

**A plausible cause of
the late heavy bombardment**

A. Morbidelli et al., *Meteorit. Planet. Sci.*,
36, 371-380, 2001

&

**Origin of the cataclysmic
Late Heavy Bombardment period of the
terrestrial planets**

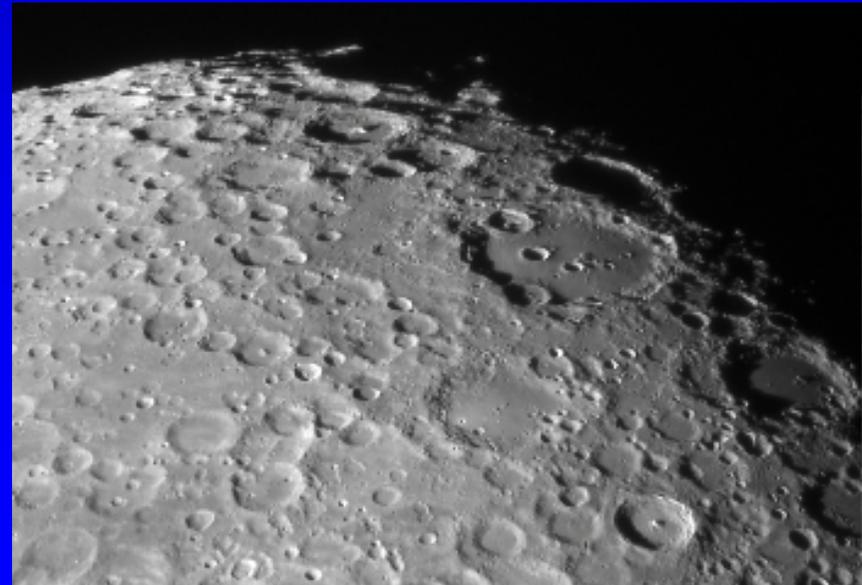
R. Gomes et al., *Nature*,
435, 466-469, 2005

東大 M2 岡村 奈津子

背景

約35億年より古い時代に小天体の衝突頻度が非常に大きかったと示す記録が月面上に存在する。

この期間は**Late Heavy Bombardment**
(以下、**LHB**)という。



背景

アポロ探査機などが月から回収してきた試料によると
激しい衝突は40~38億年前に集中している。

本発表の目的:

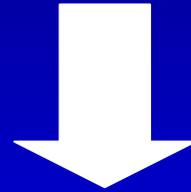
数値計算を用いて
この時代の小天体衝突がどのように起こったのか、
どの程度激しかったのかを知ることを目的とする。

先行研究

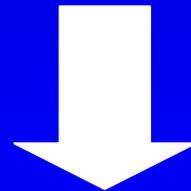
- LHBが単なる地球型惑星の集積過程の最終段階である可能性を調べた。(Wetherill, 1975)
 - 共鳴効果を入れていないので、定量的に正確でない。
- LHBと地球上の水の起源について、彗星が主な衝突体である必要性が指摘された (Chyba, 1990)
 - このモデルでは、木星－土星間のcometesimalsは地球と月が形成される前に散逸されてしまう。

