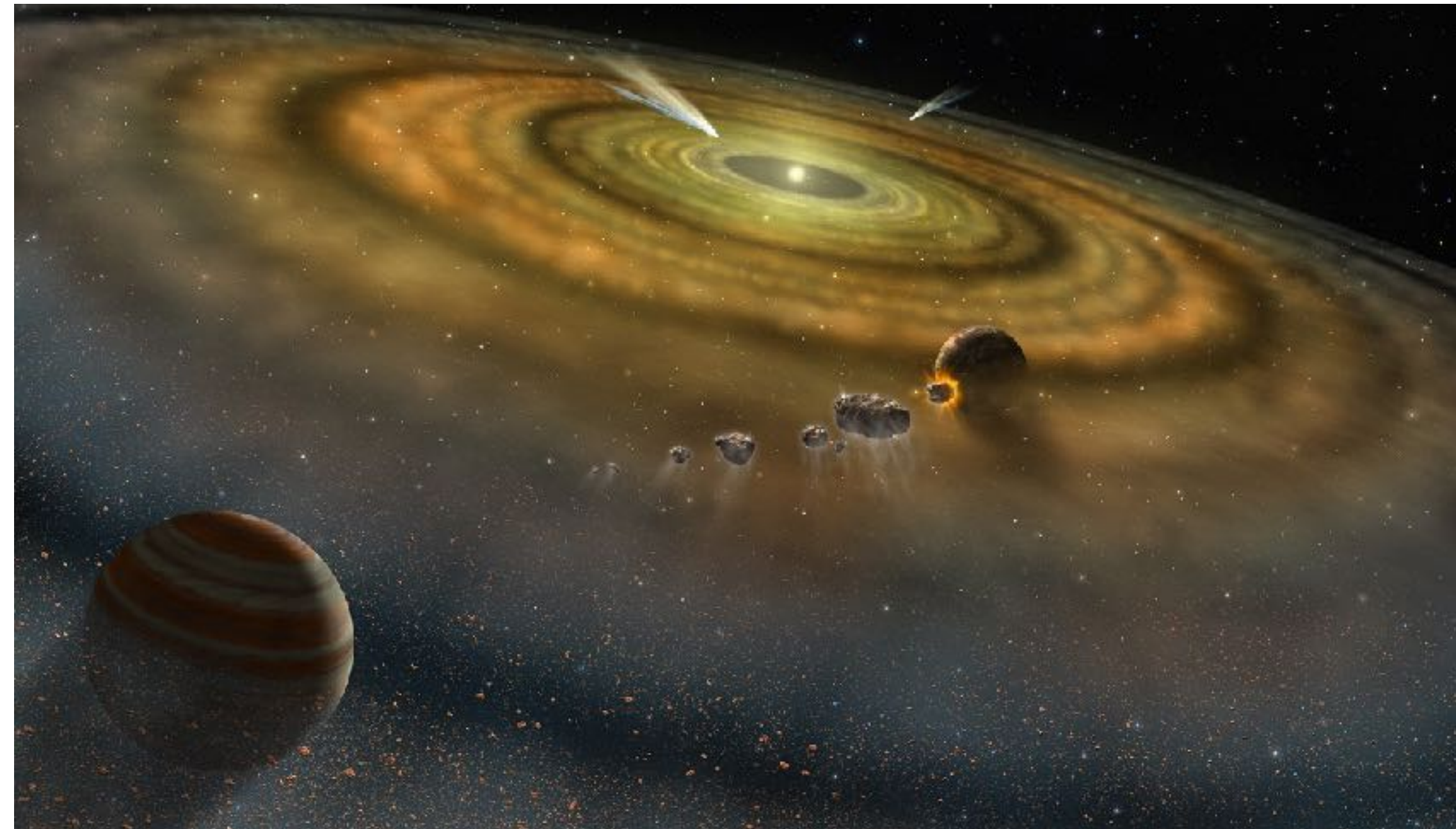


# 地球惑星圏物理学

## 第11回：惑星系形成理論の発展



黒川 宏之

東京工業大学 地球生命研究所

hiro.kurokawa@elsi.jp

# レポート課題 解答

微惑星(Figure 1)の成長方程式,

$$\frac{dM}{dt} = \pi R^2 \left( 1 + \frac{2GM}{Ru^2} \right) \rho v \quad (1)$$

において右辺括弧内の第1項と第2項の大小が入れ替わる天体半径  $R_{\text{crit}}$  が秩序的成長と暴走的成長の境界である。微惑星の物質密度  $\rho_p = 3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  とし, 微惑星間の相対速度  $u$  を 1 au において円軌道で太陽を公転する速度の1%とする。この時,  $R_{\text{crit}}$  を求めよ(有効数字1桁)。太陽質量  $M_\odot = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$ ,  $1 \text{ au} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$  を用いてもよい。

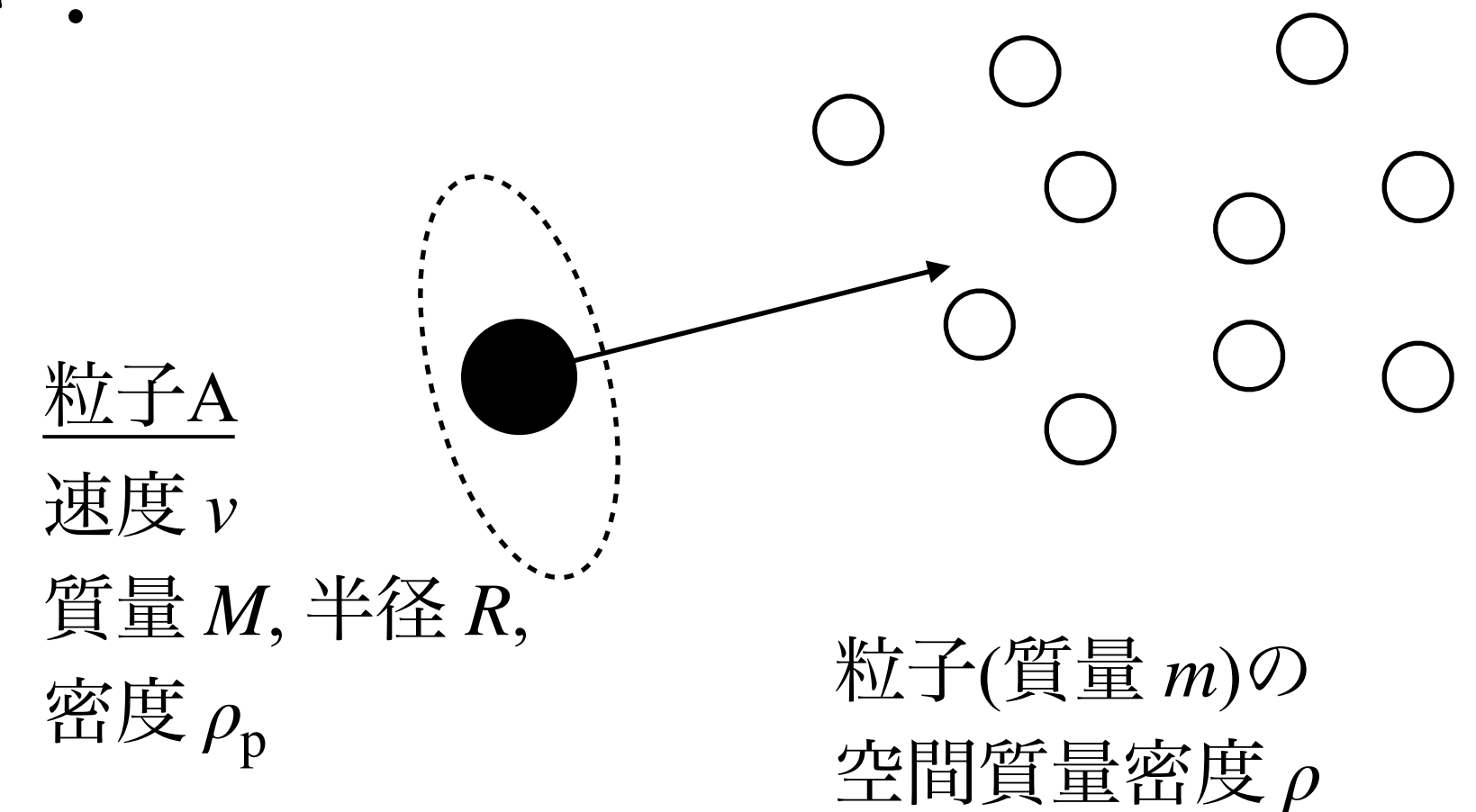


Figure 1. 微惑星の合体成長

# レポート課題 解答

---

$$\frac{2GM}{R_{\text{crit}}u^2} = 1 \quad \text{--- (2)}$$

$M = 4\pi R_{\text{crit}}^3 \rho_p / 3$  を代入して整理すると,

$$R_{\text{crit}} = \left( \frac{3}{8\pi G \rho_p} \right)^{1/2} \times u \quad \text{--- (3)}$$

ここで  $u = 2\pi \times 1.5 \times 10^{11} / (365 \times 24 \times 60 \times 60) \times 10^{-2}$  m/s (※)

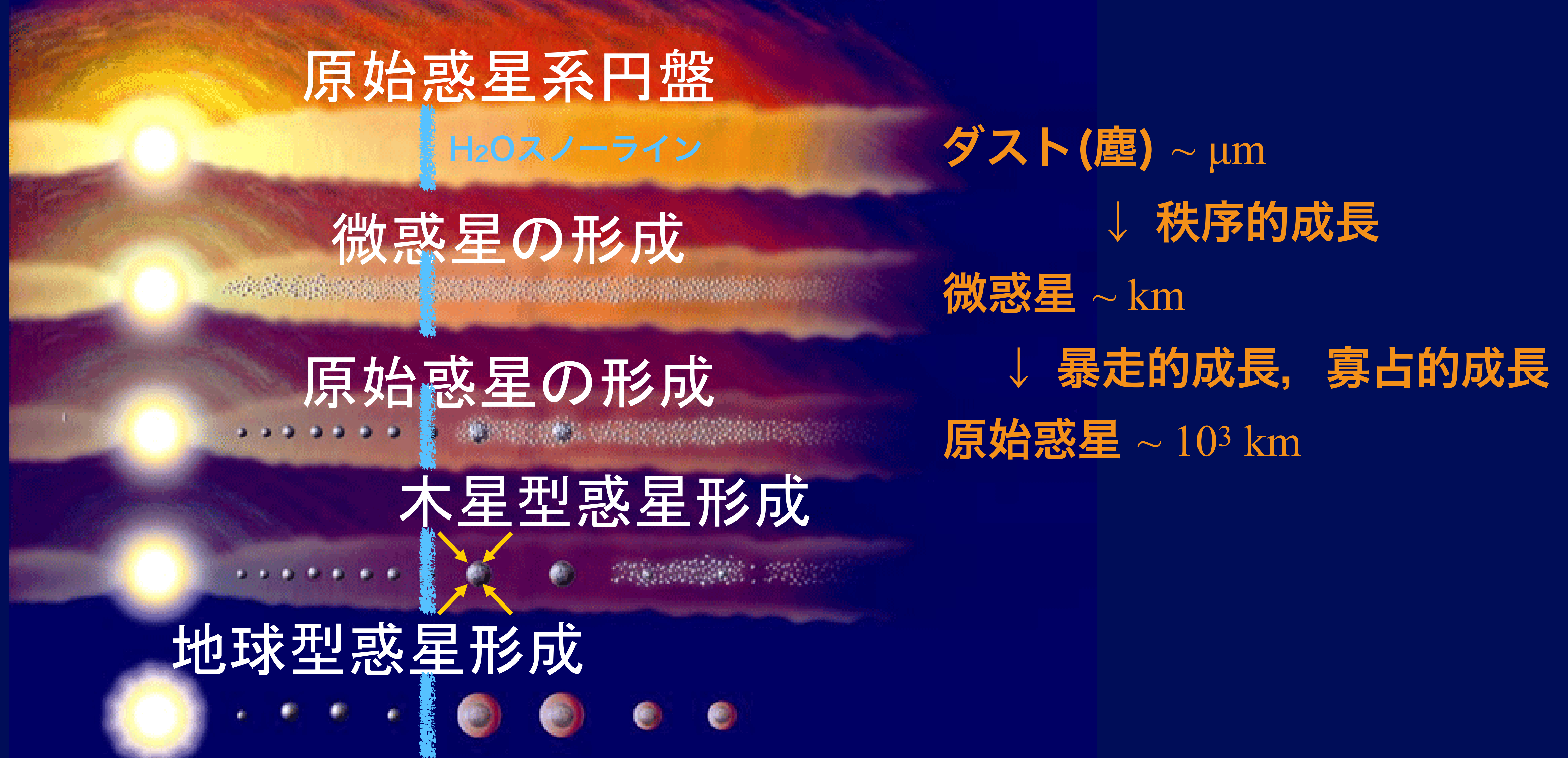
と各物理量を代入すると,

$R_{\text{crit}} = 2 \times 10^2$  km となる.

