

太陽系の惑星形成 と未解決問題

玄田 英典

東京工業大学・地惑

COE特任助教

謝辞

いくつかのムービー

(陶山さん・武田さん・小久保さん)

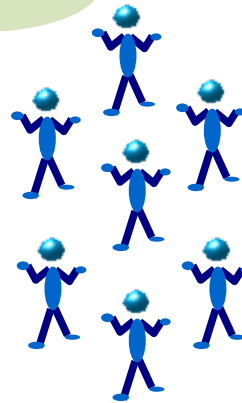
木星形成(生駒さん・堀さん)

綺麗な絵(Newton Press)

一番の問題？

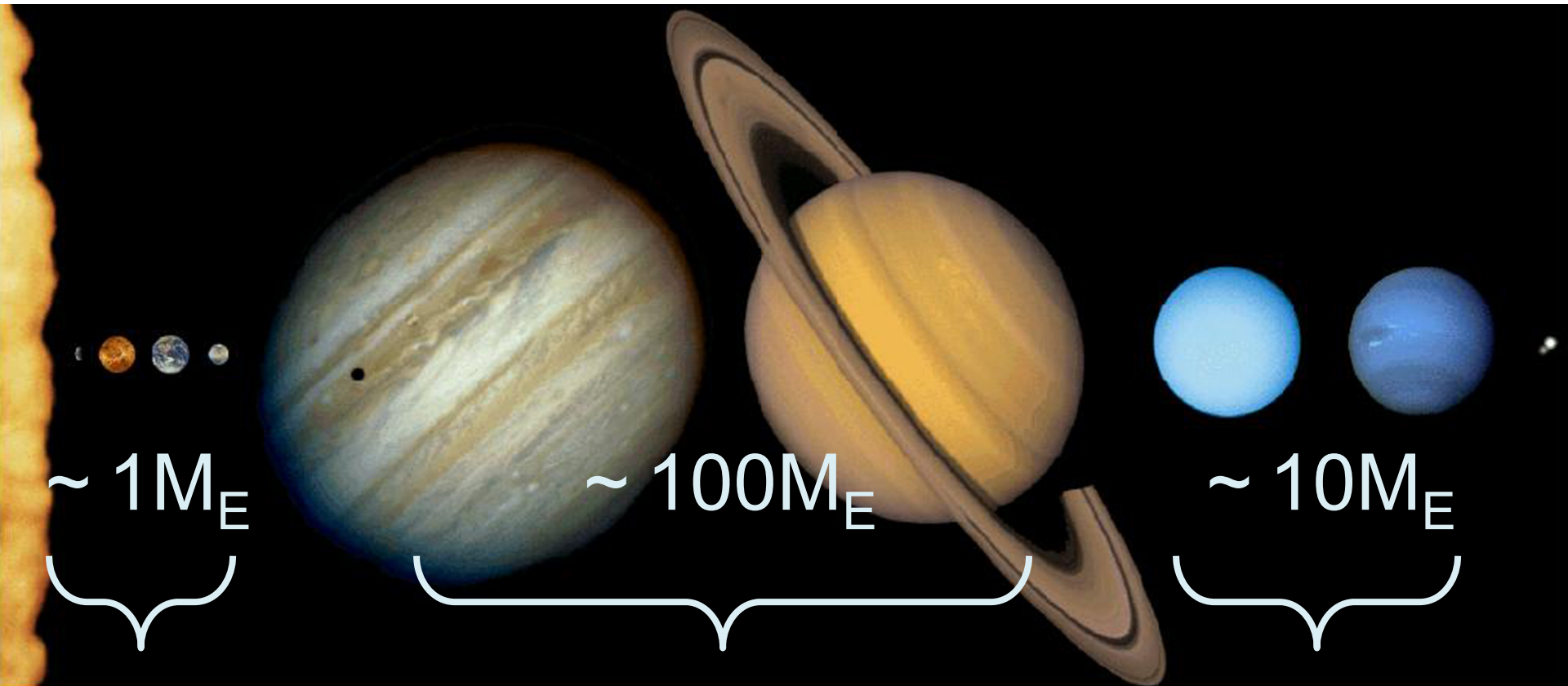
系外惑星も沢山発見されたし、