本発表の流れ

つまり、惑星表面の激しいクレーター形成のシナリオを完璧に示したものはない。



地球型惑星形成の現代のモデルの枠組みの中で、惑星集積のleftoverに着目し、LHBとの関係を調べる。



巨大惑星が急に移動したモデル

**A plausible cause of
the late heavy bombardment**

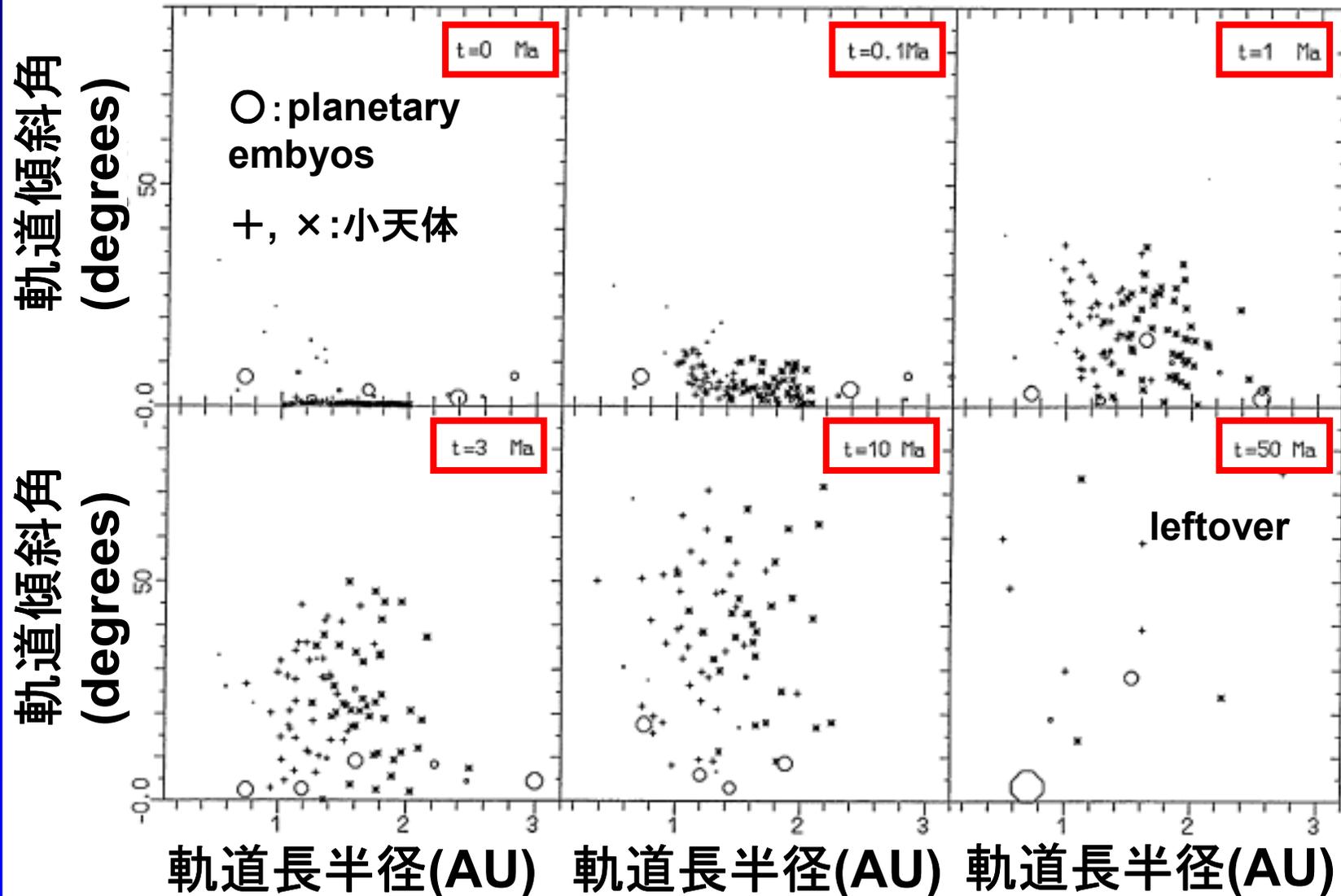
A. Morbidelli et al.,

Meteorit. Planet. Sci., 36, 371-380, 2001

数値シミュレーション(MODEL1)

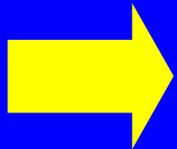
- N体コード
- 初期条件: 1~2AUに存在する100個のテスト粒子
- 惑星集積の主な段階に残っている微惑星の軌道分布を理解するために粒子の進化を調べる

小天体とplanetary embryosの軌道分布 (FIG. 1)



MODEL 2

- コードはMODEL1と同じ
- 1.5~2 AU
 - 1.5 AUの外側だけにplanetary embryosが存在すると推定
- Planetary embryosの初期の質量分布の結果の変化を調べるために、粒子の進化を調べる。
- このモデルは地球型惑星の領域で地球質量の惑星を生成することはできなかったが、planetary embryosの個数と質量の下限値を求められる。

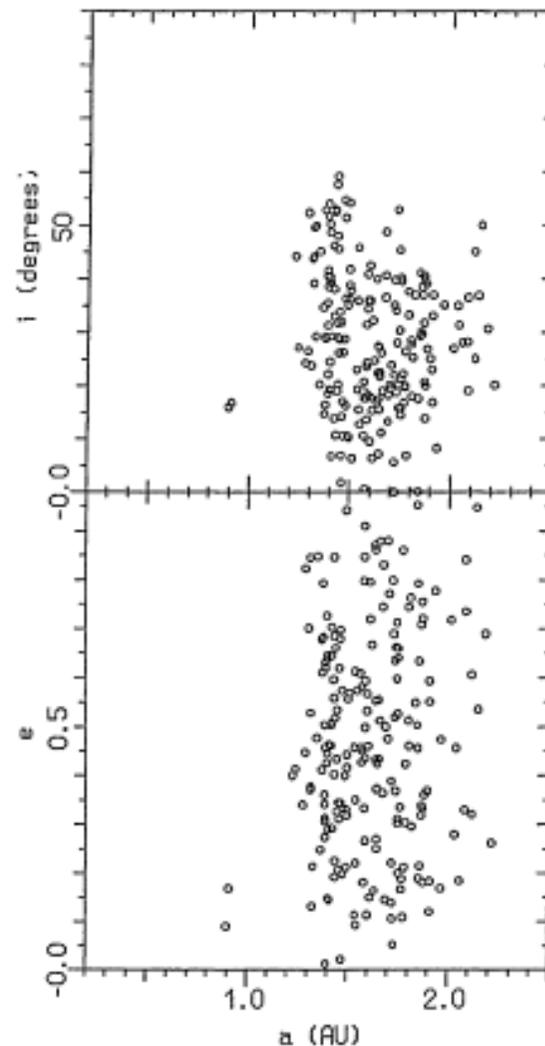
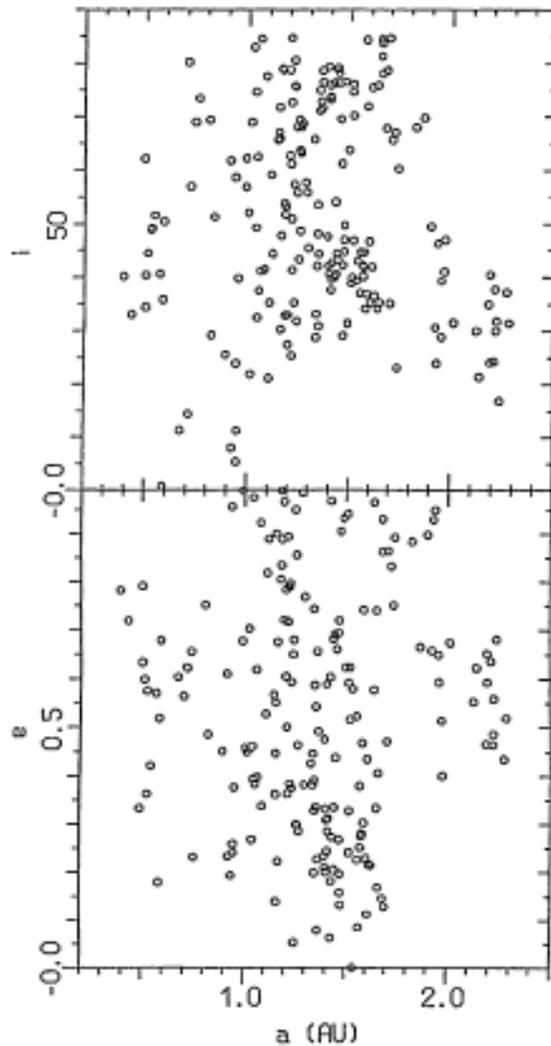


このMODELは、MODEL1と定性的にほぼ同じ結果が得られる。

テスト粒子の初期条件 (FIG. 2)