※  $u = \sqrt{GM_{\odot}/r_{1\text{au}}} \times 10^{-2}$  から計算してもよい

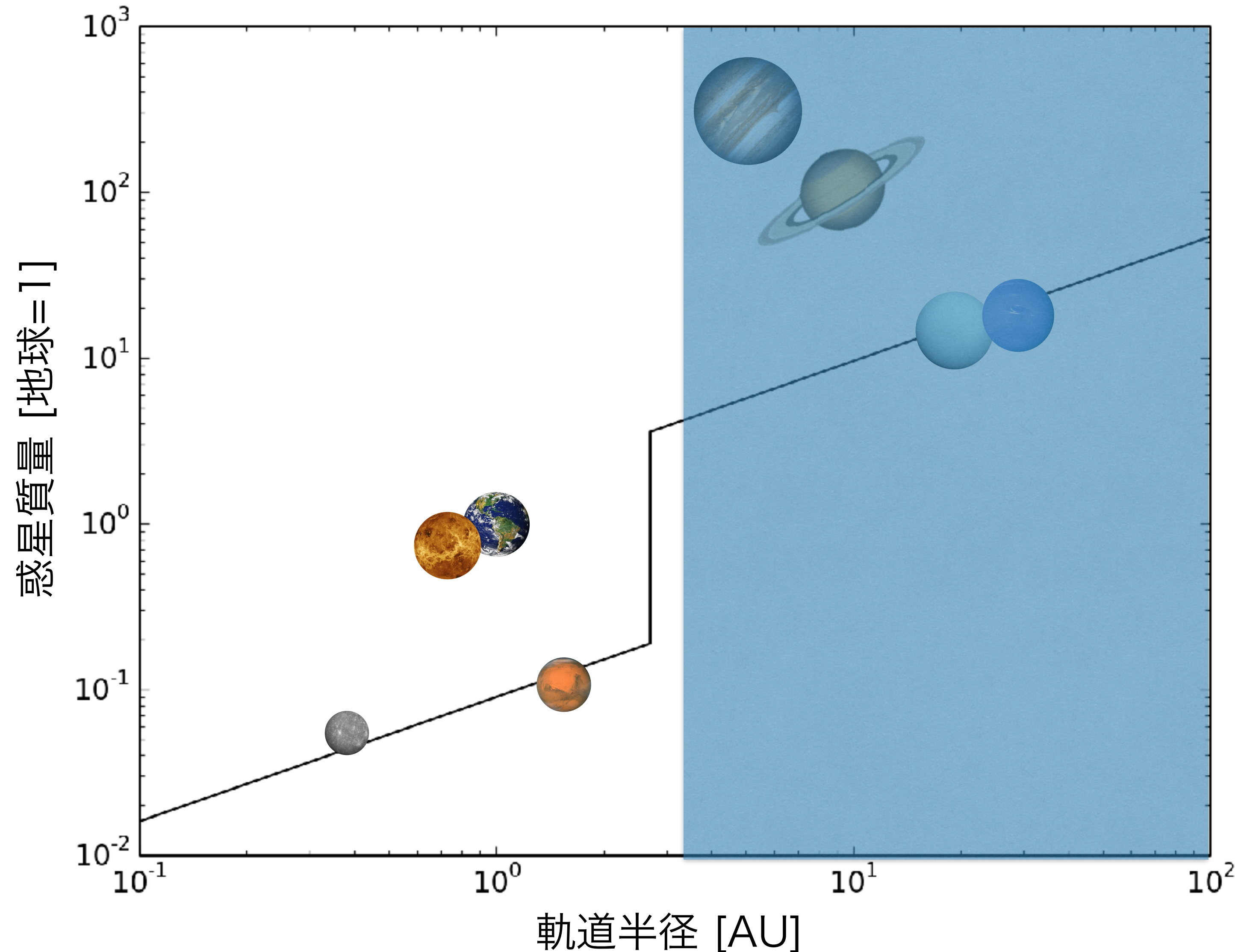


# 復習：惑星系形成の標準モデル





# 標準モデルにおける成長時間の問題



軌道半径大 → 公転速度小

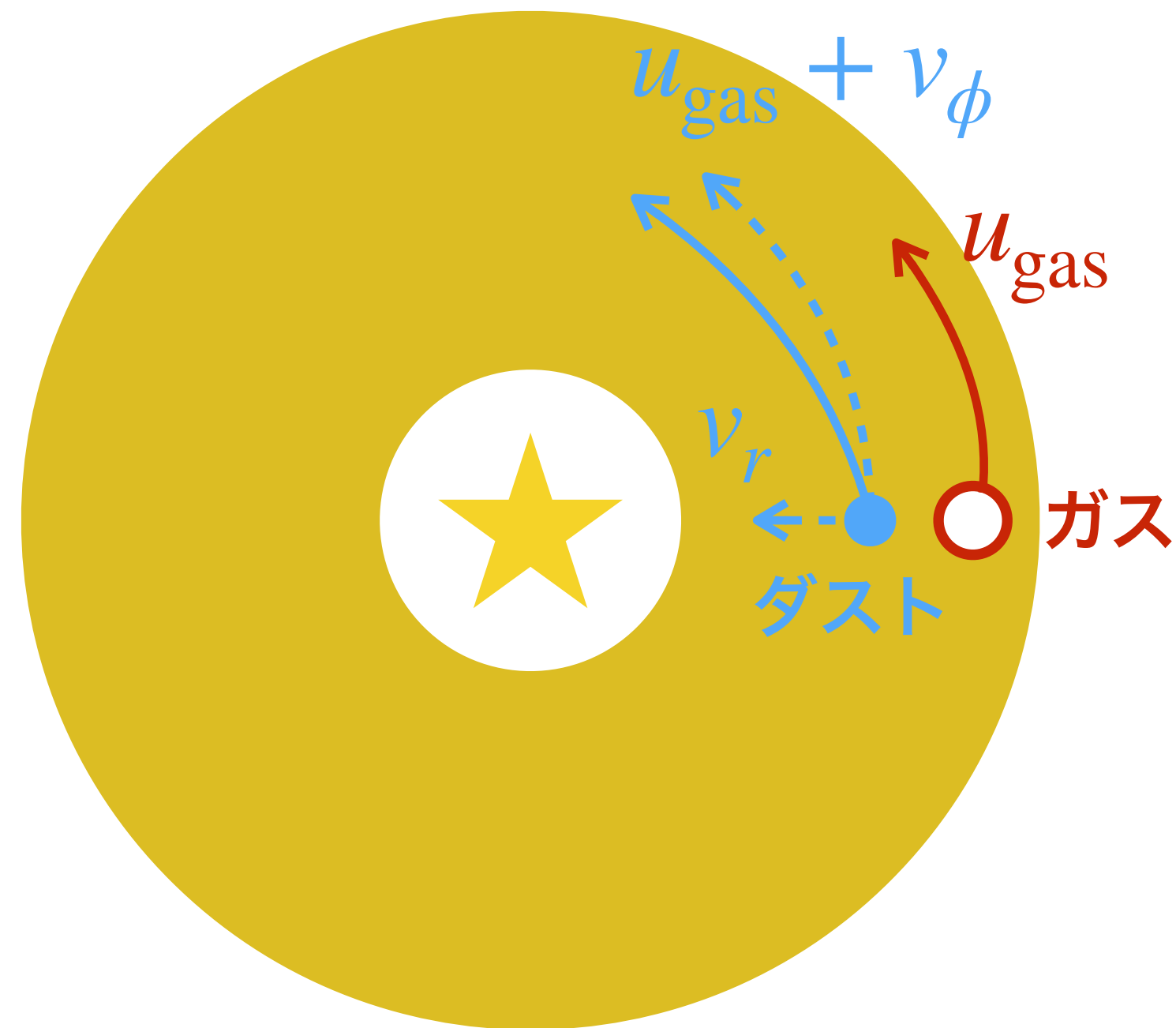
$$(\because v_K = r\Omega_K = \sqrt{\frac{GM_*}{r}})$$

→ 衝突頻度小

MMSNモデルでは円盤寿命内に  
木星以遠の惑星が形成しない  
(※ 円盤が重ければ成長速い)

# ダストの運動

## 原始惑星系円盤



圧力勾配力を受けるガスはダストよりゆっくり公転。  
向かい風のガス抵抗を受けるダストの運動方程式は、

$$m(\ddot{r} - r\dot{\phi}^2) = -\frac{GM_{\odot}m}{r^2} - m\frac{v_r}{\tau} \quad (1),$$

$$m\frac{1}{r}\frac{d}{dt}(r^2\dot{\phi}) = -m\frac{v_{\phi}}{\tau} \quad (2).$$

$\tau$  : ガス抵抗で速度が変化する時間 (制動時間)

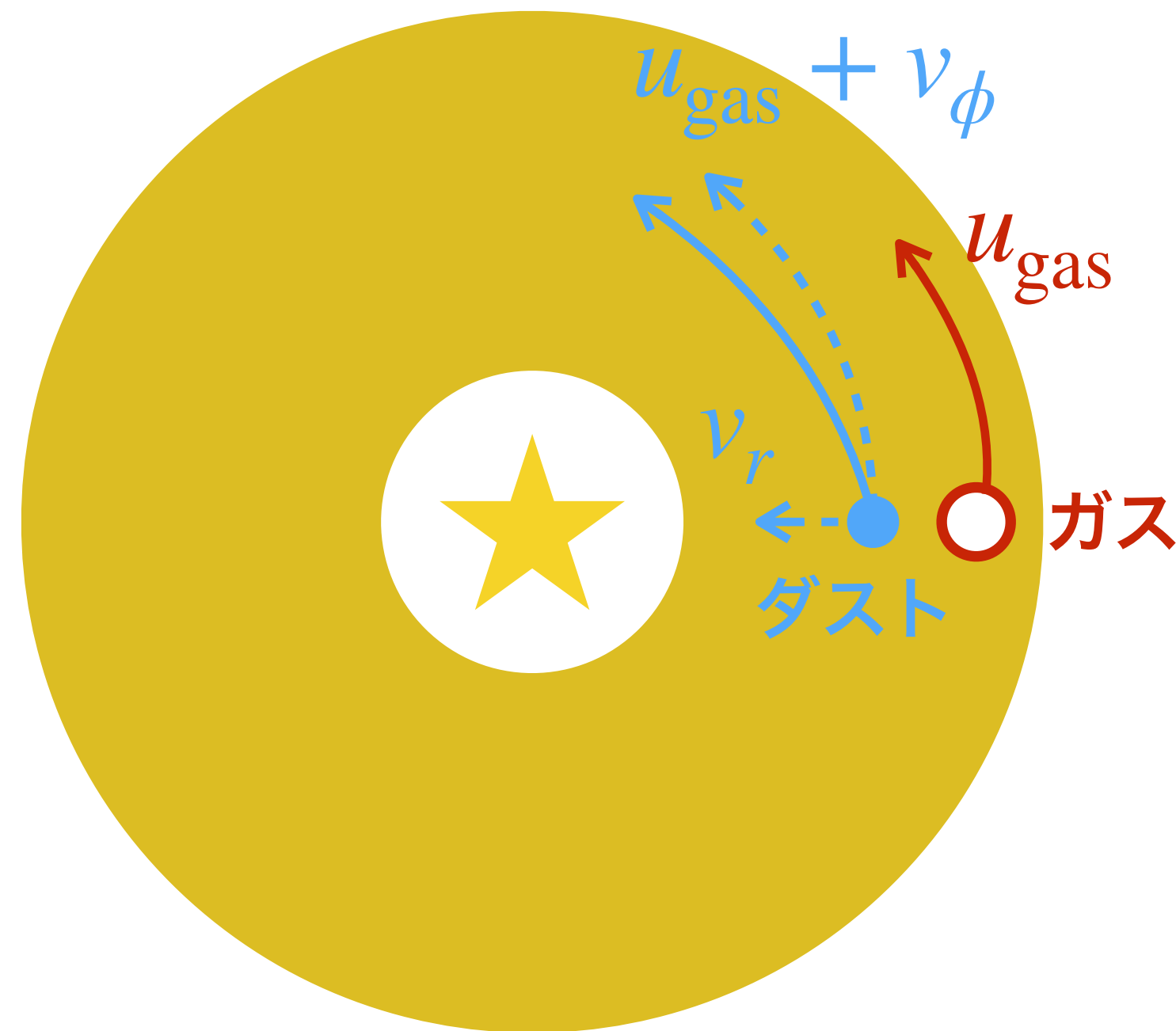
$\dot{r} = v_r$  ,  $\dot{\phi} = u_{\text{gas}} + v_{\phi}$  とおくと、

$$\frac{dv_r}{dt} - r\left(\frac{u_{\text{gas}} + v_{\phi}}{r}\right)^2 = -\frac{GM_{\odot}}{r^2} - \frac{v_r}{\tau} \quad (3),$$

$$\frac{1}{r}\left[r^2\left(\frac{u_{\text{gas}} + v_{\phi}}{r}\right)\right] = -\frac{v_{\phi}}{\tau} \quad (4).$$

# ダストの運動

## 原始惑星系円盤



ガス公転速度  $u_{\text{gas}}$  はケプラー速度  $v_{\text{K}}$  よりわずかに遅い  
これを  $u_{\text{gas}} = (1 - \eta)v_{\text{K}}$  とおく ( $\eta \ll 1$ ).

