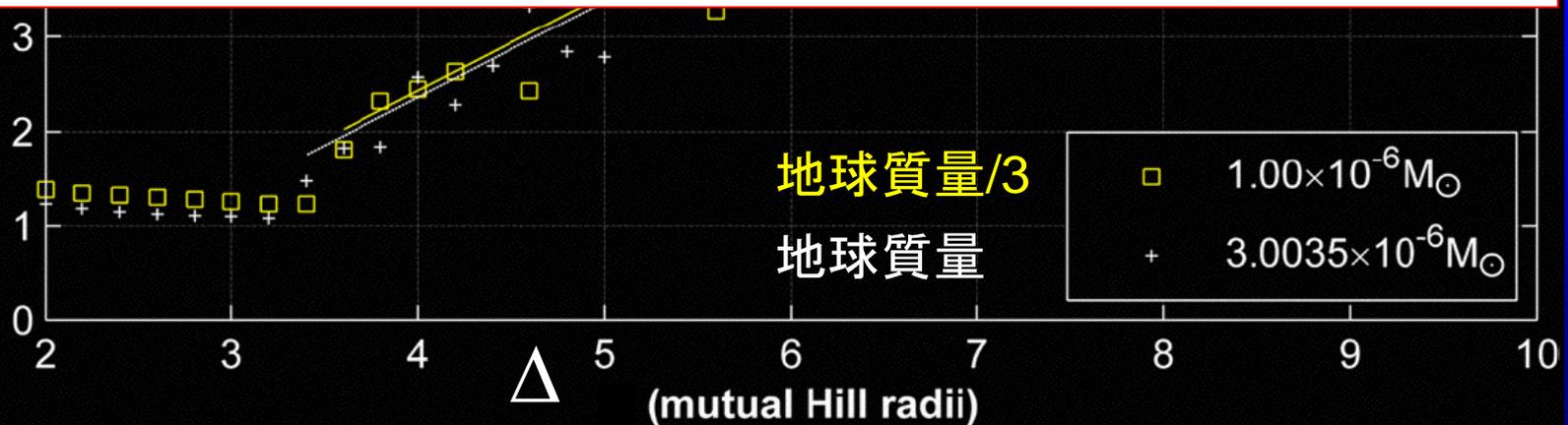
この手の研究の最新版

Smith & Lissauer (2009), 10^{10} 年くらい計算した

誰が計算してもほとんどこうなる: $t_c \propto \exp \Delta$



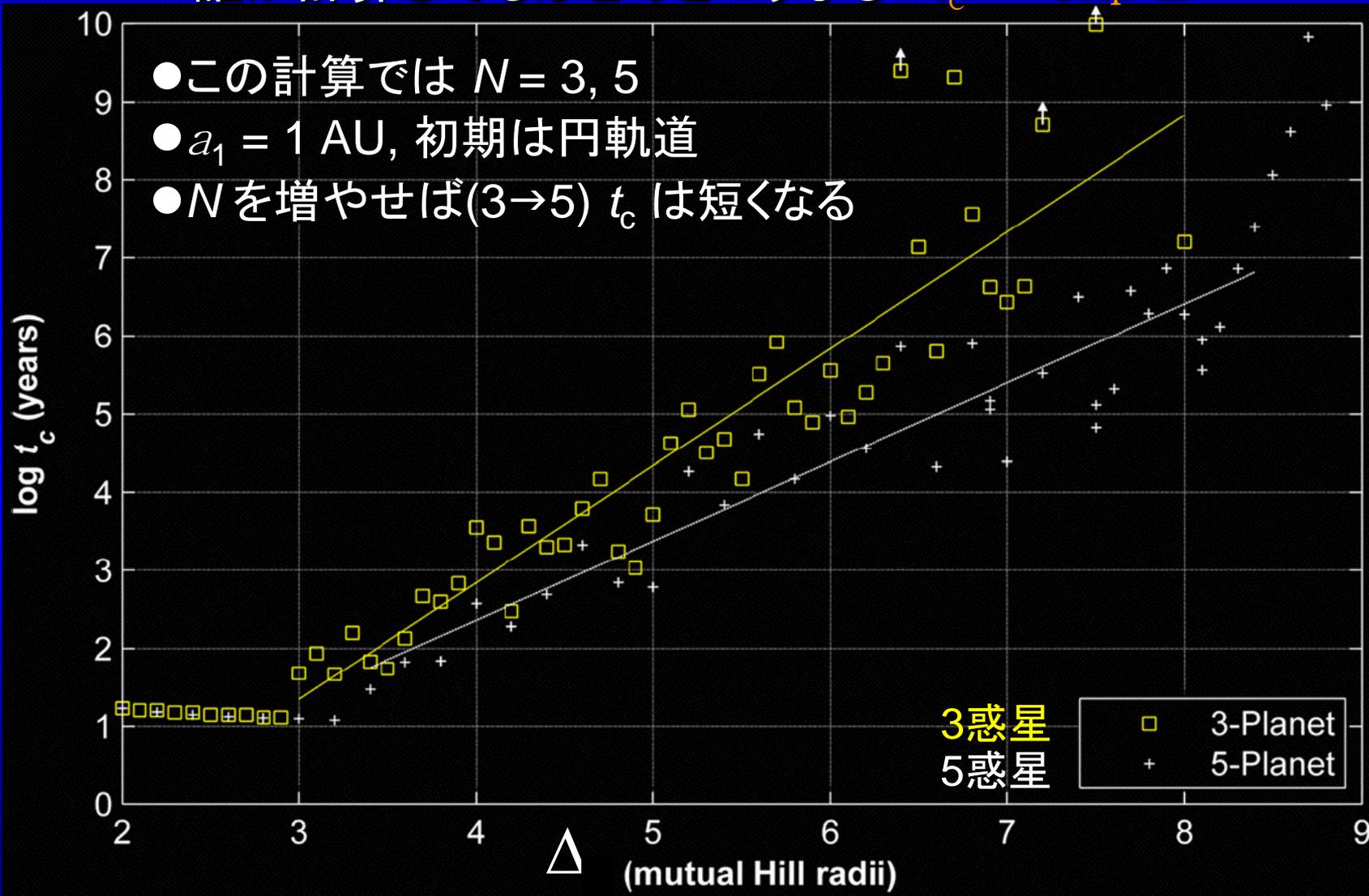
$t_c \propto \exp \Delta$ となる理由 □ 未解明



この手の研究の最新版

Smith & Lissauer (2009), 10^{10} 年くらい計算した

誰が計算してもほとんどこうなる: $t_c \propto \exp \Delta$



太陽系の場合

- 地球型惑星： Δ がとても大きい → 長期安定
- 木星－土星： $\Delta=8$ と小さいが、ほぼ二惑星系 → 長期安定
- 天王星以遠： Δ はそこそこ大きく、公転周期も長い → 長期安定

現在の惑星間隔と相互Hill半径(R_H)での規格化

		($\Delta * R_H$)
水星	0.336AU =	63.4 R_H
金星	0.277AU =	26.3 R_H
地球	0.534AU =	40.0 R_H
火星	3.681AU =	16.0 R_H
木星	4.378AU =	8.0 R_H
土星	9.647AU =	14.0 R_H
天王星	10.87AU =	13.9 R_H
海王星	9.161AU =	10.2 R_H

$$R_H^{ij} = \left(\frac{m_i + m_j}{M} \right)^{1/3} \left(\frac{a_i + a_j}{2} \right)$$

M : 中心星質量

m_i : 惑星の質量

a_i : 軌道半長径

まとめ

■ 最近の研究

- 太陽系惑星運動の超長期計算が未だに進行中
- 不安定が発生する確率は非0だが、とても低い

■ 示唆

- 太陽系外惑星ならもっと確率高いだろう
- 不安定は突然起こるので個別の系の具体的な不安定時刻予測は困難
- 推定するならCWB的な相互Hill距離の計算？