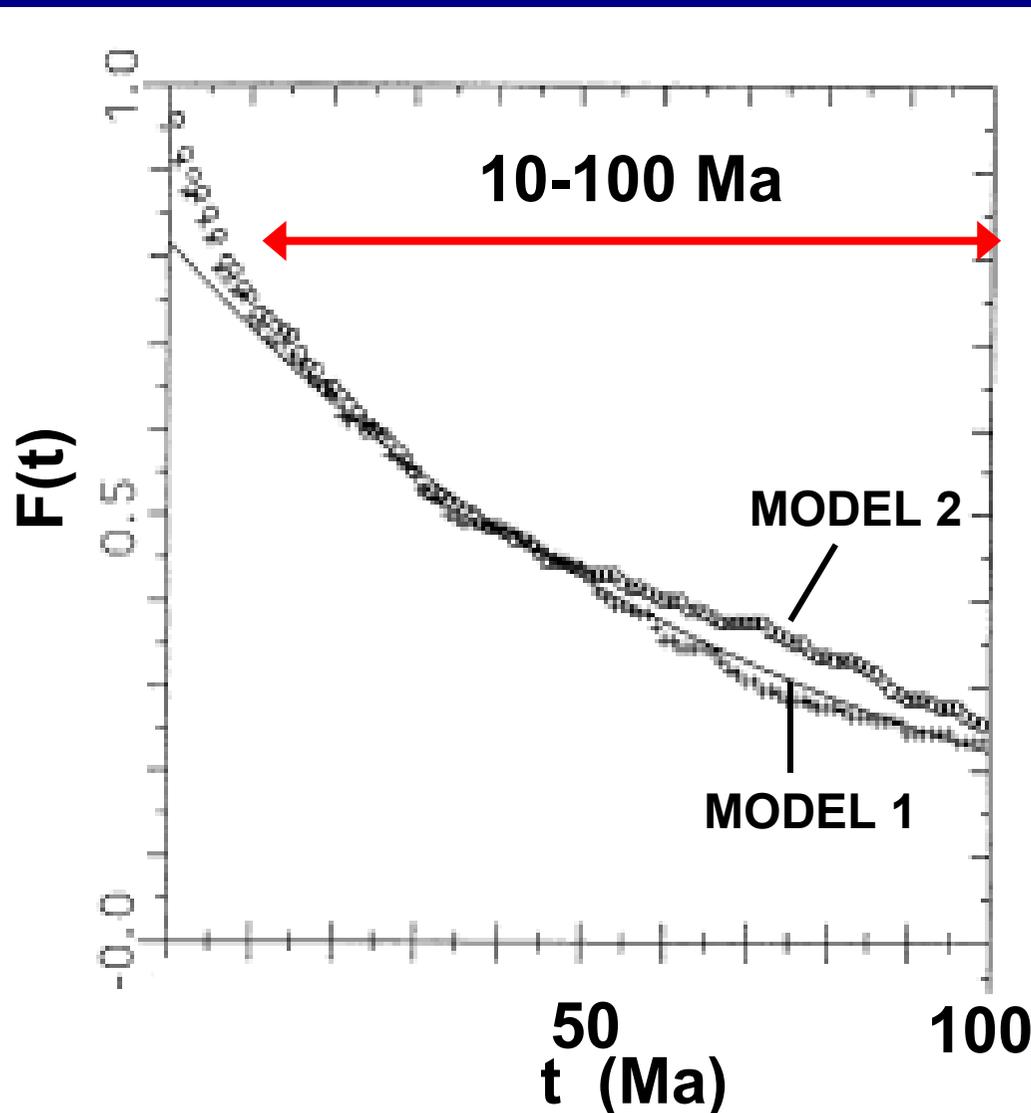
MODEL 1

MODEL 2



- 7.5日のtimestep
- 100Ma

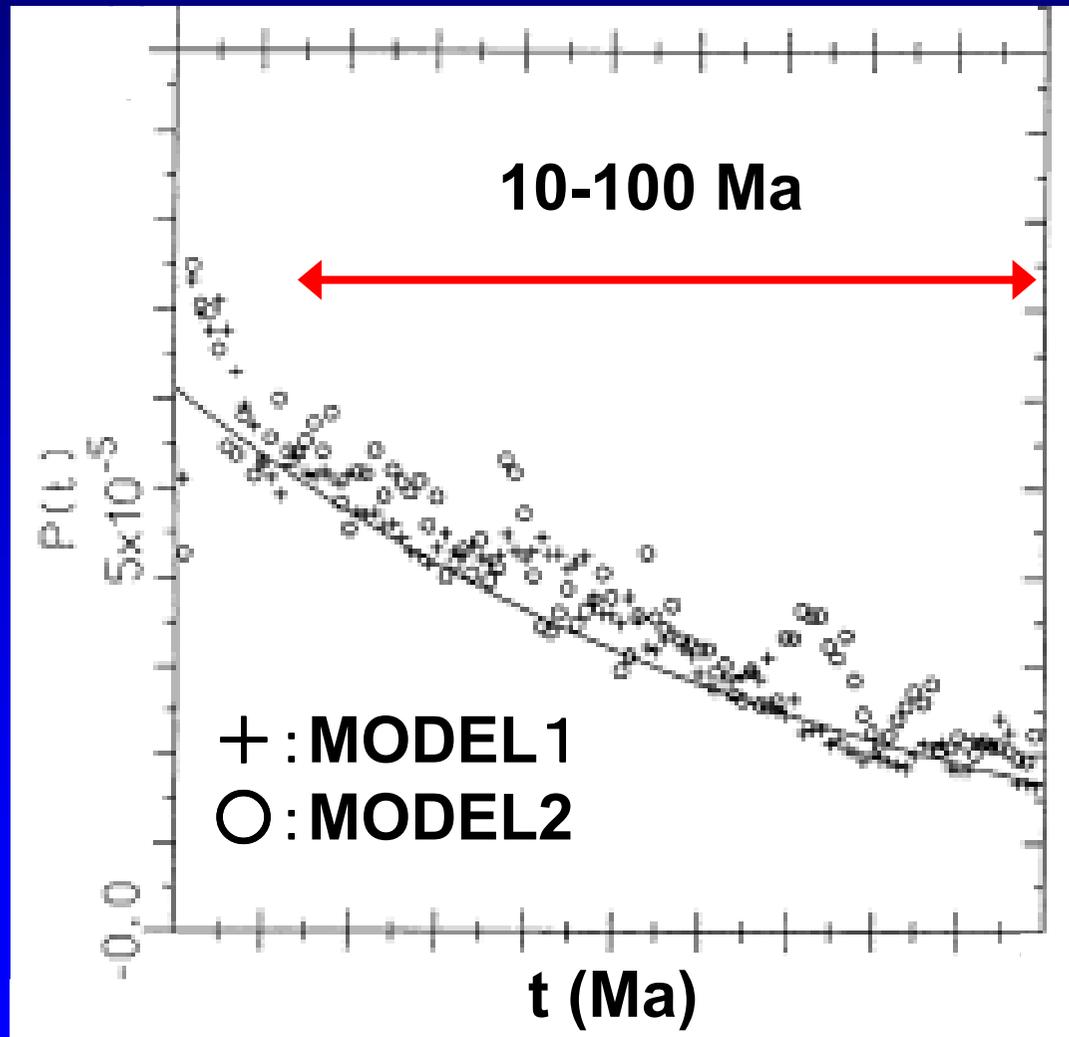
leftover粒子の割合



10-100Maでは、
 $N \propto \exp(-t/77)$

とよくフィットする。

月への衝突確率



$$P \propto \exp(-t/77)$$

$P(t)$: 1 粒子の100万年間で
衝突する確率

高い傾斜角をもつleftoverの
衝突割合

月のクレーター記録との比較

➤ 月のクレーターデータ

- 重撃中の衝突体のフラックスは以下に比例して減少 (Neukum and Ivanov, 1994)