$\eta v_{\text{K}}, v_r, v_\phi \ll v_{\text{K}}$  として2次以下の微小量を落とすと

$$(3) \text{より } \frac{dv_r}{dt} \simeq \frac{v_{\text{K}}^2 - 2\eta v_{\text{K}}^2 + 2v_{\text{K}}v_\phi}{r} - \frac{v_r}{\tau} - \frac{GM_\odot}{r^2}$$

$$= \frac{-2\eta v_{\text{K}}^2 + 2v_{\text{K}}v_\phi}{r} - \frac{v_r}{\tau} \quad (5)$$

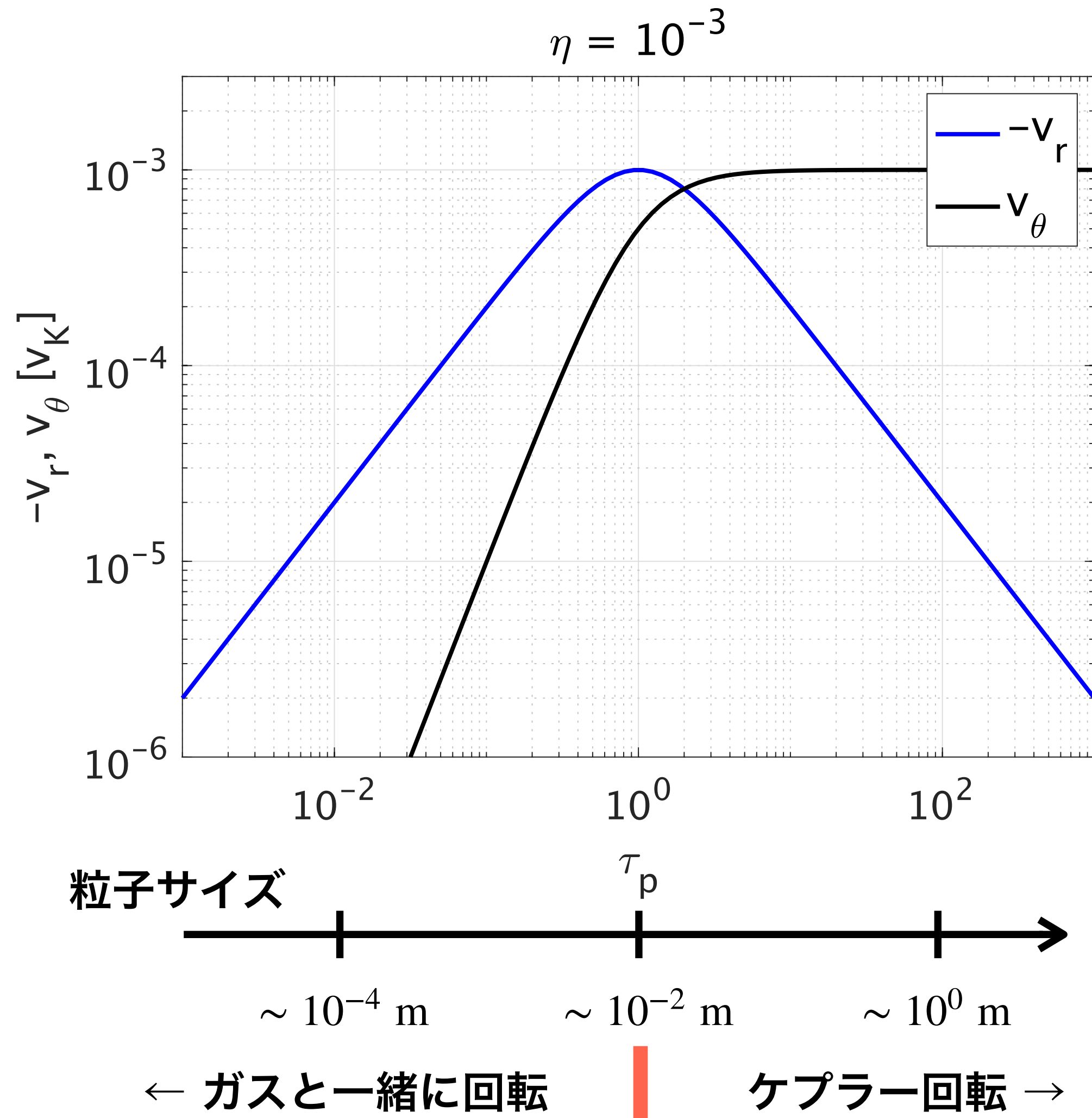
$$(4) \text{より } \frac{d}{dt}[r(v_{\text{K}} - \eta v_{\text{K}} + v_\phi)] = -r \frac{v_\phi}{\tau} \quad (6)$$

$$v_r \frac{d}{dr}[r(v_{\text{K}} - \eta v_{\text{K}} + v_\phi)] = -r \frac{v_\phi}{\tau} \quad (7)$$

$$\therefore \frac{v_r v_{\text{K}}}{2} = -\frac{v_\phi}{\tau} \quad (8)$$



# ダストの中心星への落下



落下の壁！

(5), (8)より  $v_\phi$  を消去し,  $\frac{dv_r}{dt} = 0$  の定常解を求めると,

$$v_r = \frac{\tau_p}{1 + \tau_p^2} (-2\eta v_K) \quad \text{--- (9)}$$

$$v_\phi = \eta v_K \frac{\tau_p^2}{1 + \tau_p^2} \quad \text{--- (10)}$$

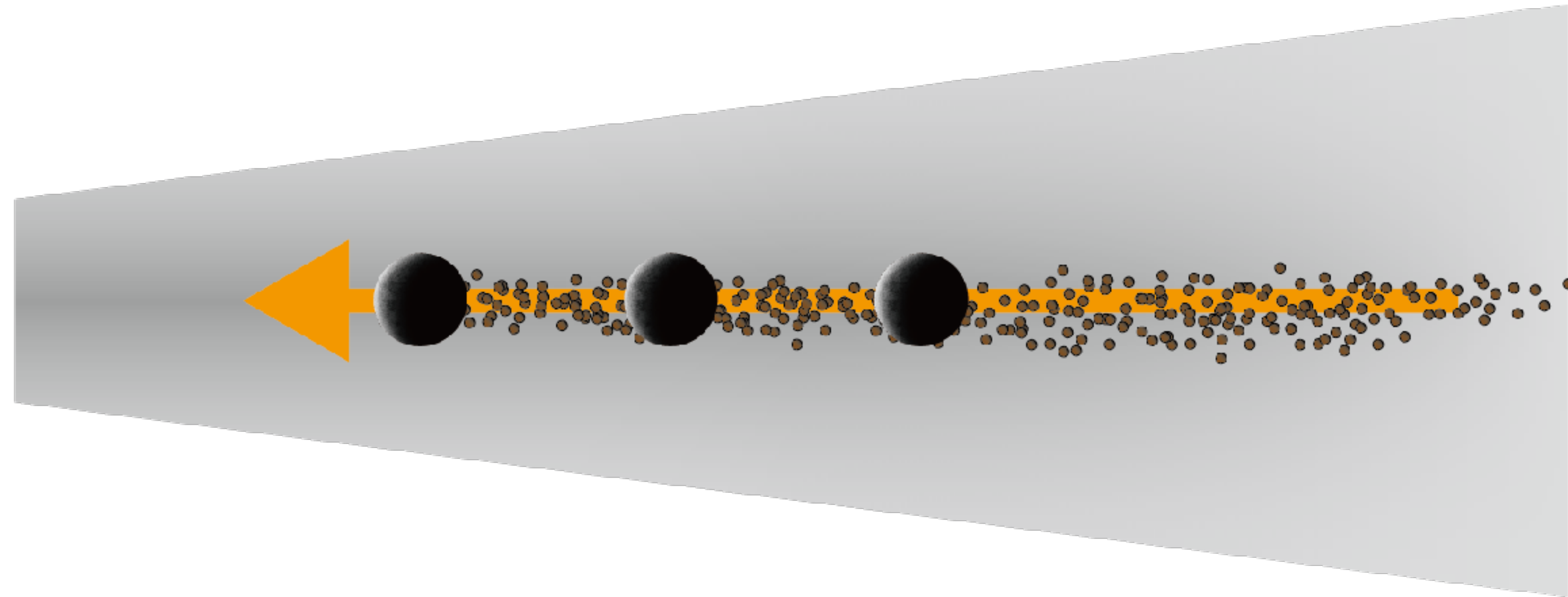
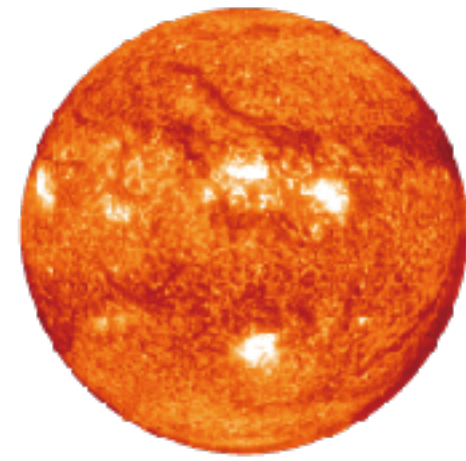
$\tau_p \equiv \tau \Omega_K$  は無次元化したダスト制動時間

$\tau_p = 1$  で  $|v_r|$  は最大となる (~cmサイズのダストに対応)

最小質量円盤モデルでは  $\eta \simeq 10^{-3} \left(\frac{a}{\text{au}}\right)^{1/2}$  --- (11)

→  $10^3$  年程度でダストは中心星に落下！

# ペブル集積モデル



地学におけるペブル (4-64 mm の小石)