惑星は意外と簡単にできるんじゃない？

系外惑星



太陽系

太陽系の惑星たち

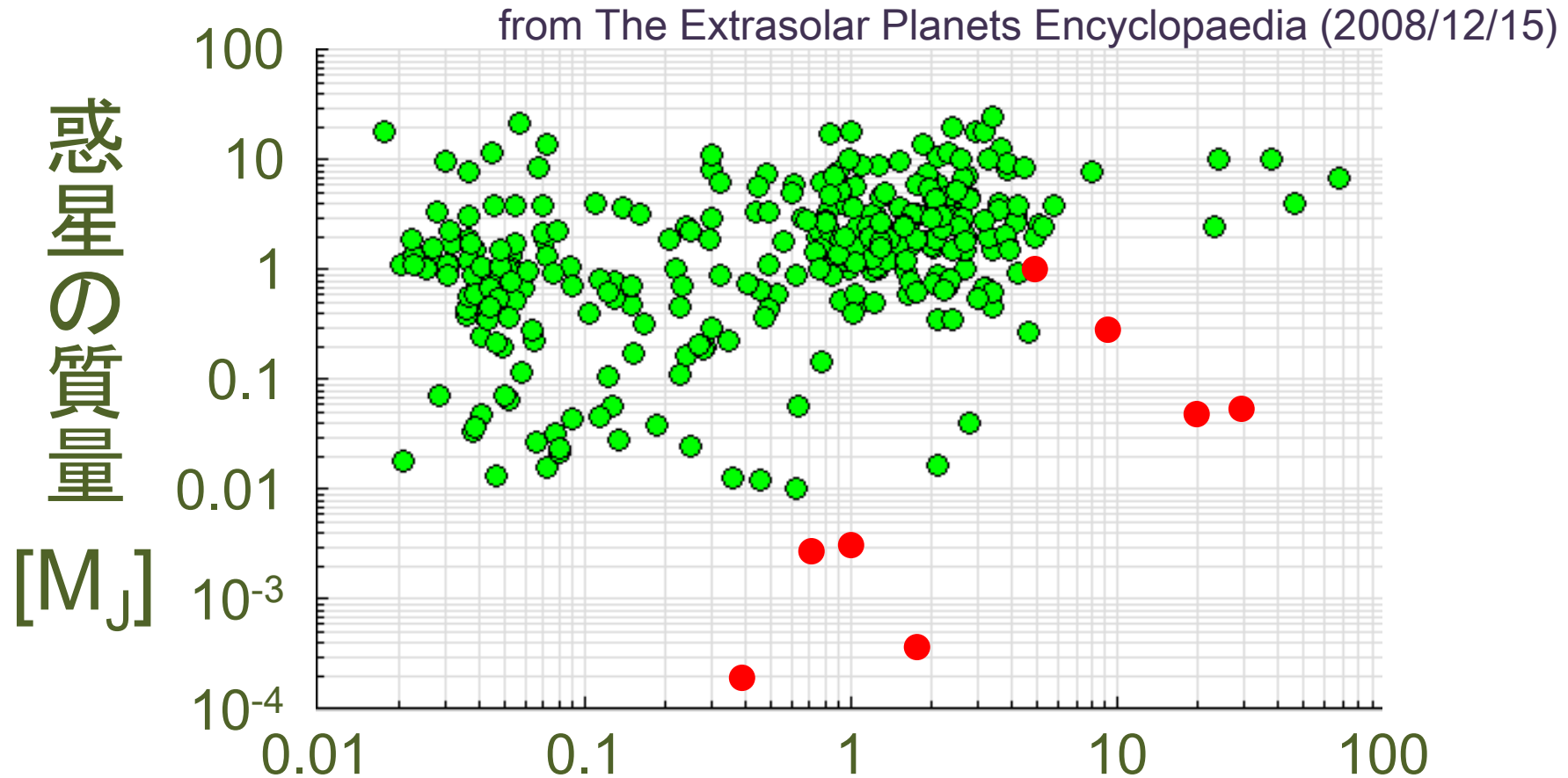


地球型惑星
(岩石惑星)

木星型惑星
(巨大ガス惑星)

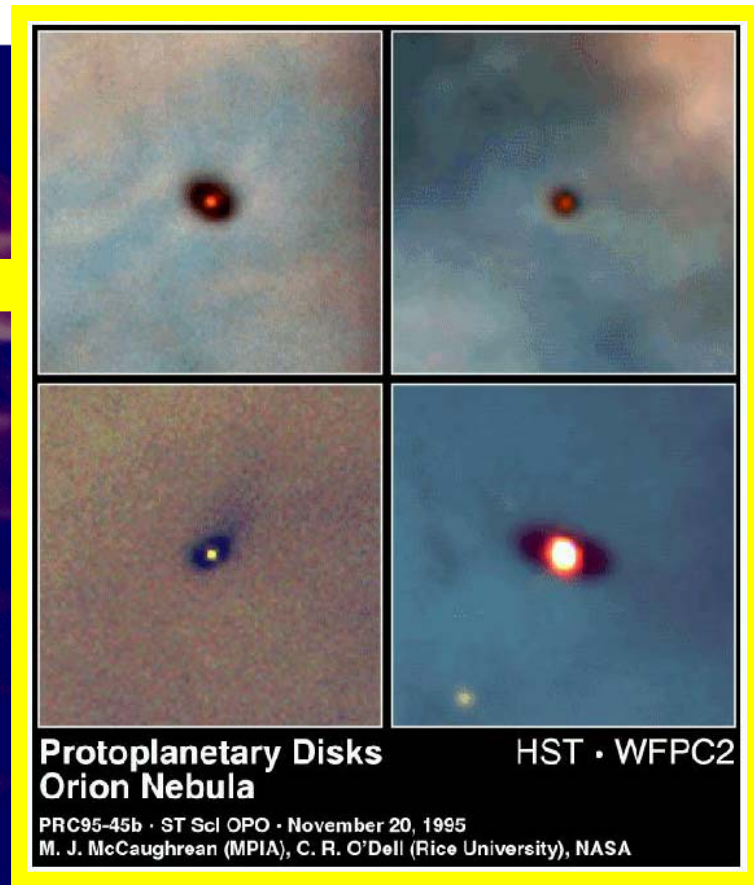
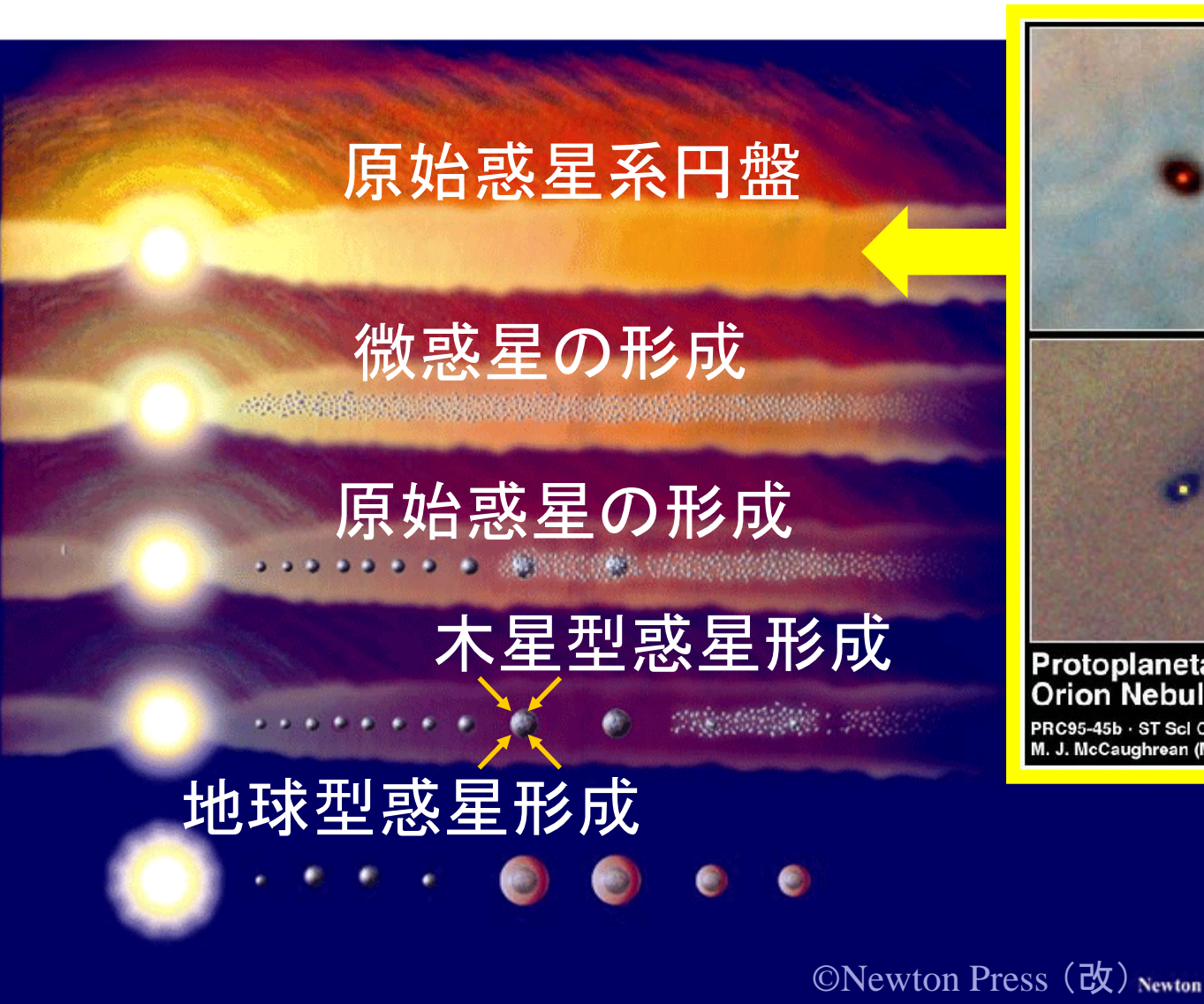
海王星型惑星
(巨大氷惑星)