$$\exp(-t / 144)$$

- 4.4~3.9Ga間の衝突体フラックスは以下に平均して比例して減少 (Hartman et al., 2000)

$$\exp(-t / 56)$$

➤ 本論文のデータ

$$\exp(-t / 77)$$

クレーターの記録より、
遅い

月のクレーターとの比較

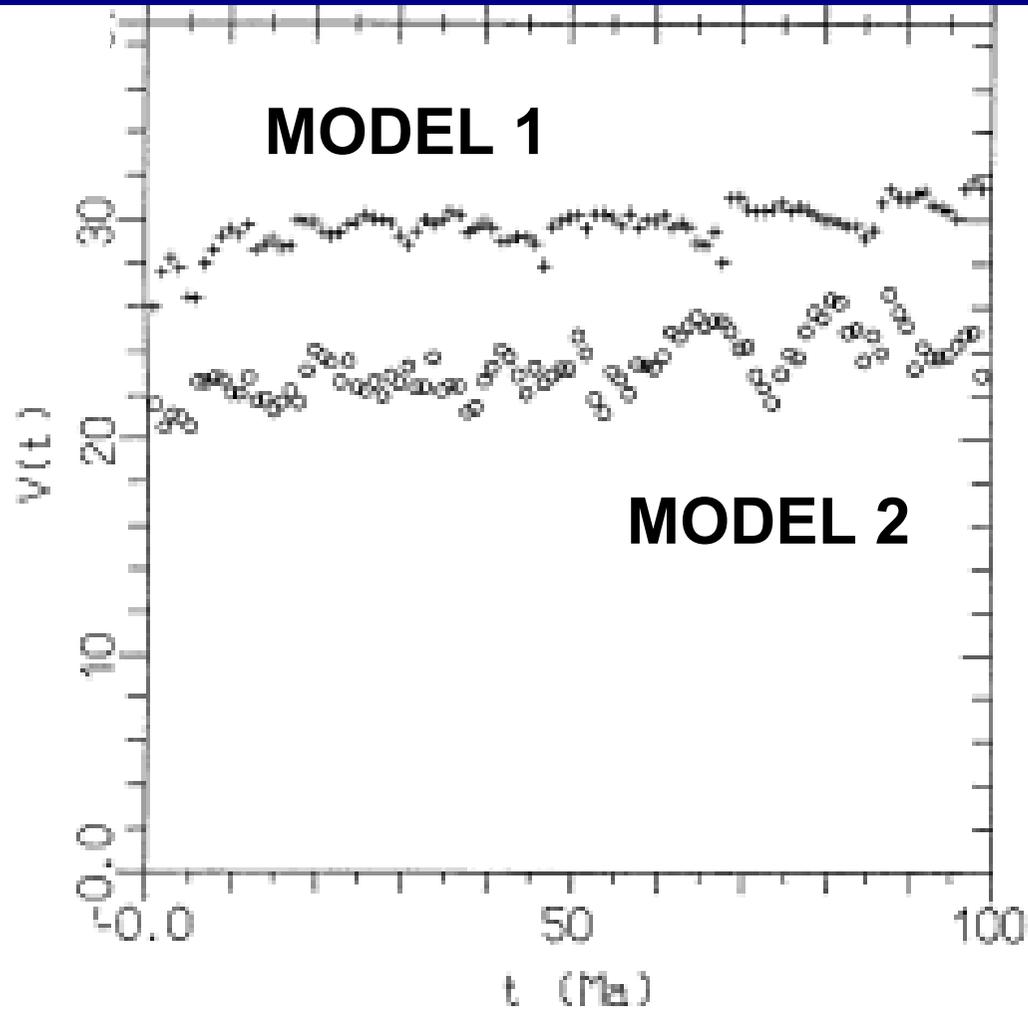
全体の時間スケールを合わせるために、高い傾斜角を持つ集団の様々な大きさの天体数を見積もる。

- 4.4~3.9Gaでは、直径10km以上のクレーター数は 10^{-3} (per square kilometer)
- Pi-scaling則
- 天体の密度 (3.3 g/cm³)