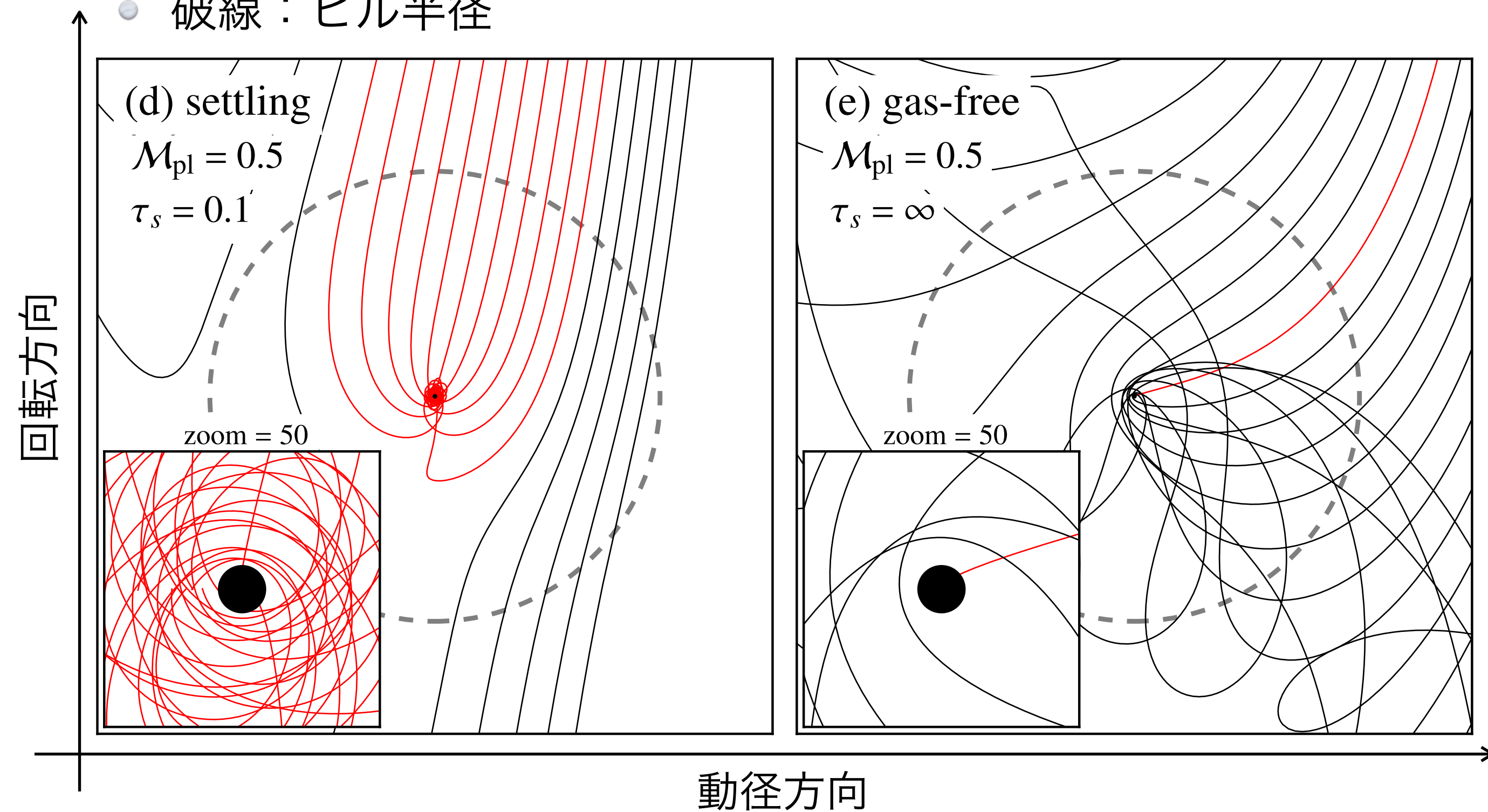
- 円盤の中を落下していく~cmサイズのダストが少数の大きな微惑星(※)に集積  
→ 惑星形成時間の問題を解決? ※微惑星の形成は別問題
- 堆積学の言葉を借りて  
**ペブル集積**と呼ばれる (e.g., Lambrechts & Johansen 2012 *Astron. Astrophys.*)  
(↔ 標準モデルの**微惑星集積**)



# ペブル集積

円盤内における惑星周囲の天体の軌道。左：ペブル，右：微惑星

- 赤：集積した，黒：集積しなかった
- 破線：ヒル半径



## 微惑星

- ガス抵抗をほとんど受けない
- 遠方から近づく天体は脱出速度を超える  
→ めったに衝突しない

## ペブル

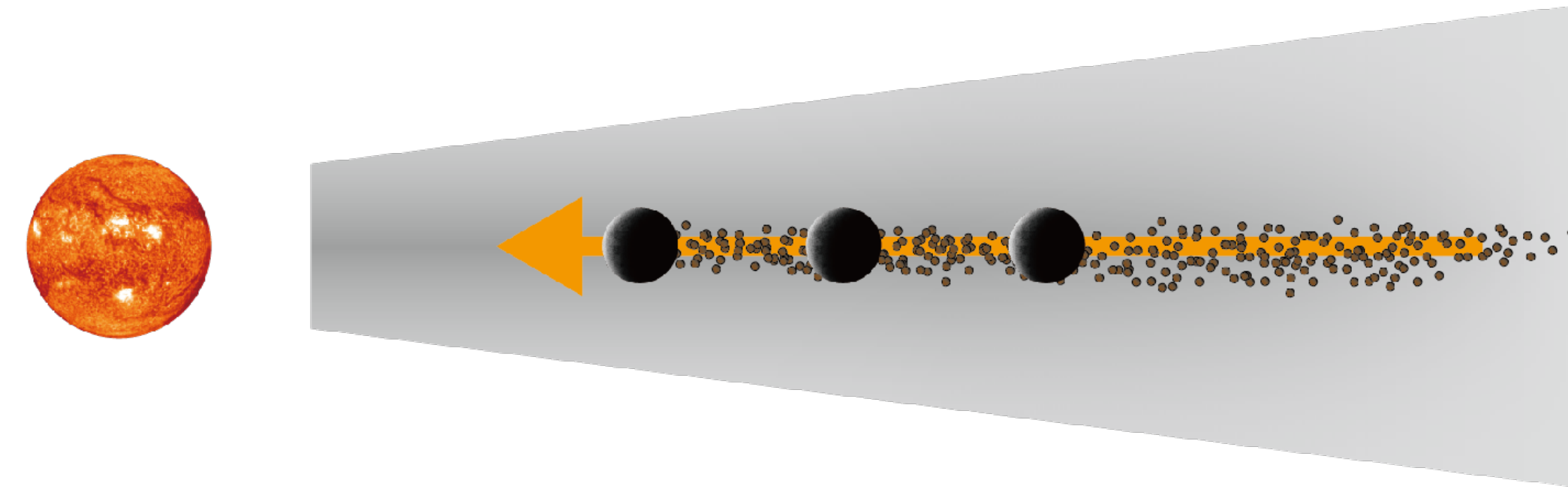
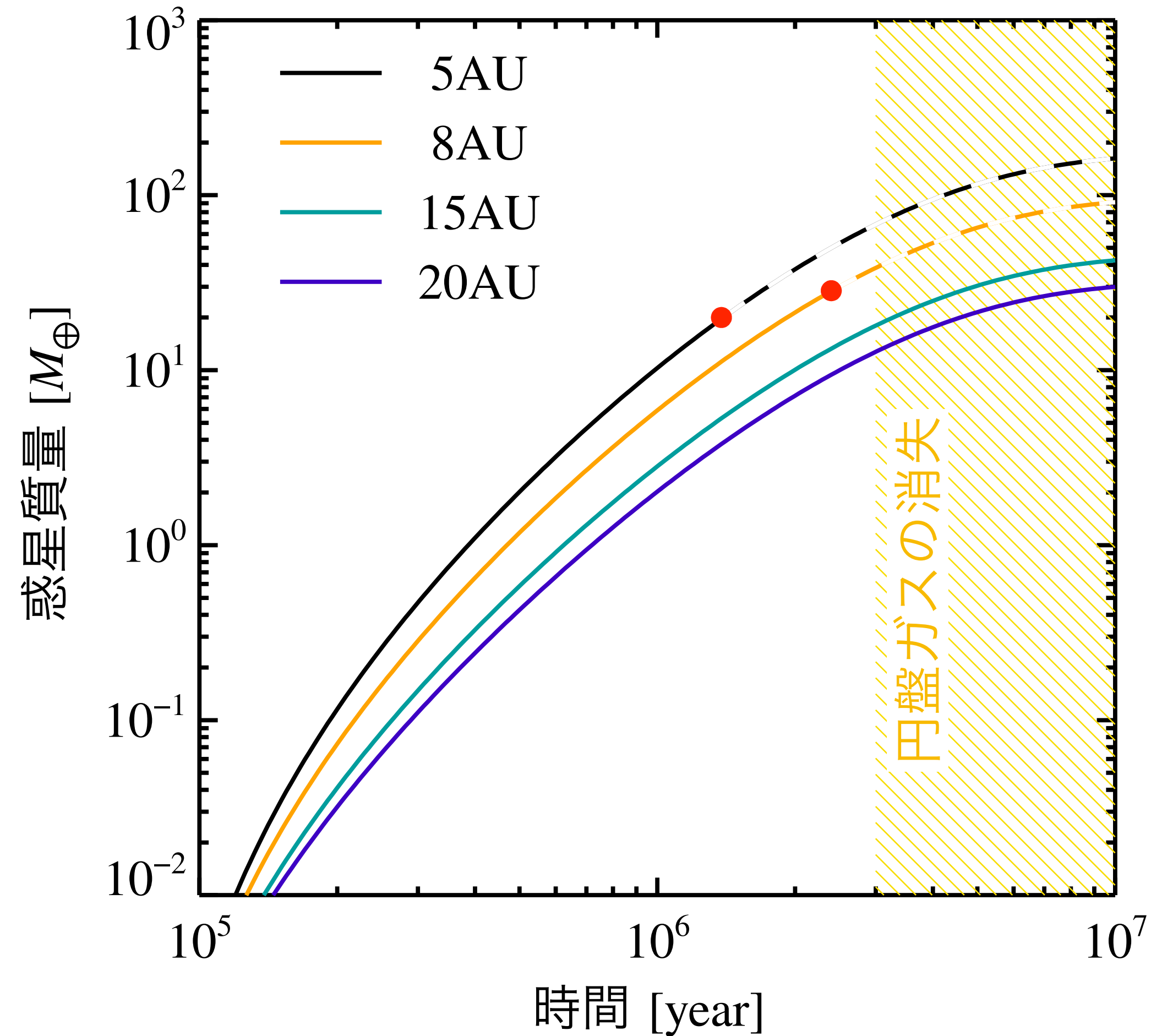
- ガス抵抗を受ける
- 惑星の重力によって引き寄せられながら  
余剰のエネルギーをガス抵抗で失う  
→ 効率的に惑星へと集積
- 集積断面積  $\sim$  ヒル半径 ( $\tau_p \sim 1$ の時)

Ormel (2017) *Astrophys. Space Sci. Lib.*



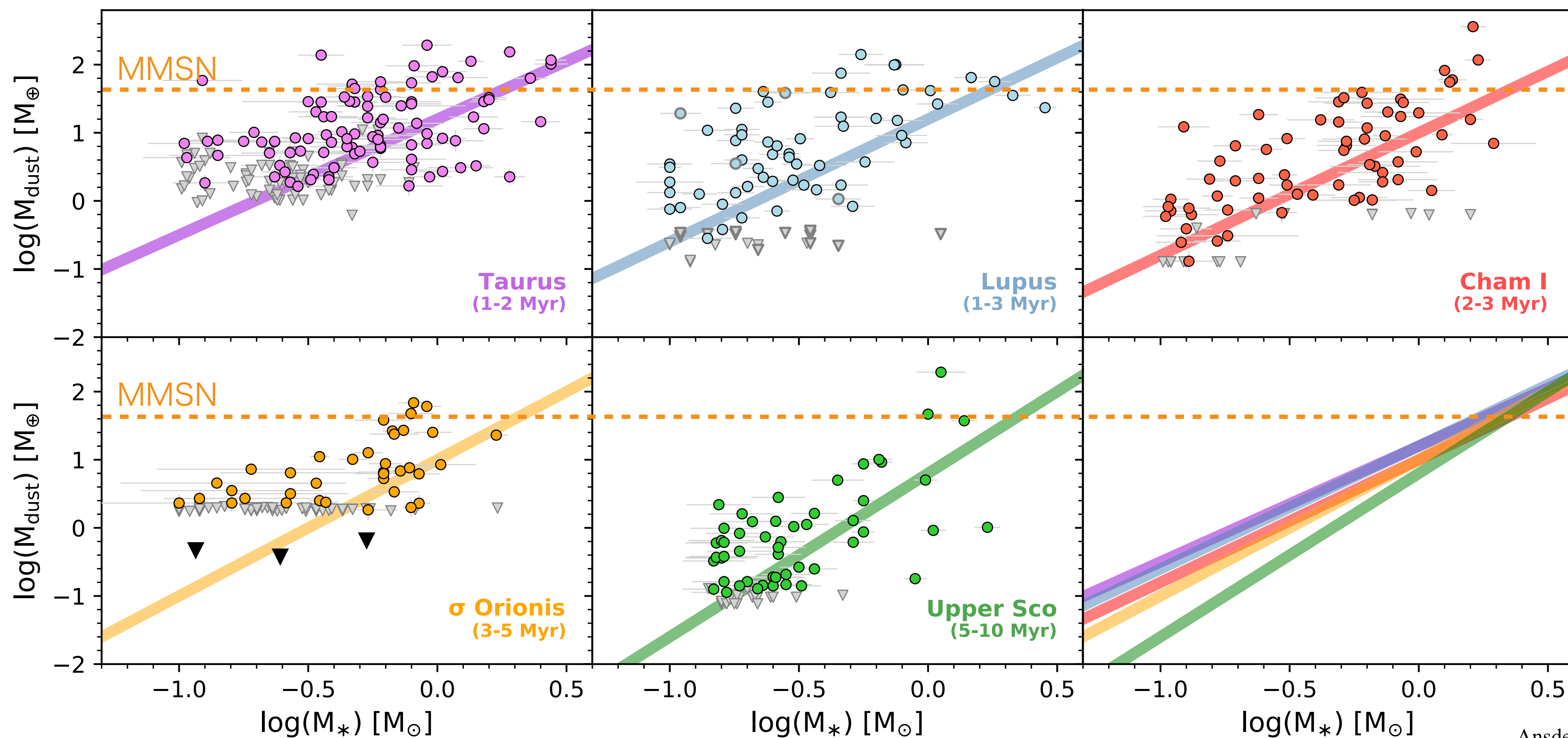
# ペブル集積による巨大惑星の形成

ペブル移動・集積を取り入れたモデル計算の例 (*Lambrechts & Johansen 2014, Astron. Astrophys.*)