一般的か特殊のか？



一般的でも特殊でもない
沢山のバリエーションの中の1

惑星系の形成

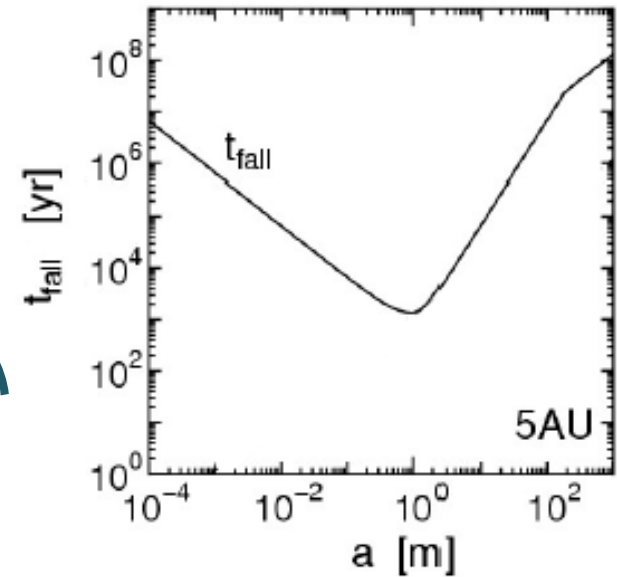


微惑星の形成



固体粒子は向い風を受けて落下！

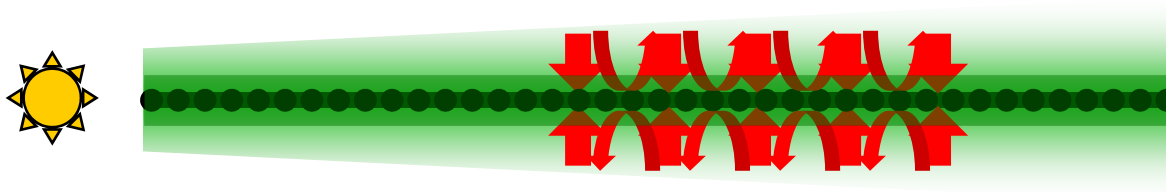
- $r \ll 1\text{m}$: ガスと一緒に運動
- $r \gg 1\text{m}$: ガス抵抗が効かない
- $r \sim 1\text{m}$: **~100年で落下**



一気にkmサイズまで成長させればよい

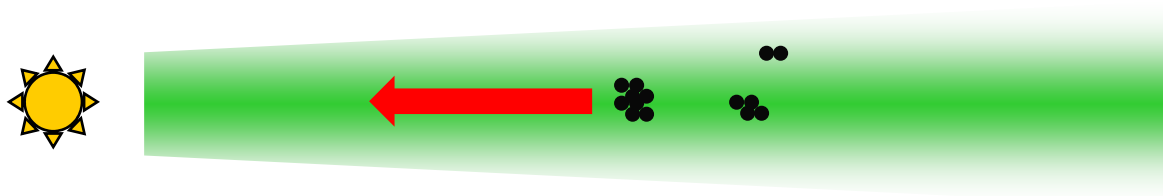
微惑星形成のモデル

▶ 重力不安定モデル e.g., Goldreich & Ward (1973)



ダストが十分に沈殿できない

▶ 衝突合体モデル e.g., Benz (2000)