高い傾斜角をもつleftoverは少なくとも400m以上の大きさで 10^7 個程度あればよい。

メインベルトにある400m以上の大きさを持つ小惑星の総数は、 4×10^6 であり、調和的。

月への平均衝突速度



➤ MODEL 1の天体は約30km/sで衝突

➤ MODEL 2の天体は22-25km/sで衝突

➤ MODEL 2は平均傾斜角がMODEL 1より小さい

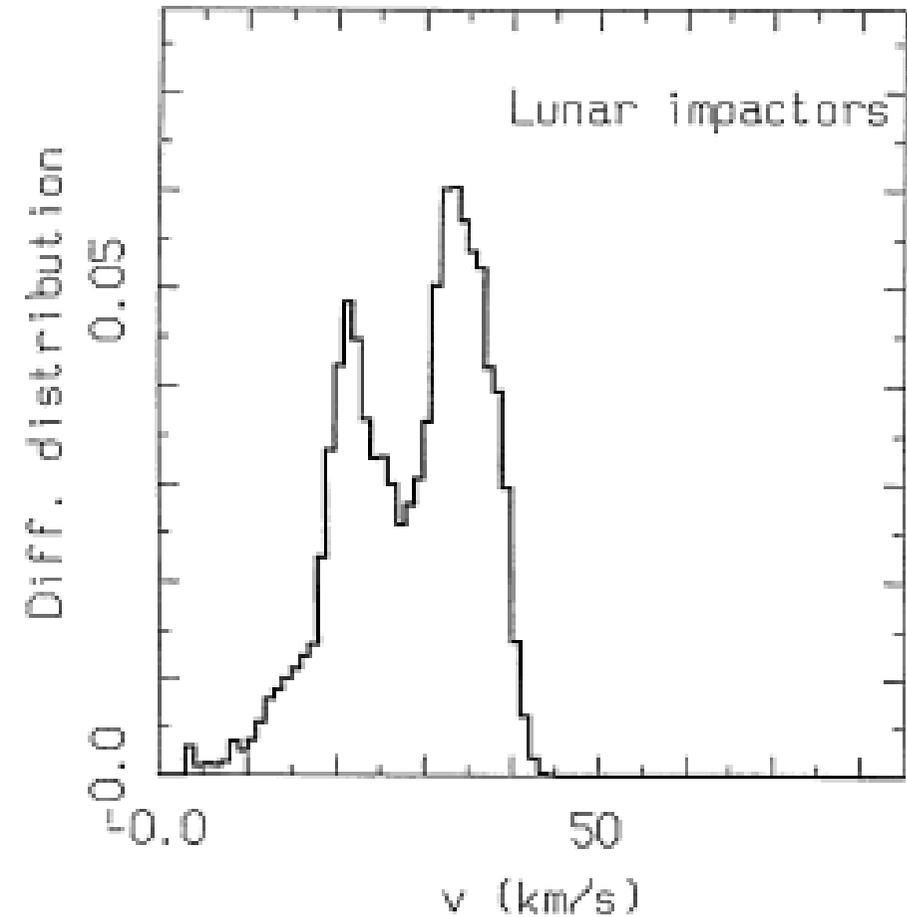
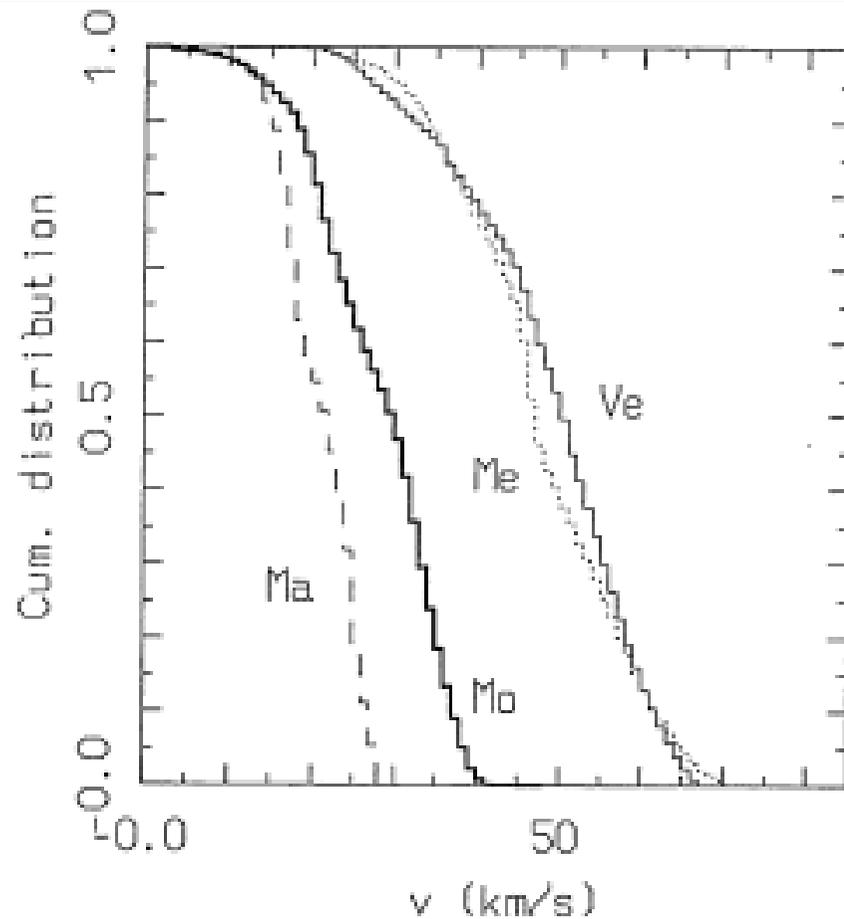
➤ 小惑星の速度: 10~15 km/s

(Gladman et al., 2000)

➤ 彗星の速度: 20 km/s

(Shoemaker et al., 1994)

衝突速度の累積分布



MODEL 1を用いて導出

Crater dataと本論文の衝突速度比の比較

➤ Crater data (Strom and Neukum (1988))