- すでに微惑星が形成している
  - 遠方から十分なペブルが供給される
- という条件を満たせば、  
円盤ガス散逸前に臨界コア質量( $\sim 10 M_{\oplus}$ )まで成長

# 電波観測による円盤ダスト質量の見積もり

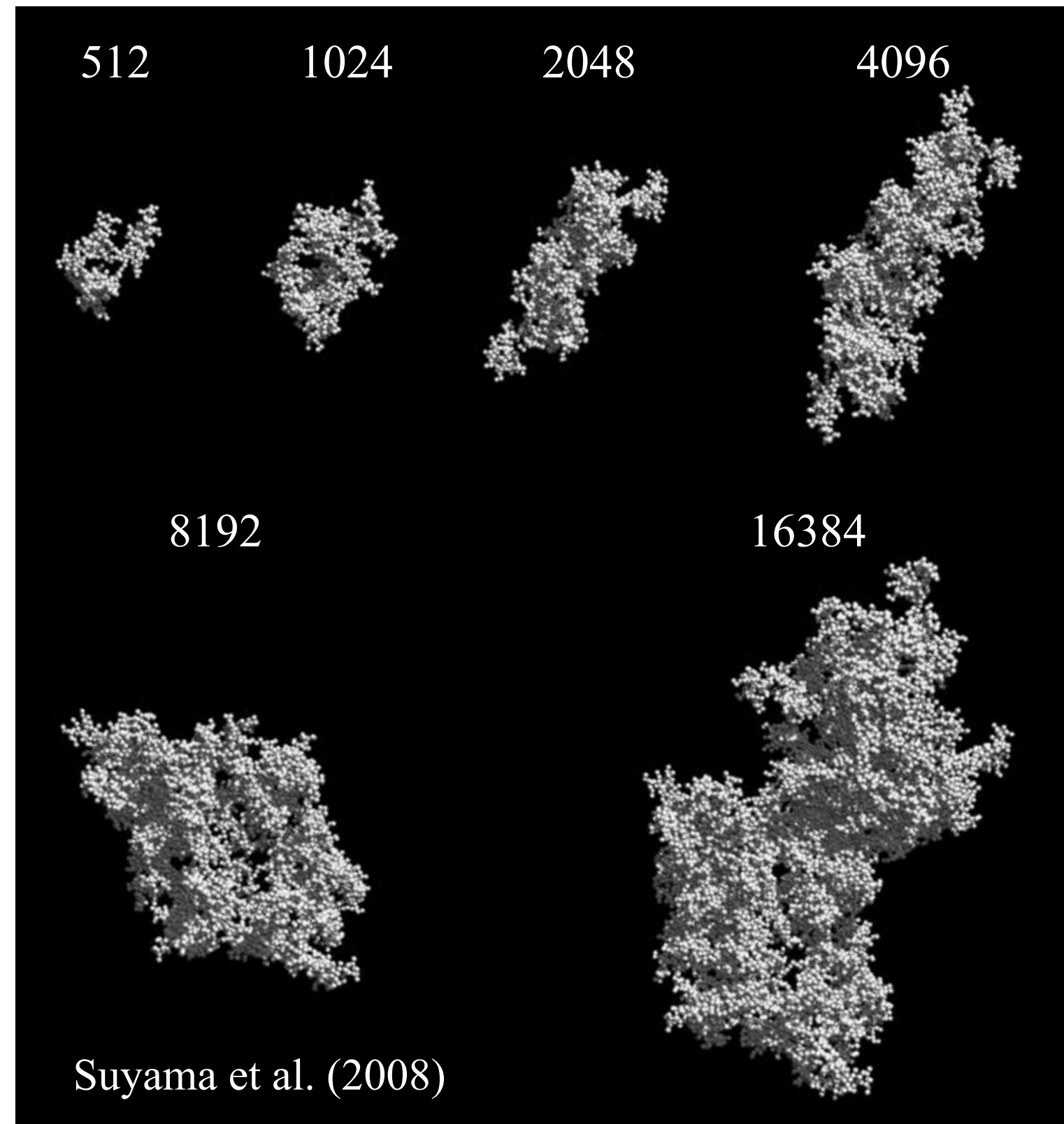


Ansdell et al. (2017) *Astron. J.*

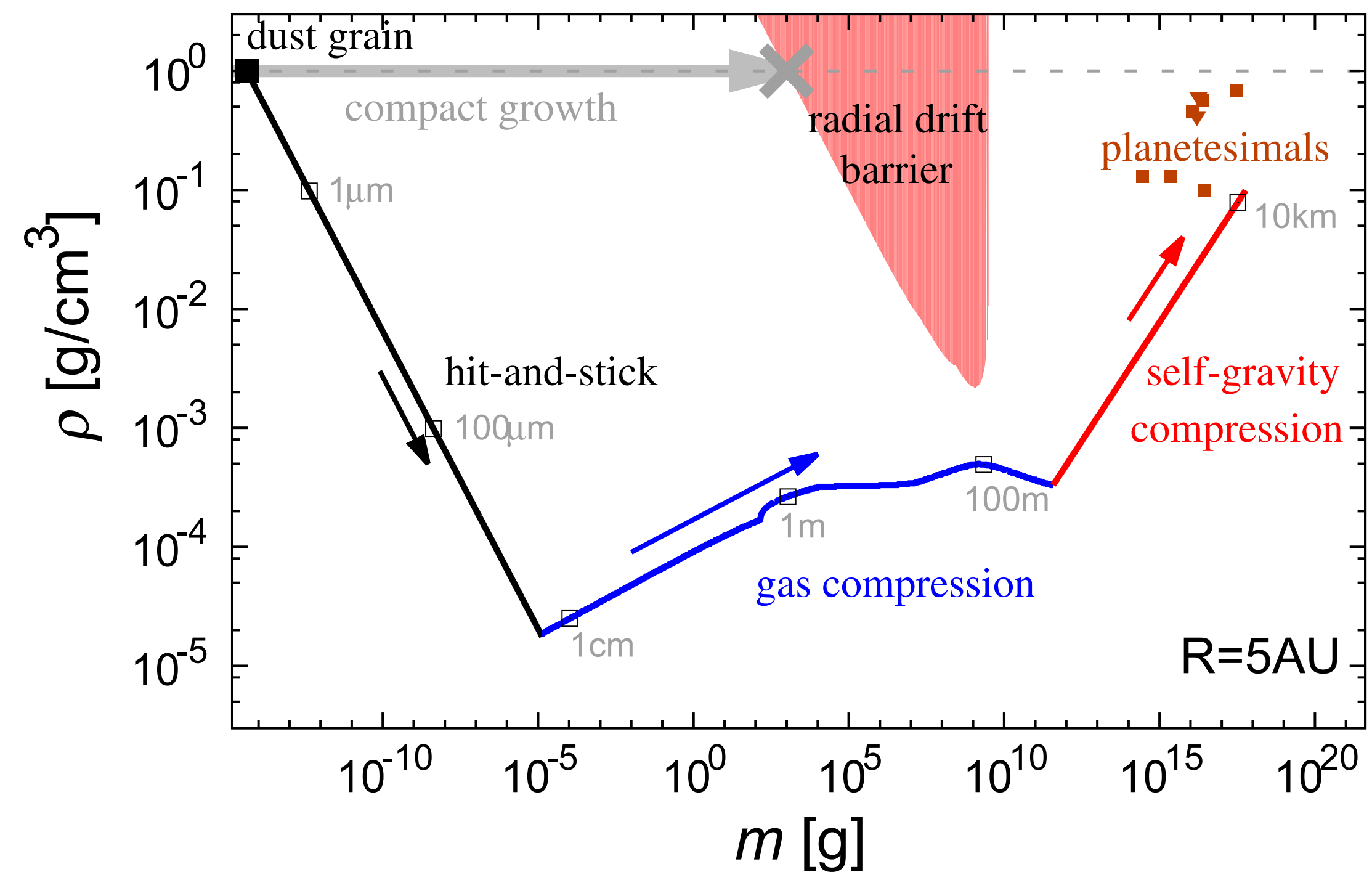
最小質量円盤 ( $\approx 40M_{\oplus}$ ) を下回るものが多い & 年齢とともにダスト質量が減少  
 → ダスト落下? 惑星形成? ( $\because$  円盤内の惑星は“見えない”)

# 微惑星形成：直接合体成長

- 普通に考えると(コンパクトなダストだと), ダスト落下の壁を超えられない
- “ふわふわダスト”(低密度アグリゲイト)なら落下前に成長できる (Okuzumi et al. 2012; Kataoka et al. 2013)
  - ガス抵抗則の特性によって, 低密度アグリゲイトの  $\tau_p$  は成長に伴い急激に増加

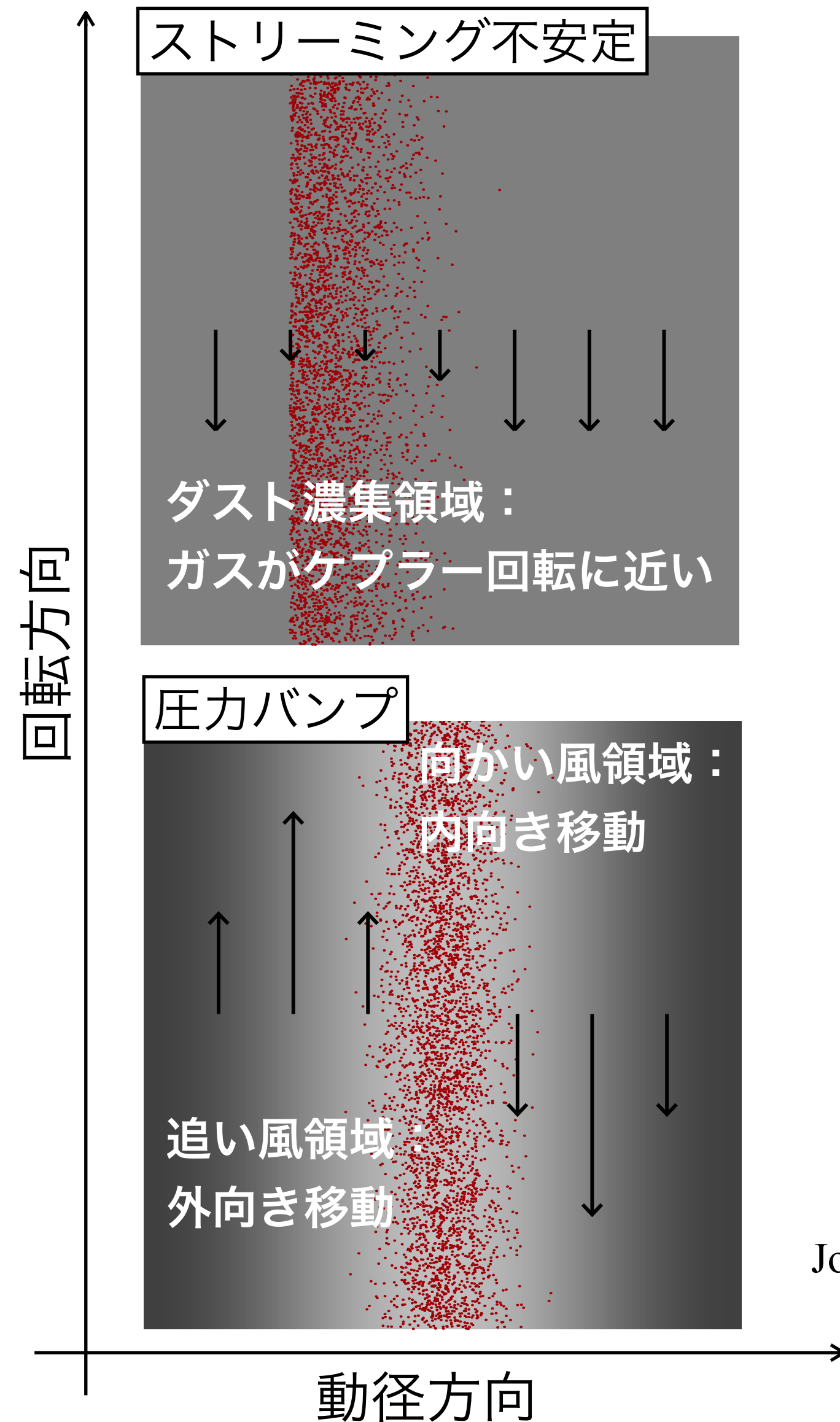


低密度アグリゲイトの質量-密度進化パス (Kataoka et al. 2013)