合体成長する前に落下する可能性が高い

惑星系の形成

原始惑星系円盤

微惑星の形成できない！

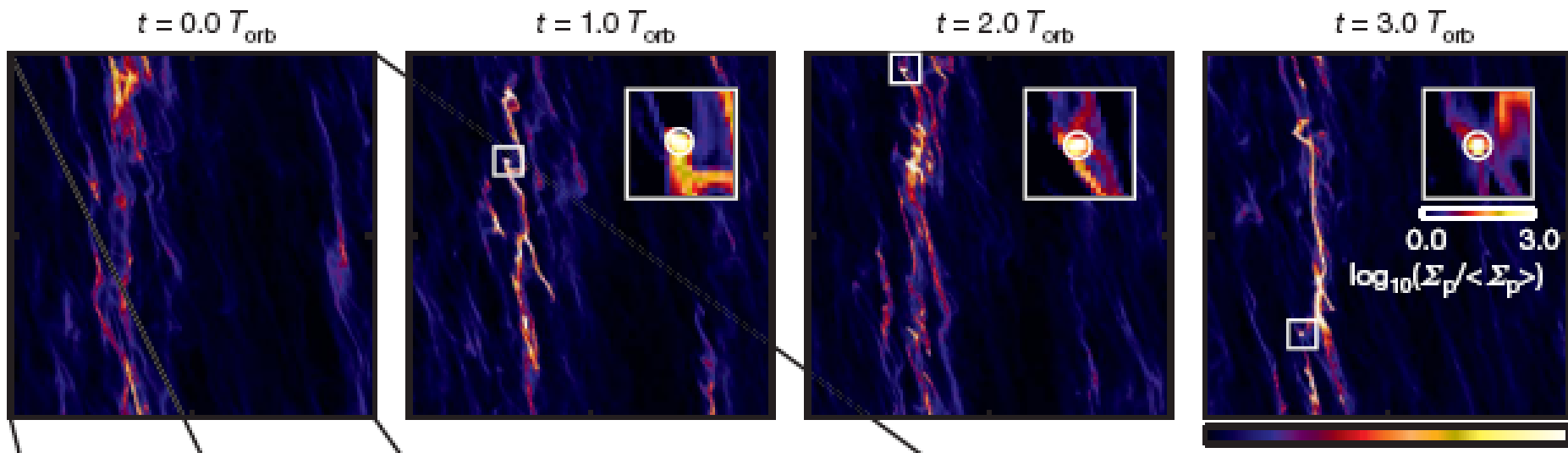
原始惑星の形成

木星型惑星形成

地球型惑星形成

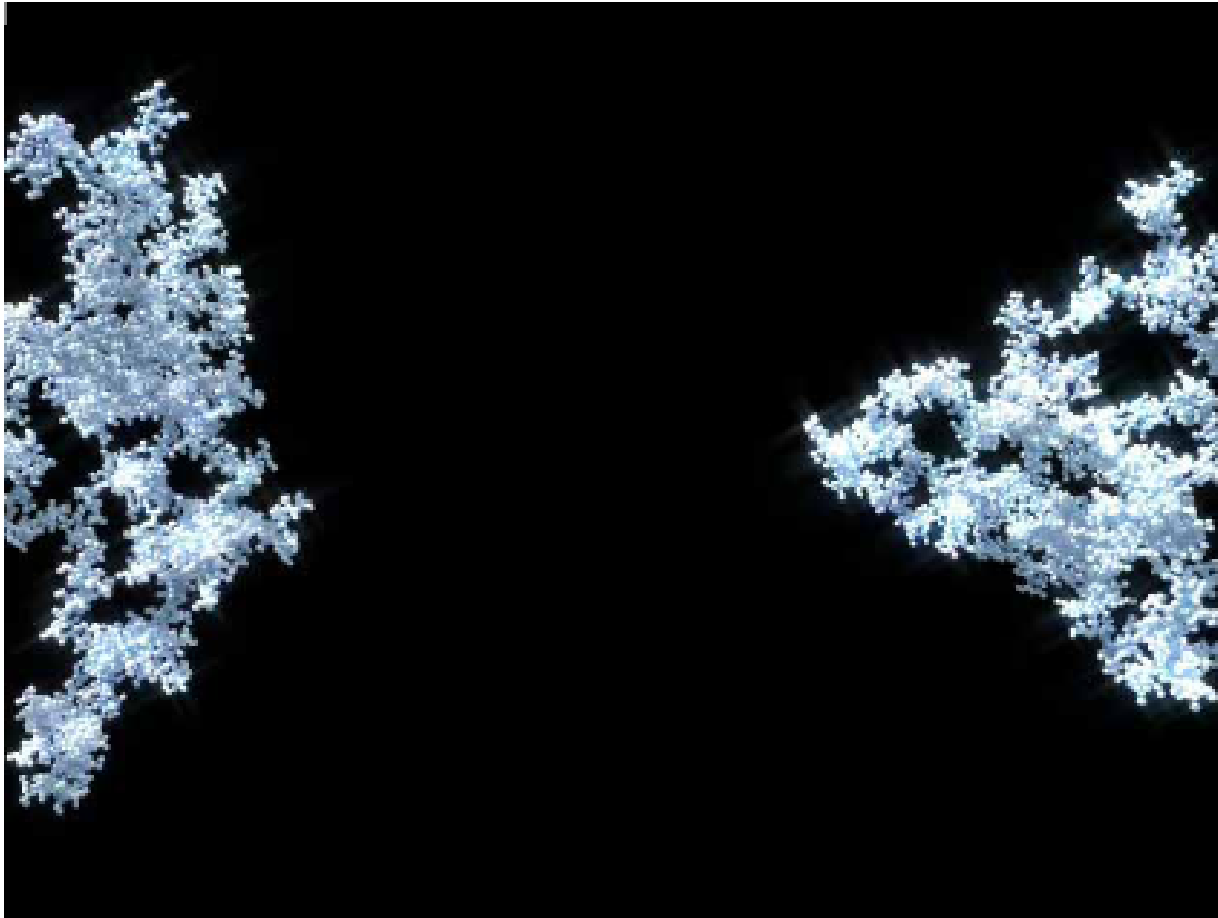
乱流中での微惑星形成

Johansen et al. (2007)



氷ダストの衝突計算

Suyama et al. (2008)