Mercury/Moon: 1.37-2.18

Mars/Moon: 0.48-0.68

➤ 本論文

Mercury/Moon: 1.66

Mars/Moon: 0.8

MODELの有効性を示している。

まとめ

- 高い傾斜角のleftover集団の時間減衰は、月の地形の年代クレーター密度の指数関数的減少と矛盾しない。
- LHBを引き起こすような高い傾斜角のleftover集団の中での初期天体数は妥当である。
- 水星/月と火星/月の高い傾斜角を持つleftover集団の衝突速度比は、Strom and Neukum (1988)と近い値である。

未解決問題

太陽系の歴史で微惑星が
激しくなった時期がこれほど遅いこと
を説明できない。

**Origin of the cataclysmic
Late Heavy Bombardment period
of the terrestrial planets**

R. Gomes et al.,

Nature, 435, 466-469, 2005

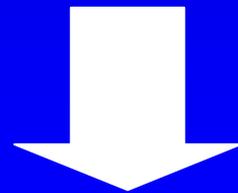
先行研究の問題点とその解決法

➤ 先行研究の未解決問題

太陽系の歴史で微惑星が激しくなった時期がこれほど遅いことを説明できない。

➤ 先行研究の問題点

➤ シミュレーションの初期条件は軌道が不安定になるように、惑星同士を近くに配置させ、惑星移動が急に始まるようにした。

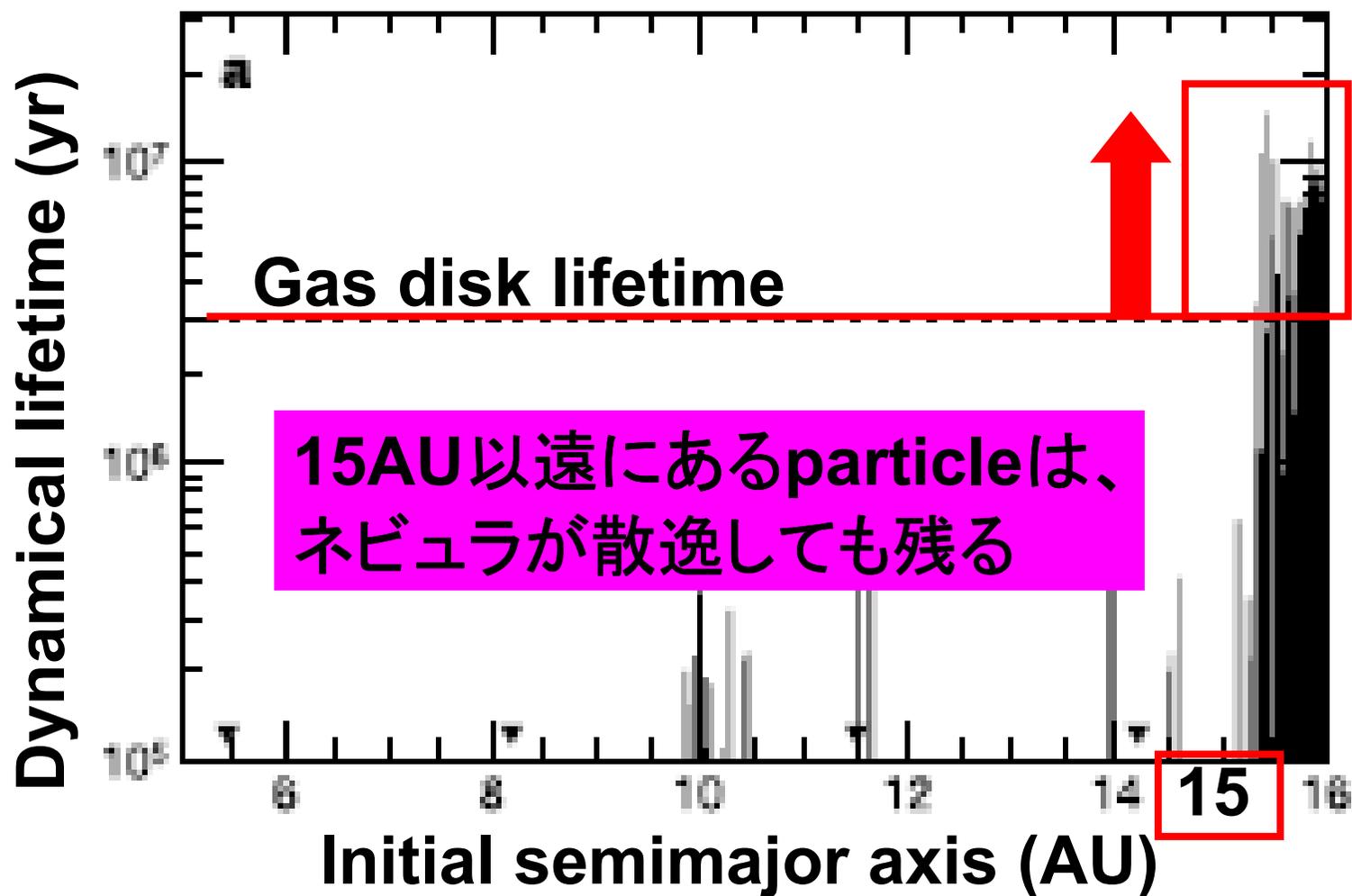


初期条件をネビュラガスが散逸されたときにする。

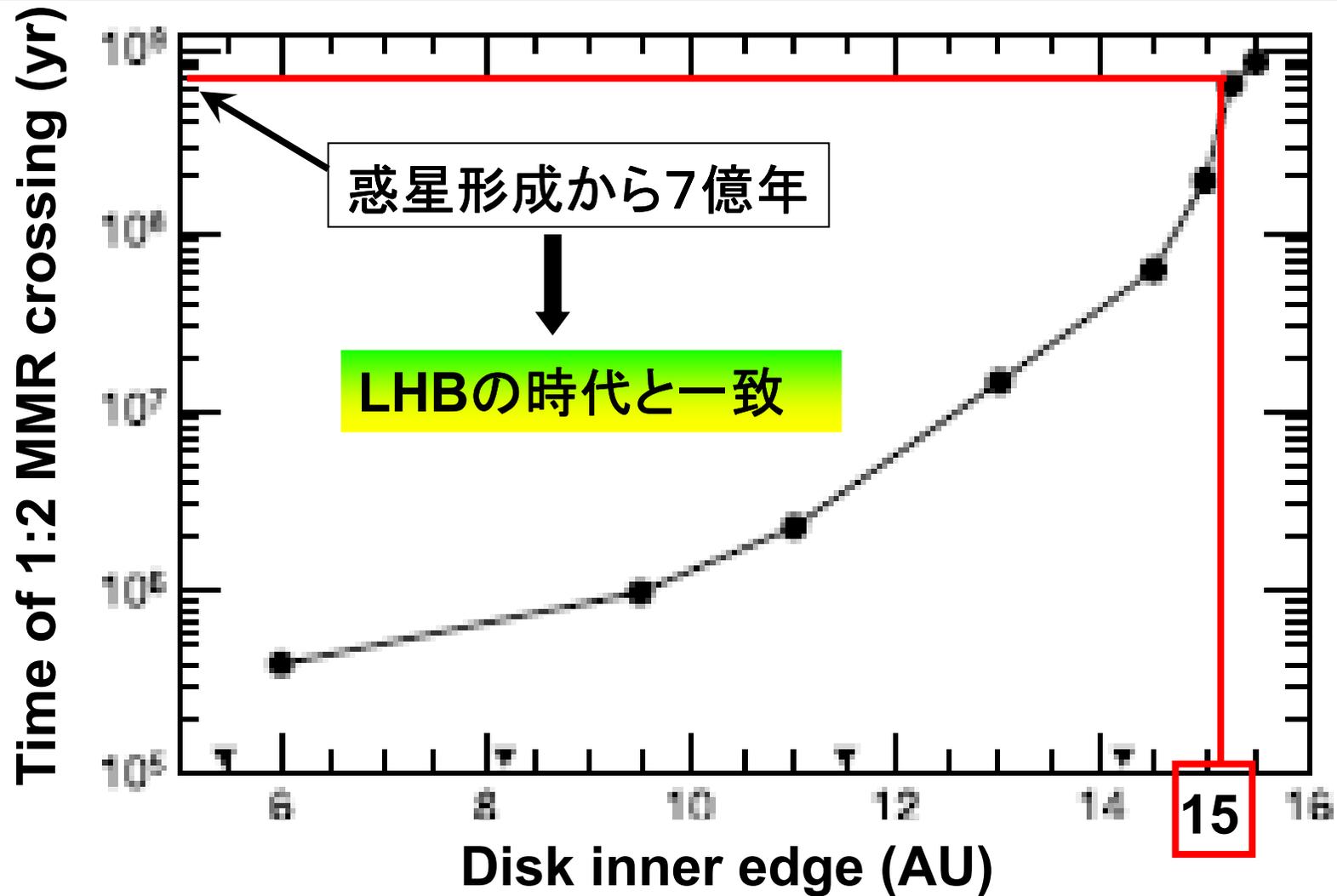
数値シミュレーション

- N体コード
- 異なる43の系の力学進化を調べた
- Timestep: : 0.25-0.5 years
- 初期位置
 - 木星・・・5.45AU
 - 土星・・・8.18AU
 - 氷衛星・・・11.5AU、14.2AU