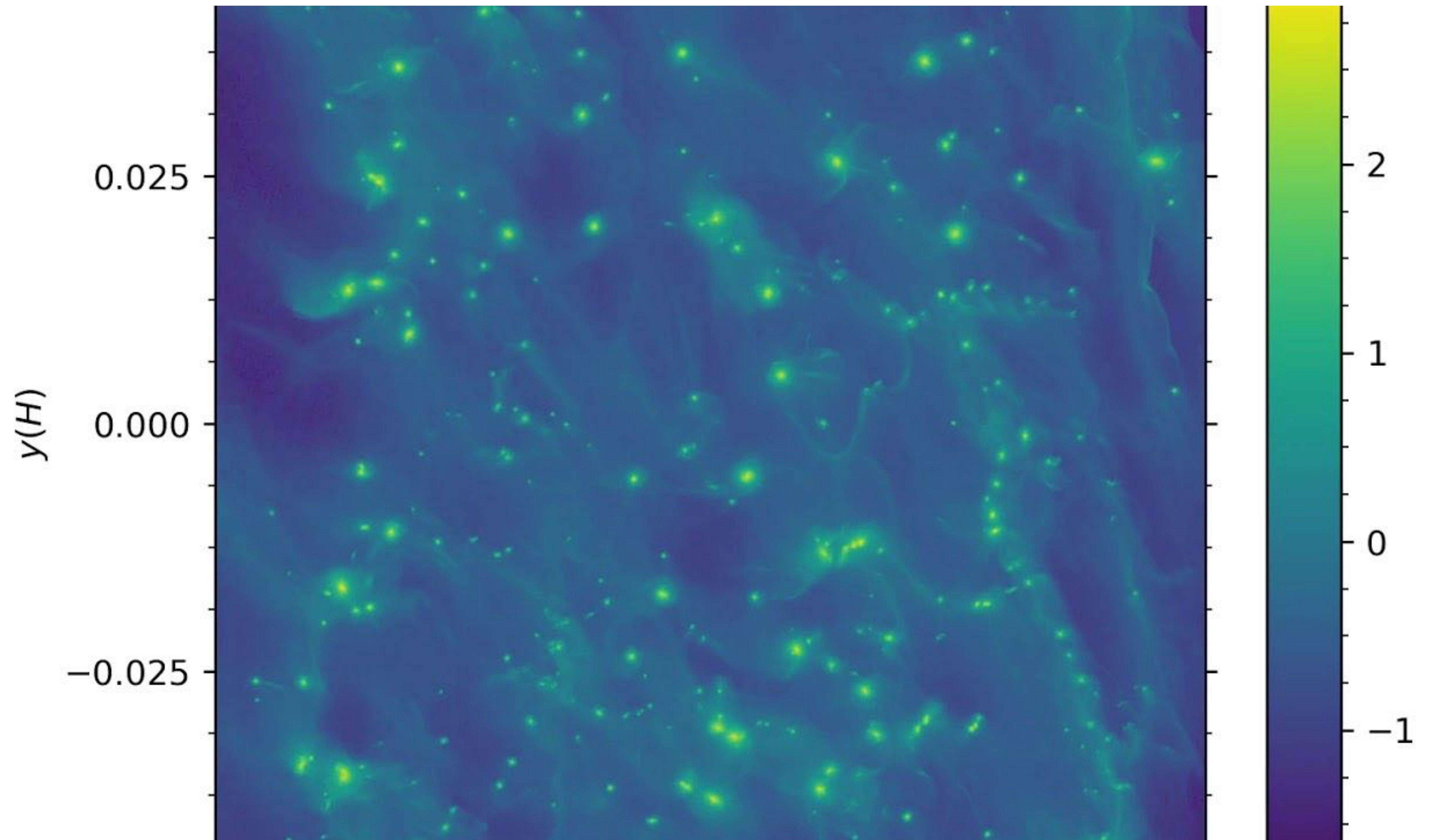


# 微惑星形成：ダスト濃集



- 古典的モデル：鉛直方向に薄いダスト層の形成  
× 円盤中の乱流によって十分にダスト層が薄くならない
- ストリーミング不安定 (e.g., Youdin & Goodman 2005; Johansen et al. 2009)
  - 落下するダスト密度の濃淡が成長
  - ダストが多い場所  $\rightarrow \eta$  小  
 $\rightarrow$  落下が緩やかになる  $\rightarrow$  ダストが集まる澱みになる
- 圧力バンプへの濃集 (e.g., Whipple 1972; Haghighipour & Boss 2003; Taki et al. 2016)
  - 動径方向に対しガスの圧力に極大値があると、  
局所的に  $\eta = 0$  となり、ダストが濃集

Johansen et al. (2014) in *Protostars and Planets VI*





# 惑星移動

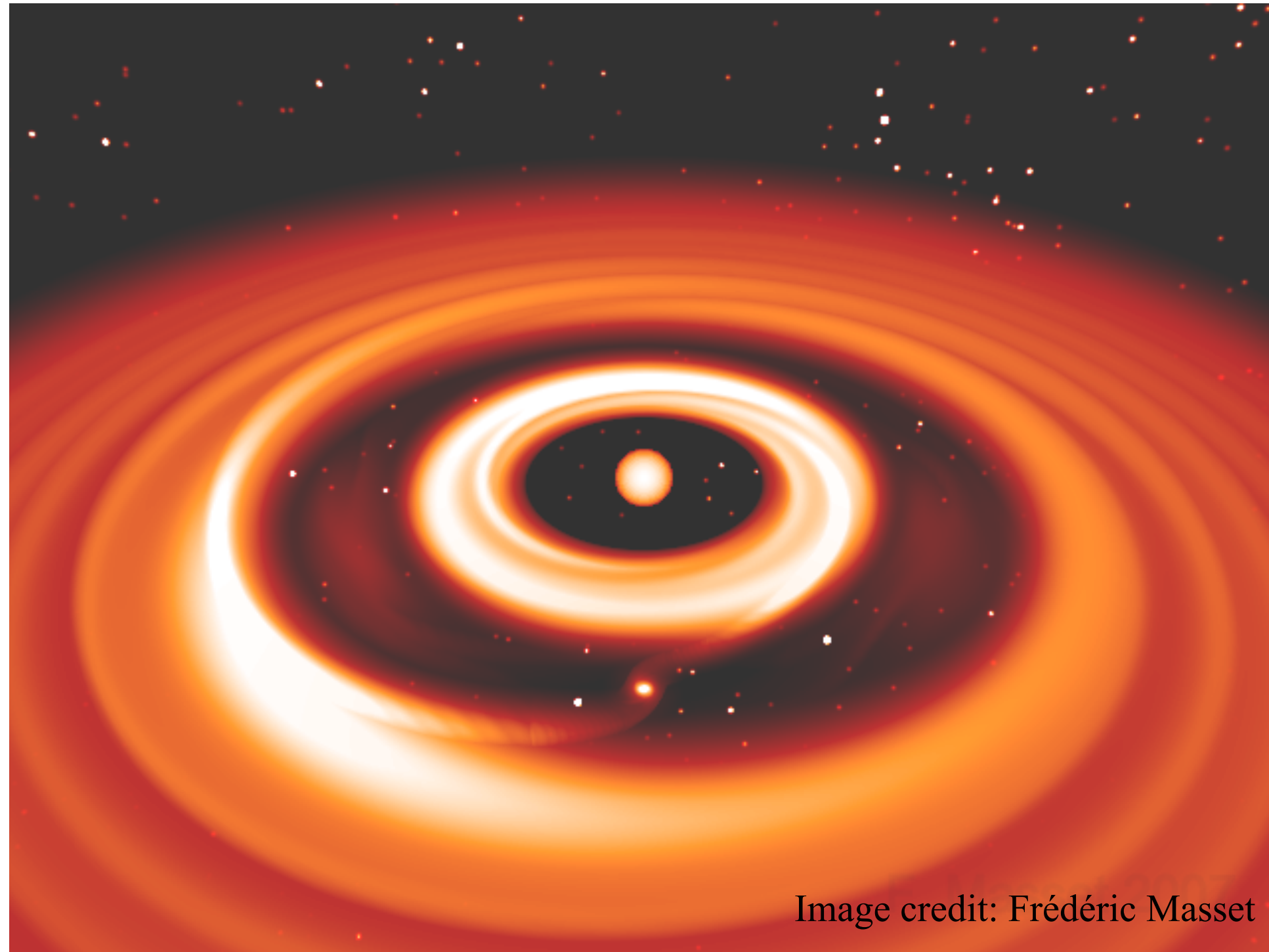


Image credit: Frédéric Masset

惑星が円盤につくる波のシミュレーション

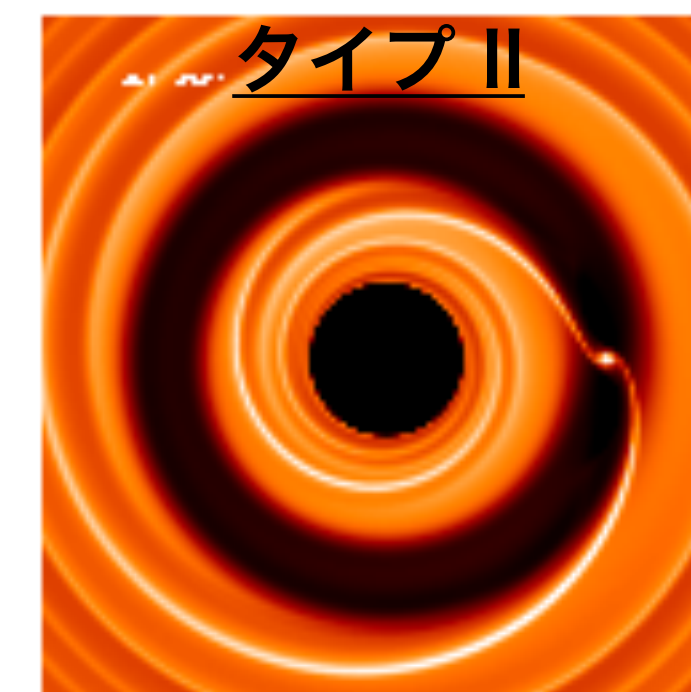
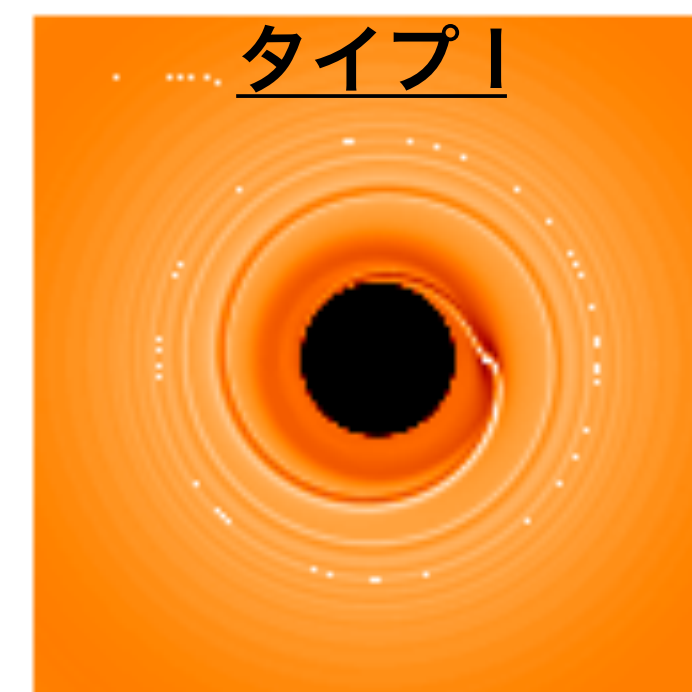
<https://www.youtube.com/watch?v=ko52m9jJGTQ>