惑星系の形成

原始惑星系円盤

微惑星の形成 ←なんとかなりそう

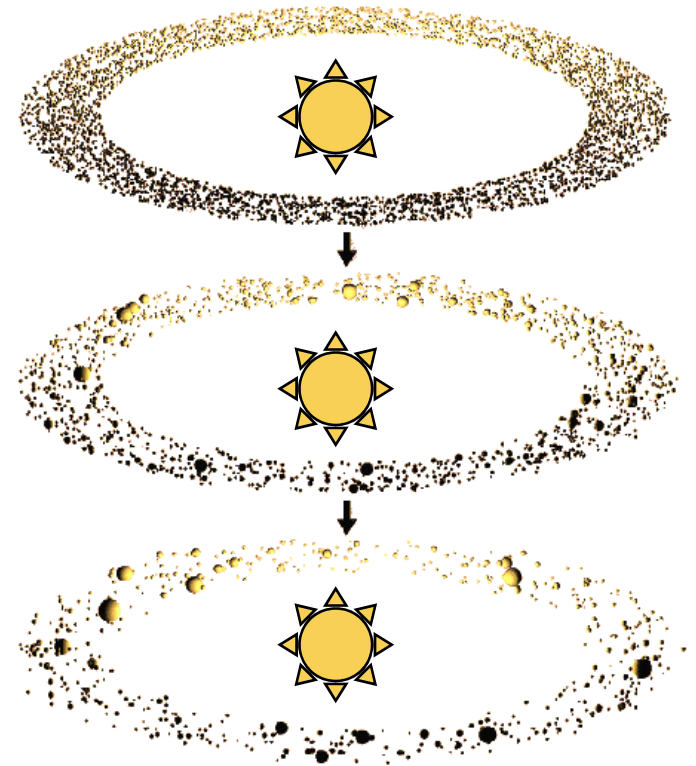
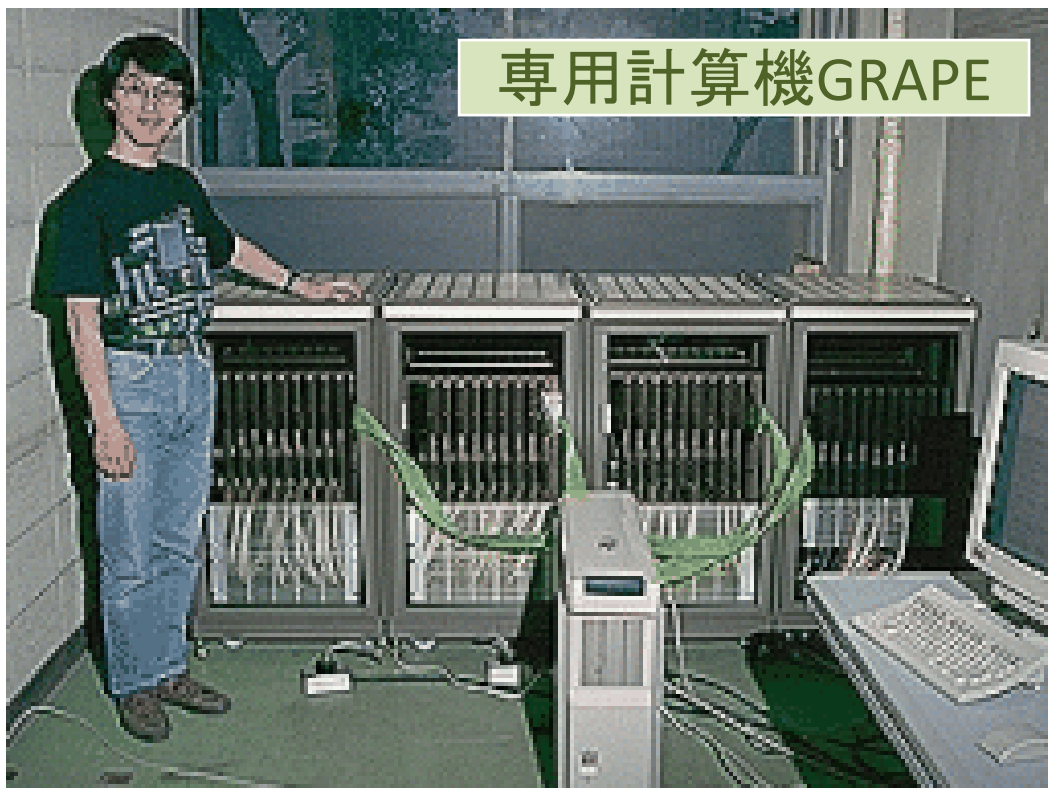
原始惑星の形成