円盤位置とLHBのタイミング



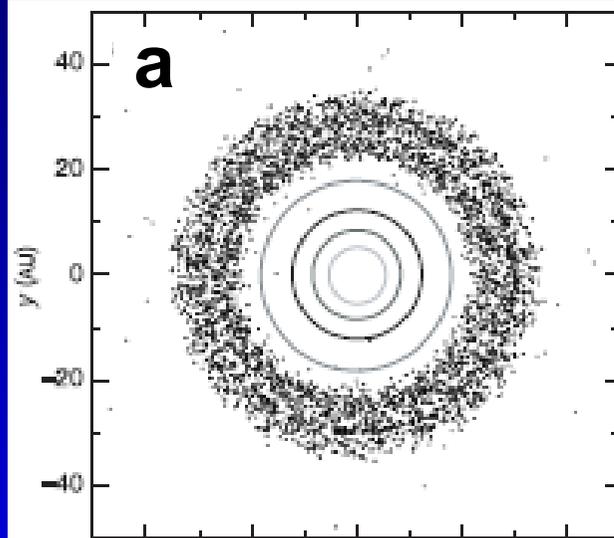
円盤位置とLHBのタイミング



惑星軌道と円盤粒子の位置

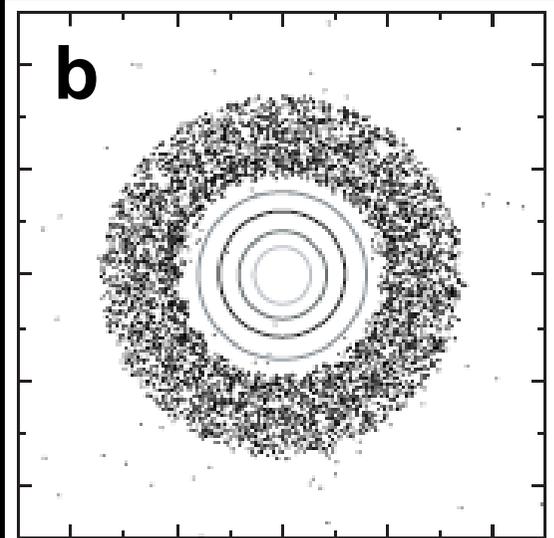
100 Myr

惑星移動の
始まり



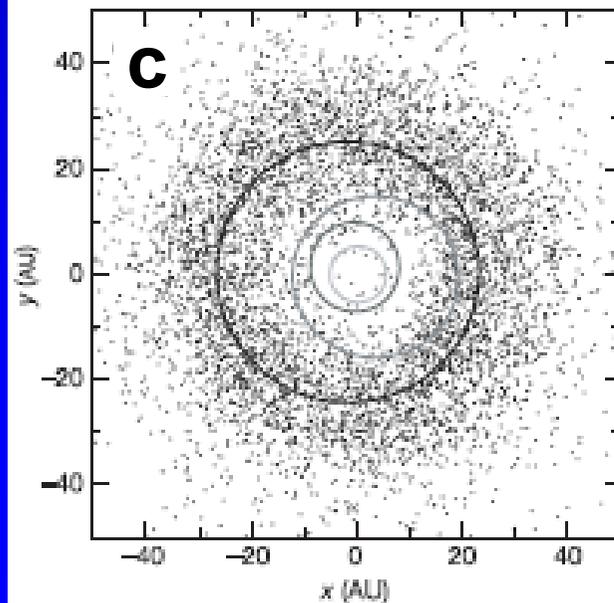
879 Myr

LHB直前



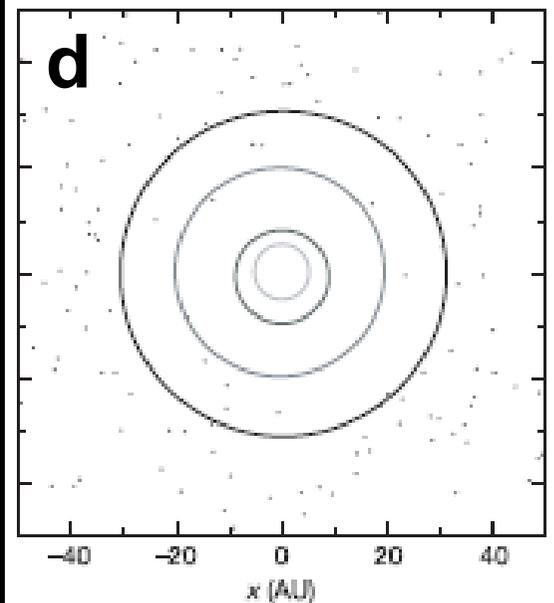
882 Myr

LHBが
始まった
直後

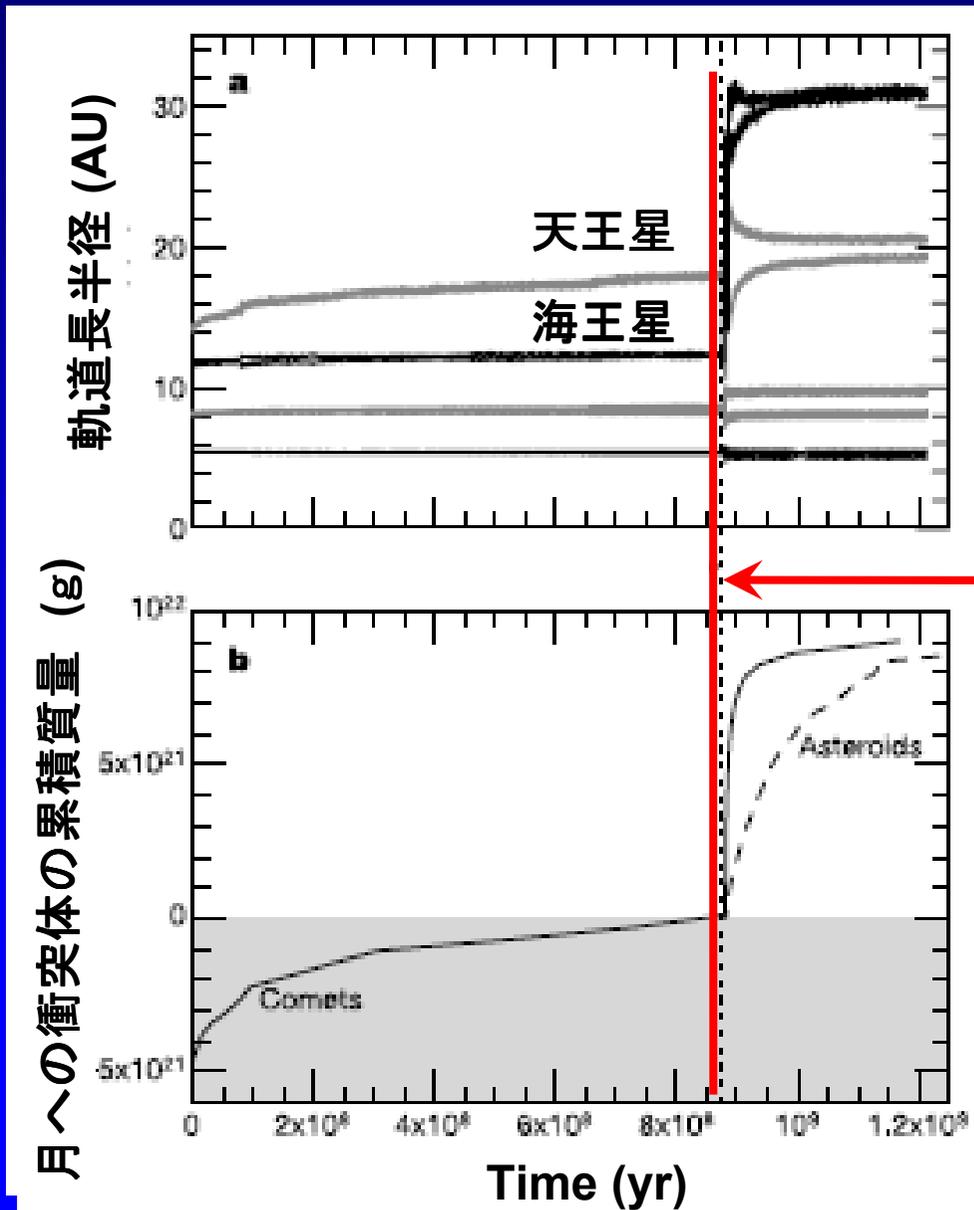


~1100Myr

惑星は
最終軌道へ



惑星移動と質量フラックス



海王星

天王星

Time of 1:2
MMR crossing

LHBの衝突体は彗星と
小惑星の混合体である

まとめ

- 惑星形成から7億年経過した後、LHBは始まった。
- 15AU以遠の小天体がLHBに寄与している。
- 衝突体は彗星と小惑星が混じっている。

本モデルを用いることで、太陽系の進化の中で微惑星の衝突が激しくなった時期が遅いことを説明できた。

ご清聴有難うございました。