## タイプI 惑星移動

- 原始惑星は円盤ガスに密度波をたてる
- 密度波から受ける重力によって惑星はトルクを受ける
- 移動方向は多くの場合内向き
- 1 au,  $1 M_{\oplus}$  の惑星の移動時間  $\sim 10^5$  年  $\ll$  円盤寿命
- 惑星質量に比例して早くなる

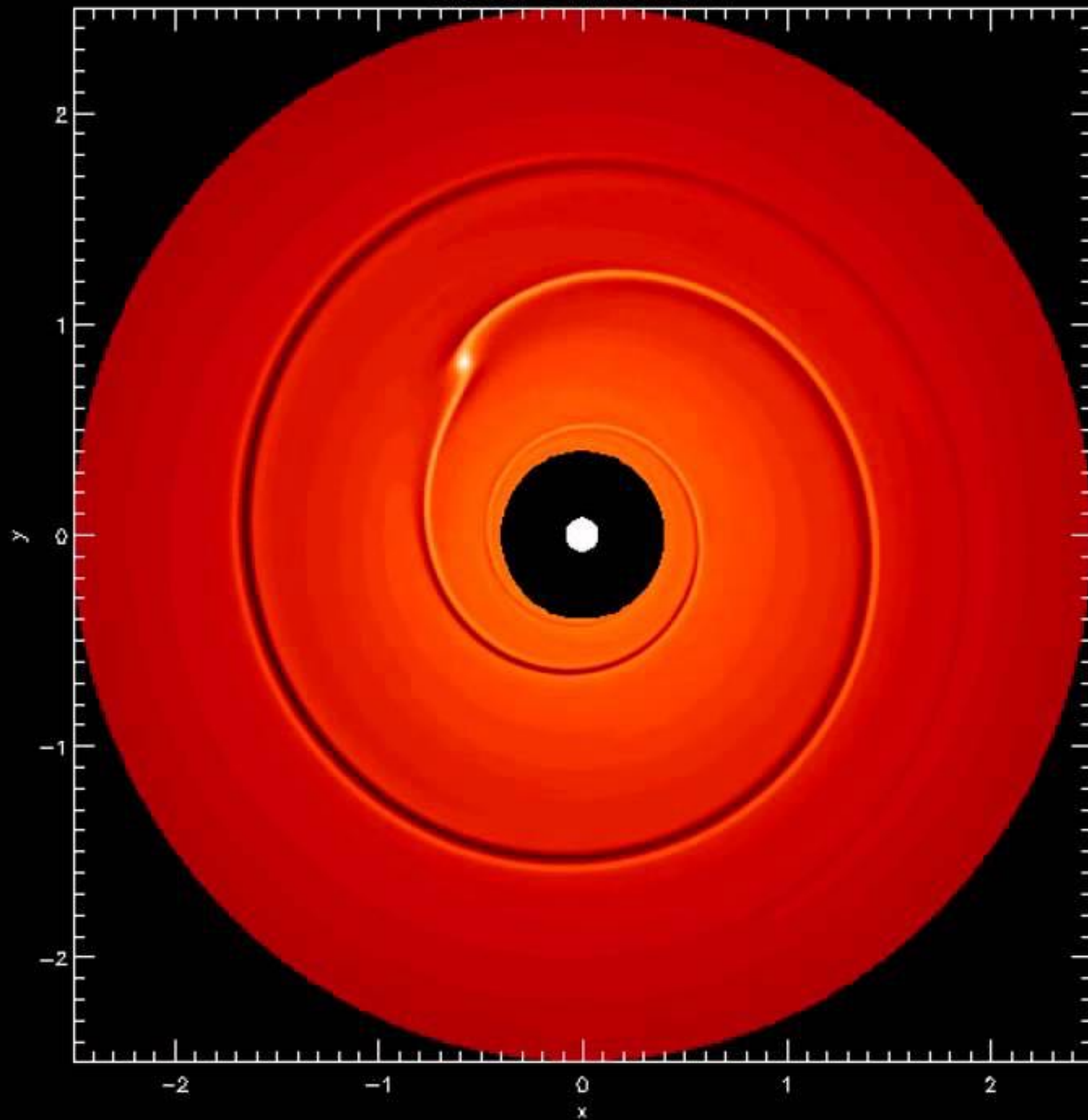
## タイプII 惑星移動

- $R_H \sim H$  に達した惑星はガス円盤に溝をつくる
- ガス円盤の粘性降着にともなって溝ごと惑星が移動

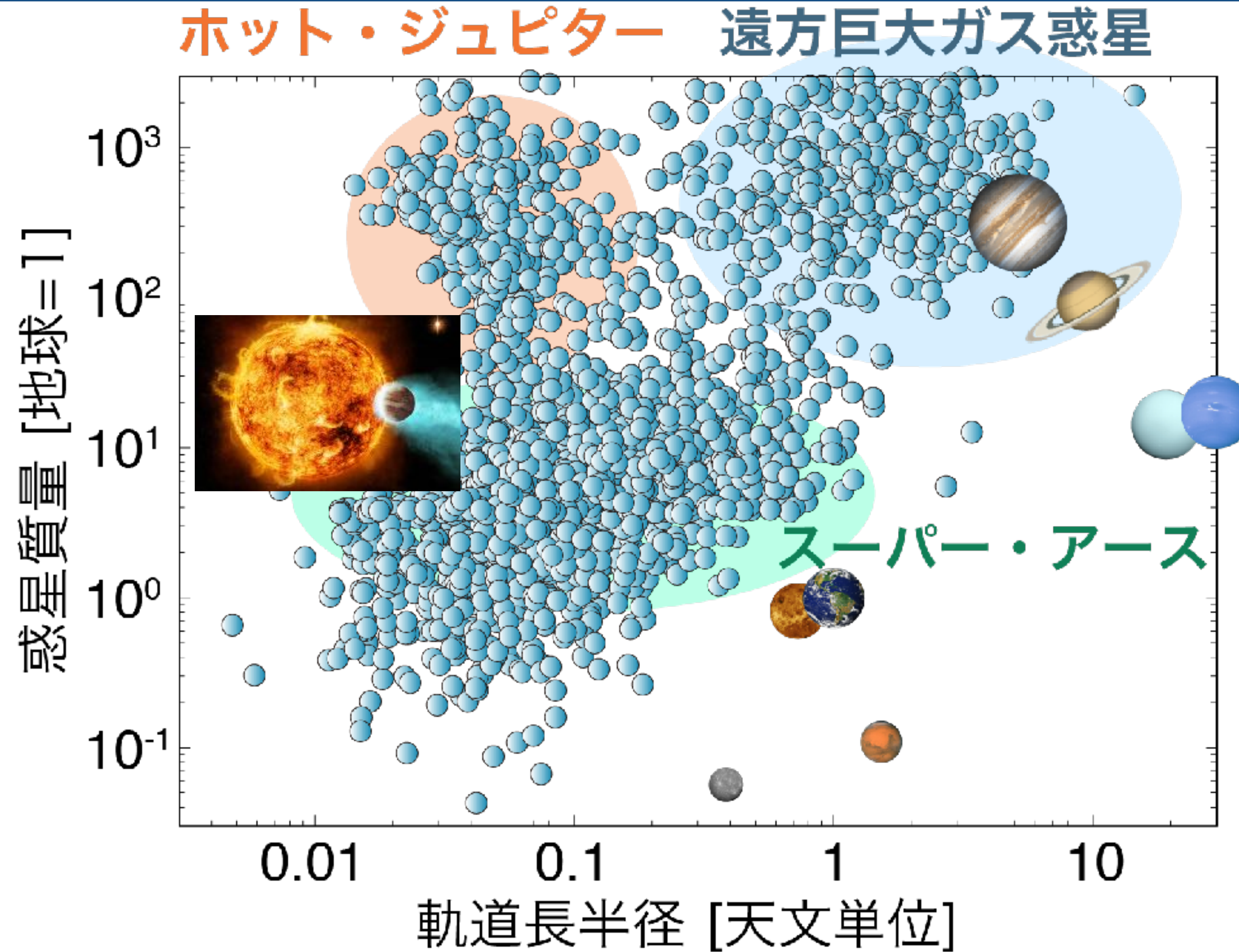




EMBEDDED PROTOPLANET



# 恒星近傍を公転する系外惑星

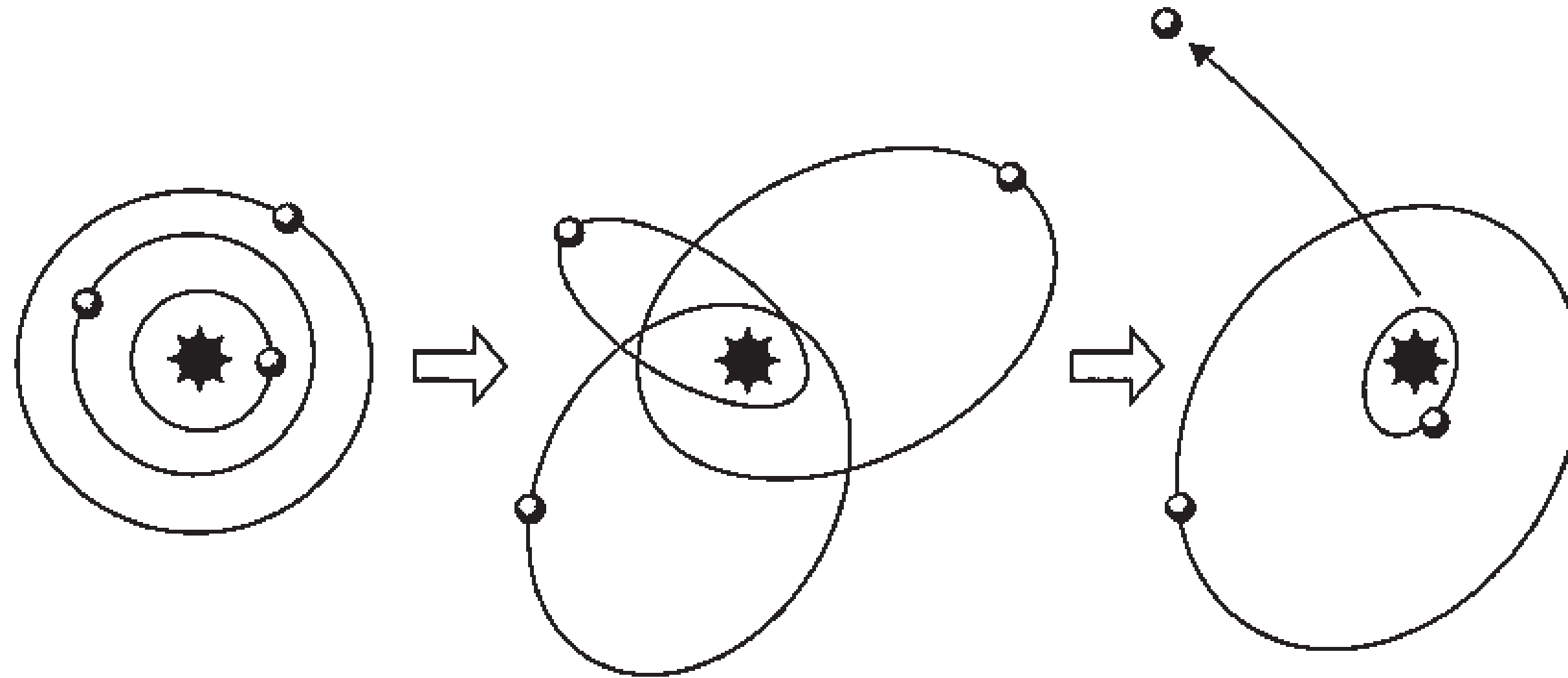


標準シナリオでは恒星近傍で巨大ガス惑星はできない → 惑星移動の証拠？