木星型惑星形成

地球型惑星形成

微惑星から原始惑星へ

相互重力をすべて入れて、ニュートンの重力の方程式のもとで軌道計算



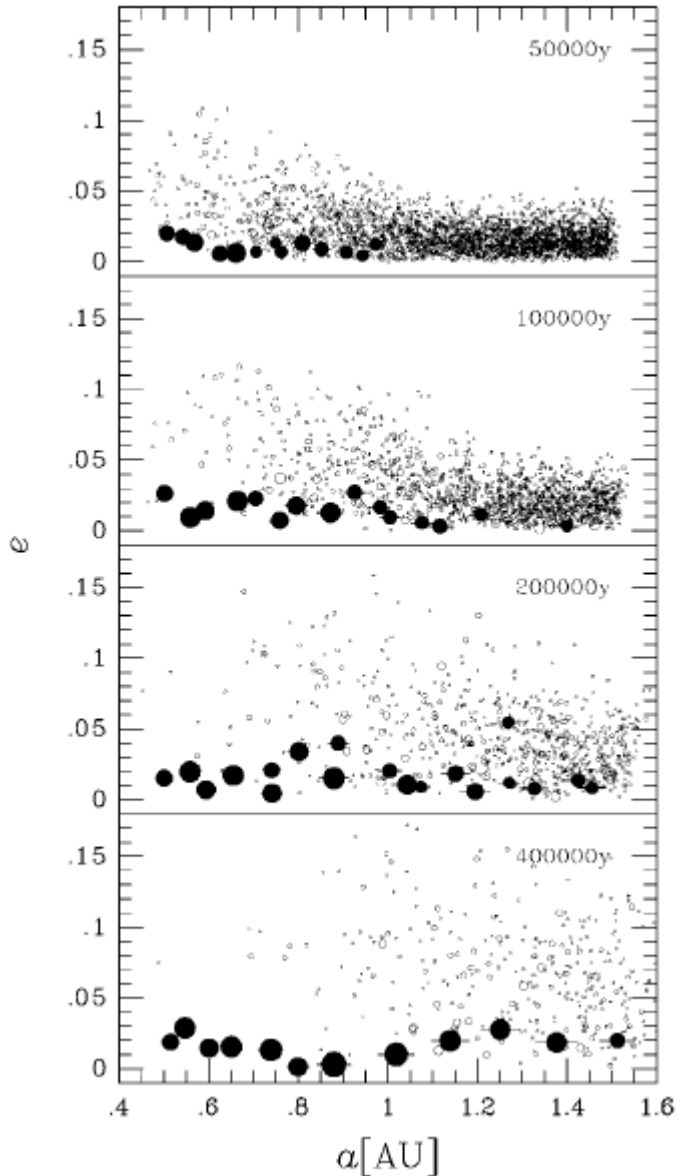
原始惑星の形成

原始惑星の形成時間

$$T_{\text{grow}} \simeq 3.21 \times 10^5 f_{\text{ice}}^{-1/2} \left(\frac{f_{\text{gas}}}{240} \right)^{-2/5} \left(\frac{\bar{b}}{10} \right)^{1/10} \left(\frac{\Sigma_1}{10} \right)^{-9/10} \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{(9\alpha+16)/10} \text{ [year]}$$

原始惑星の最終質量

$$M_{\text{iso}} \approx \begin{cases} 0.2 \left(\frac{\Sigma}{\Sigma_{\text{min}}} \right)^{3/2} \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{3/4} \left(\frac{\Delta a}{15r_{\text{H}}} \right)^{3/2} M_{\oplus} \\ 5 \left(\frac{\Sigma}{\Sigma_{\text{min}}} \right)^{3/2} \left(\frac{a}{10\text{AU}} \right)^{3/4} \left(\frac{\Delta a}{15r_{\text{H}}} \right)^{3/2} M_{\oplus} \end{cases}$$



Kokubo & Ida (2002)

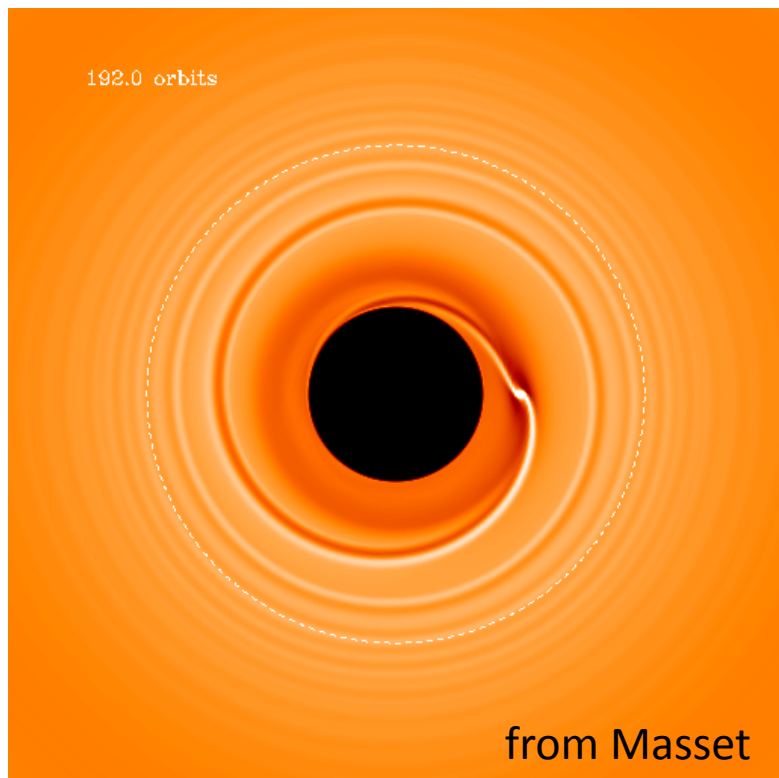
原始惑星の形成時の問題

Type-I 惑星移動



原始惑星の落下

e.g., Goldreich & Tremaine (1979),
Ward (1986, 1997), Tanaka et al. (2002)
Masset et al. (2006)



$$t_{\text{mig,I}} \approx 5 \times 10^4 f_d^{-1} \left(\frac{M_1}{M_{\oplus}} \right)^{-1} \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{3/2} \text{ years}$$

円盤の自己重力を入れると、
1桁遅くなるかも

Baruteau & Masset (2008)

円盤の温度構造を考えると、
遅くなる(時には止まるかも)

Baruteau & Masset (2008) IAU Symposium

惑星系の形成

原始惑星系円盤

微惑星の形成

原始惑星の形成

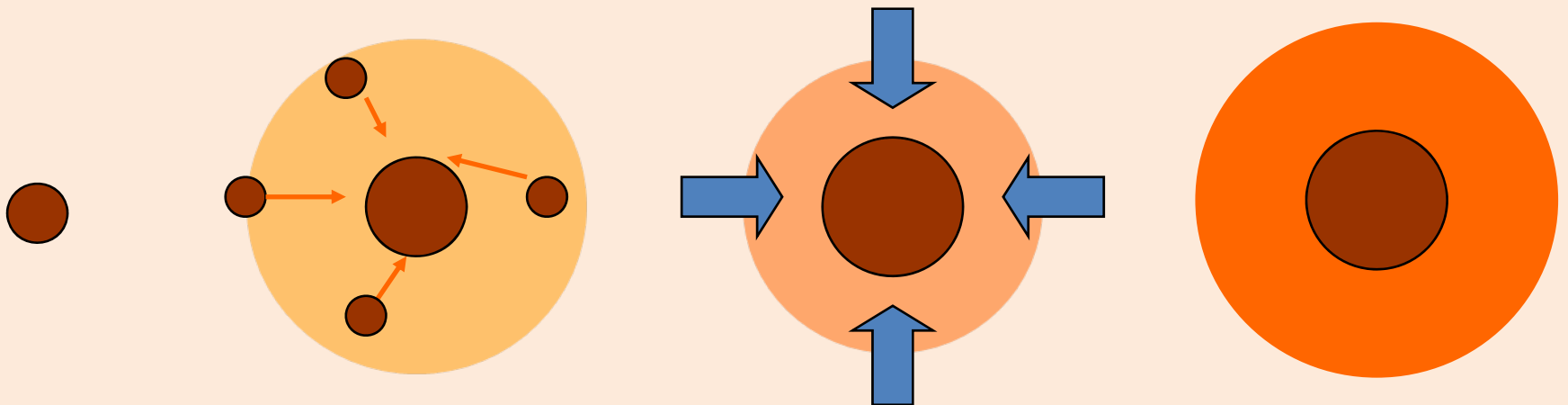
木星型惑星形成

地球型惑星形成

木星型惑星の形成

コア集積モデル

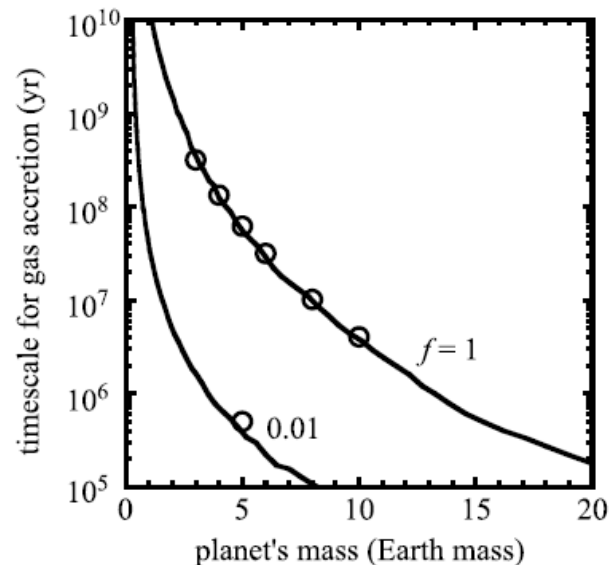
Mizuno (1980)



木星型惑星形成時の問題

▶ 円盤ガス獲得時間

$$M_{\text{iso}} \approx \begin{cases} 0.2 \left(\frac{\Sigma}{\Sigma_{\text{min}}} \right)^{3/2} \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{3/4} \left(\frac{\Delta a}{15r_{\text{H}}} \right)^{3/2} M_{\oplus} \\ 5 \left(\frac{\Sigma}{\Sigma_{\text{min}}} \right)^{3/2} \left(\frac{a}{10\text{AU}} \right)^{3/4} \left(\frac{\Delta a}{15r_{\text{H}}} \right)^{3/2} M_{\oplus} \end{cases}$$



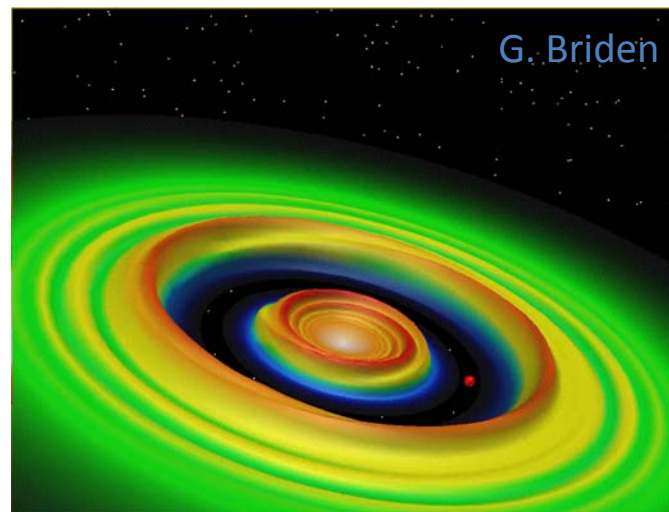
Ikoma & Genda (2006)

▶ Type-II 惑星移動



Lin & Papaloizou (1985)

巨大ガス惑星の落下



惑星系の形成

原始惑星系円盤

微惑星の形成

原始惑星の形成

木星型惑星形成

地球型惑星形成

海王星型惑星の形成

原始惑星そのものが海王星型惑星

円盤ガスがあると、巨大ガス惑星なる



円盤ガスが晴れたとほぼ同時に形成

原始惑星形成に～100億年かかる

惑星系の形成

原始惑星系円盤

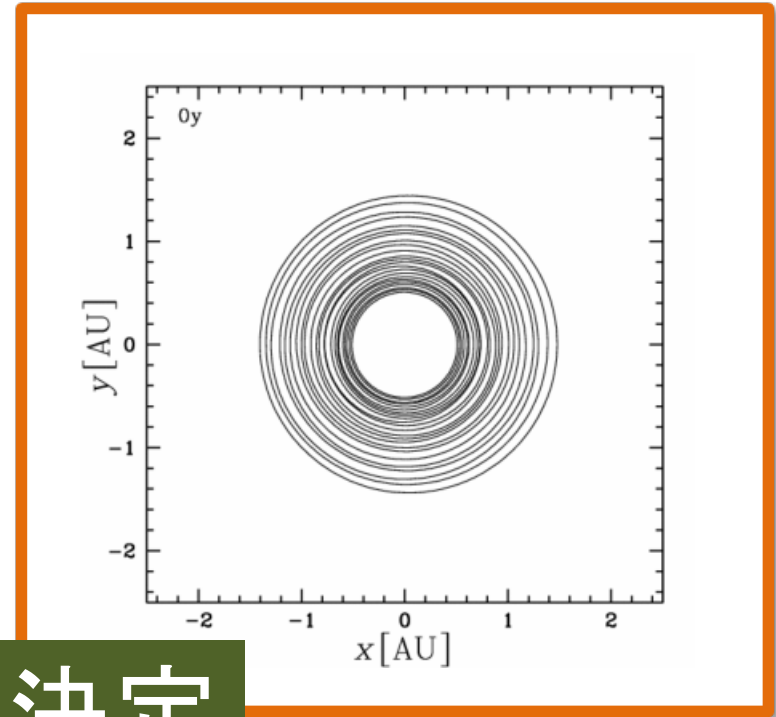
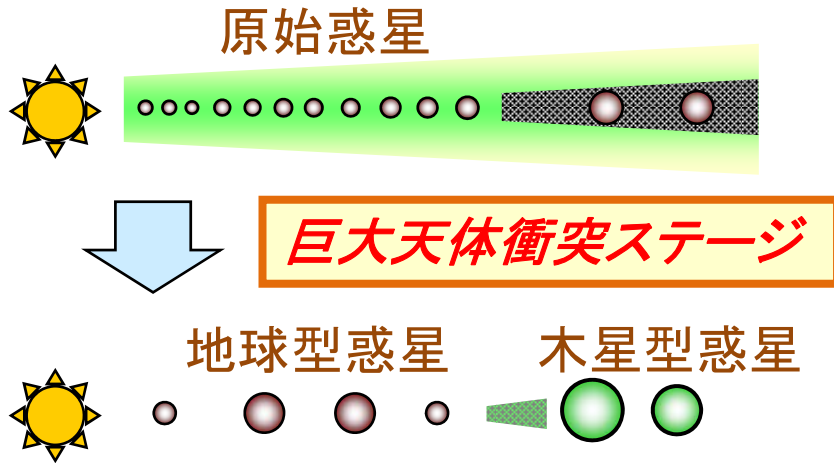
微惑星の形成

原始惑星の形成

木星型惑星形成

地球型惑星形成

地球型惑星の形成

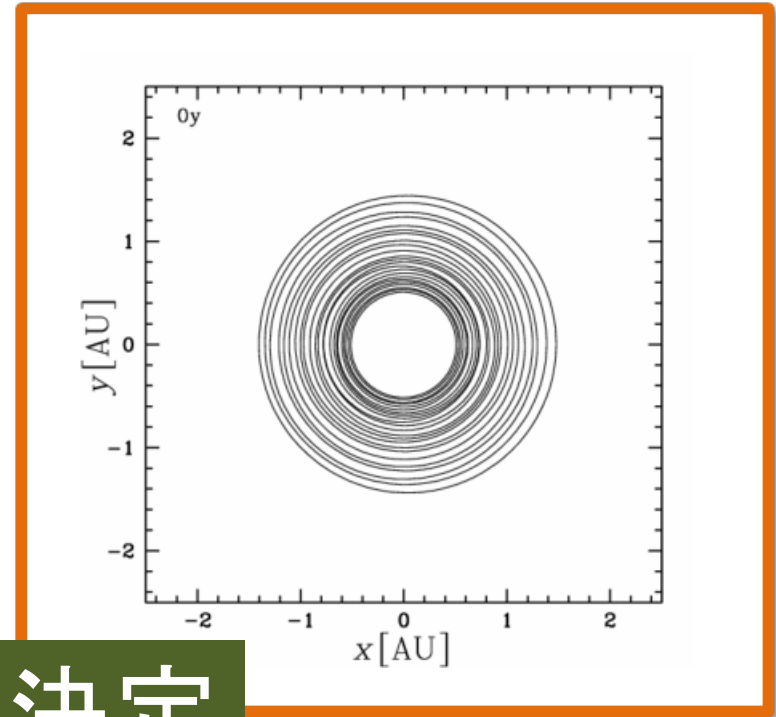
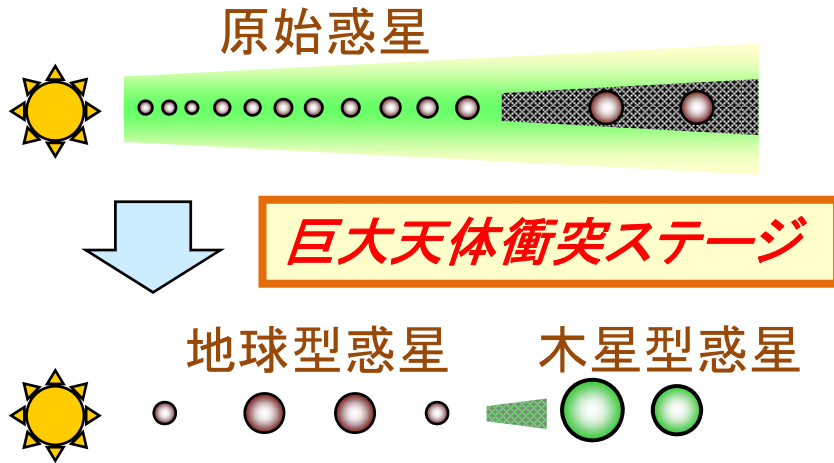


Kokubo et al. (2006)

地球型惑星の特徴を決定

- ▶ 月の形成
- ▶ 水星の大きな金属コアの形成

地球型惑星の形成



Kokubo et al. (2006)

地球型惑星の特徴を決定

- ▶ 月の形成
- ▶ 水星の大きな金属コアの形成



$4M_{\text{Mars}}$ vs. $1M_{\text{Mars}}$



Target

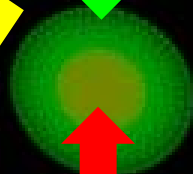
$2.6xV_{\text{esc}}$

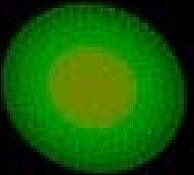
30 degree

mantle

Impactor

core







Mercury

(Mariner 10)

core: 60~70%

core

30% → 61%

地球型惑星形成時の問題

巨大天体衝突を経た惑星は・・・

- ▶ 大きな離心率をもつ ($e \sim 0.1$)
- ▶ 自転が傾き、かつ高速

まとめ1

惑星形成は、落下との戦い

1mサイズ → ガス抵抗

原始惑星 → Type-I 移動

巨大ガス惑星 → Type-II 移動

ただし、これらの落下問題は、惑星系の多様性を生んだ有力なメカニズムであることも事実