# 惑星同士の重力散乱

## 重力散乱による短周期惑星の形成



渡部他 編 日本評論社『太陽系と惑星』

浮遊惑星の想像図



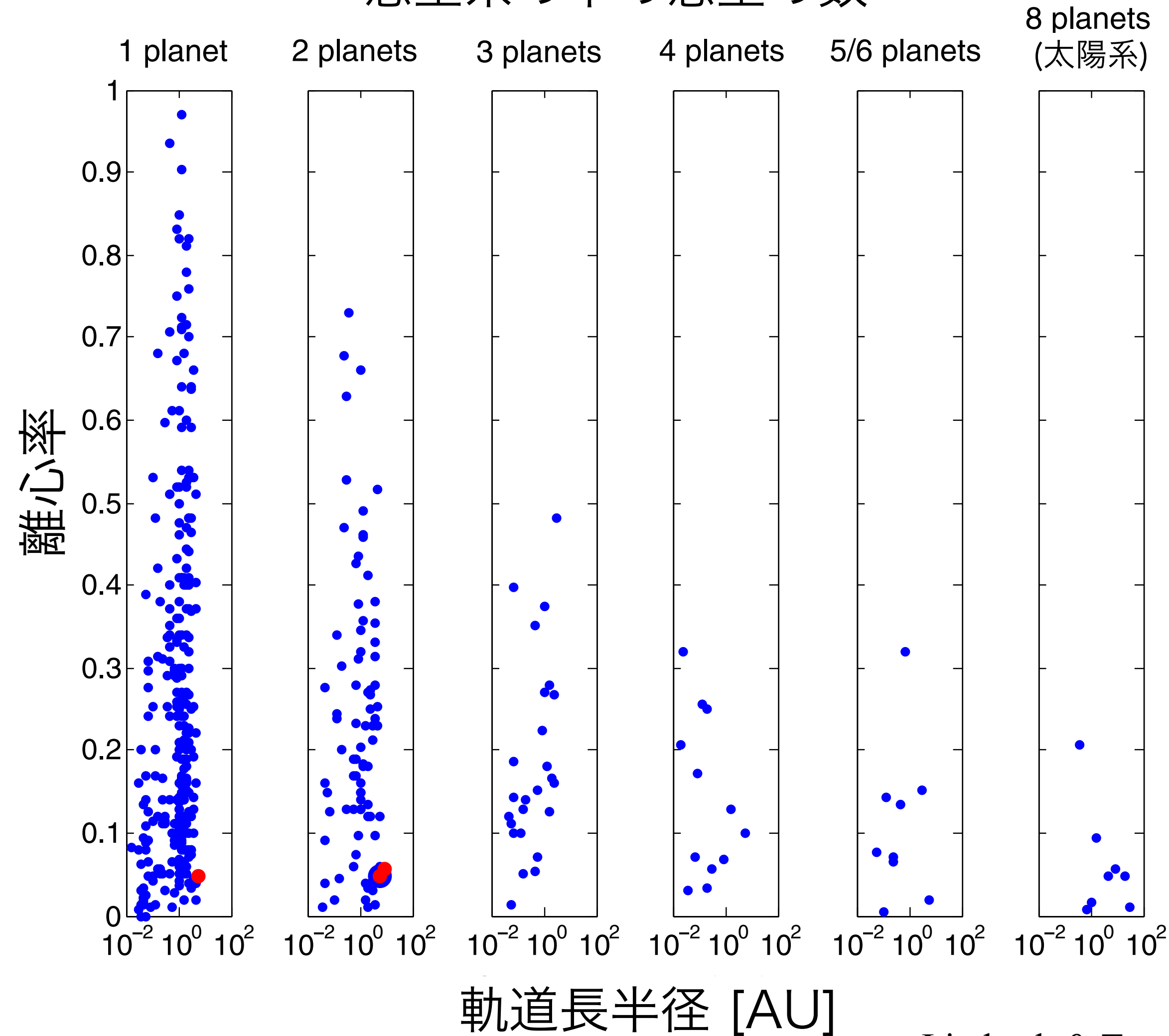
Image credit: NASA/JPL-Caltech

- 円盤の中で誕生した惑星は離心率が小さい
- 円盤ガス消失後、複数の惑星の軌道交差が起きうる  
→ 離心率の大きい惑星、浮遊惑星の形成



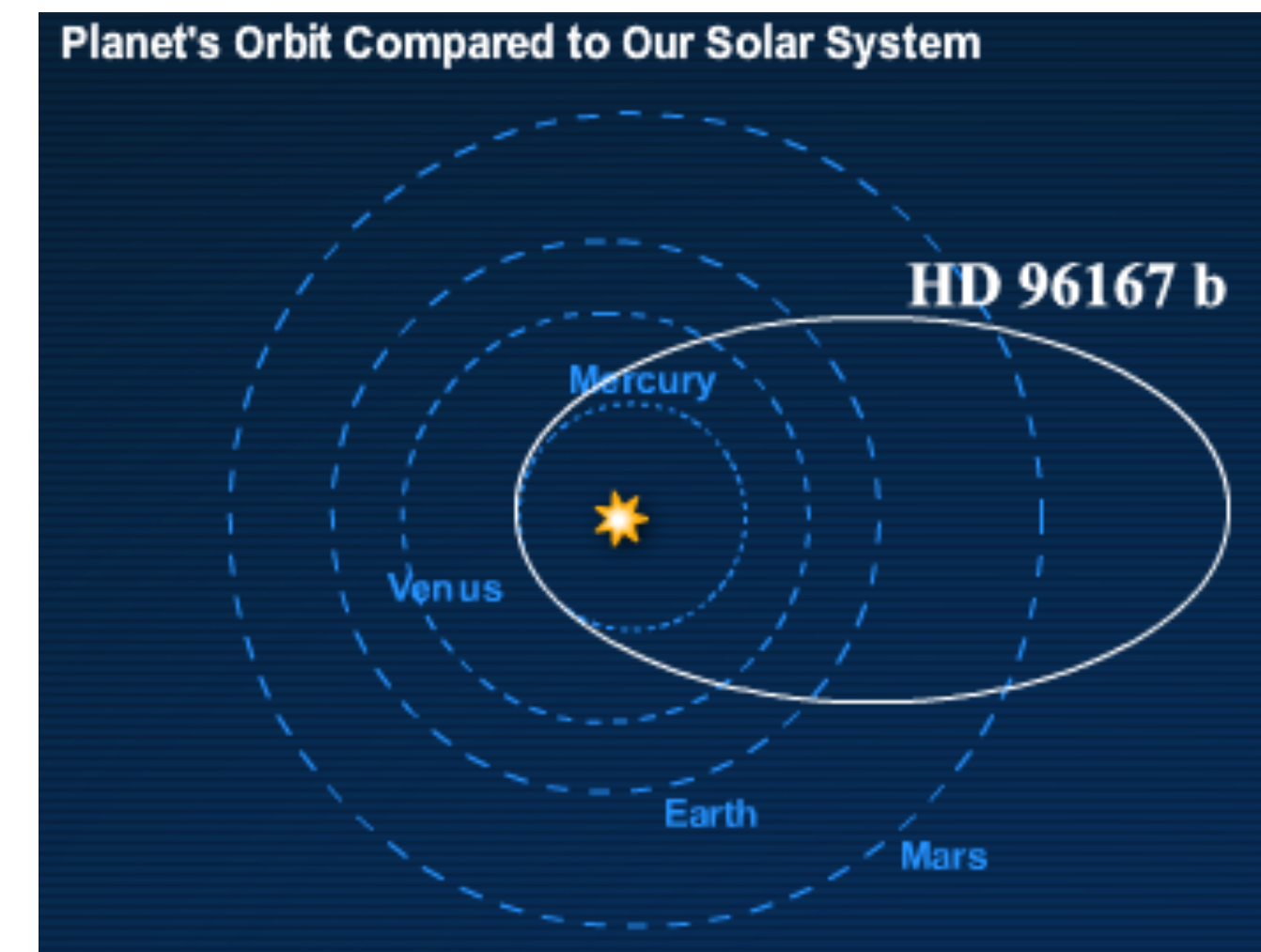
# 系外惑星の離心率

惑星系の中の惑星の数 →



- 系外惑星の離心率は様々
- 惑星数が多いほど離心率小

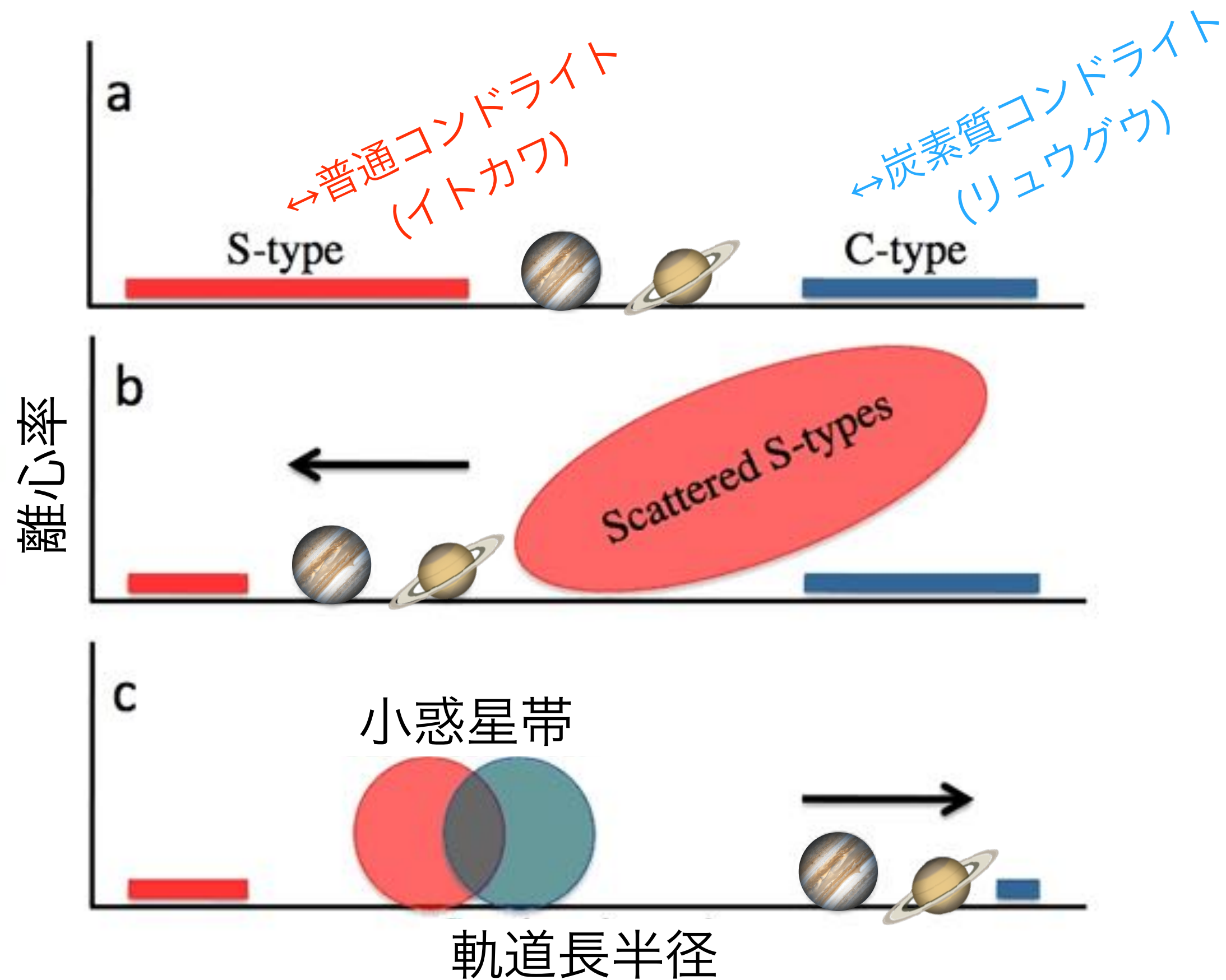
巨大ガス惑星HD96167bの軌道 ( $e = 0.71$ )



赤：太陽系の木星・土星

Limbach & Turner (2014) *PNAS*

# 初期太陽系の惑星移動仮説



グランド・タック・モデル (e.g., Walsh et al. 2012)

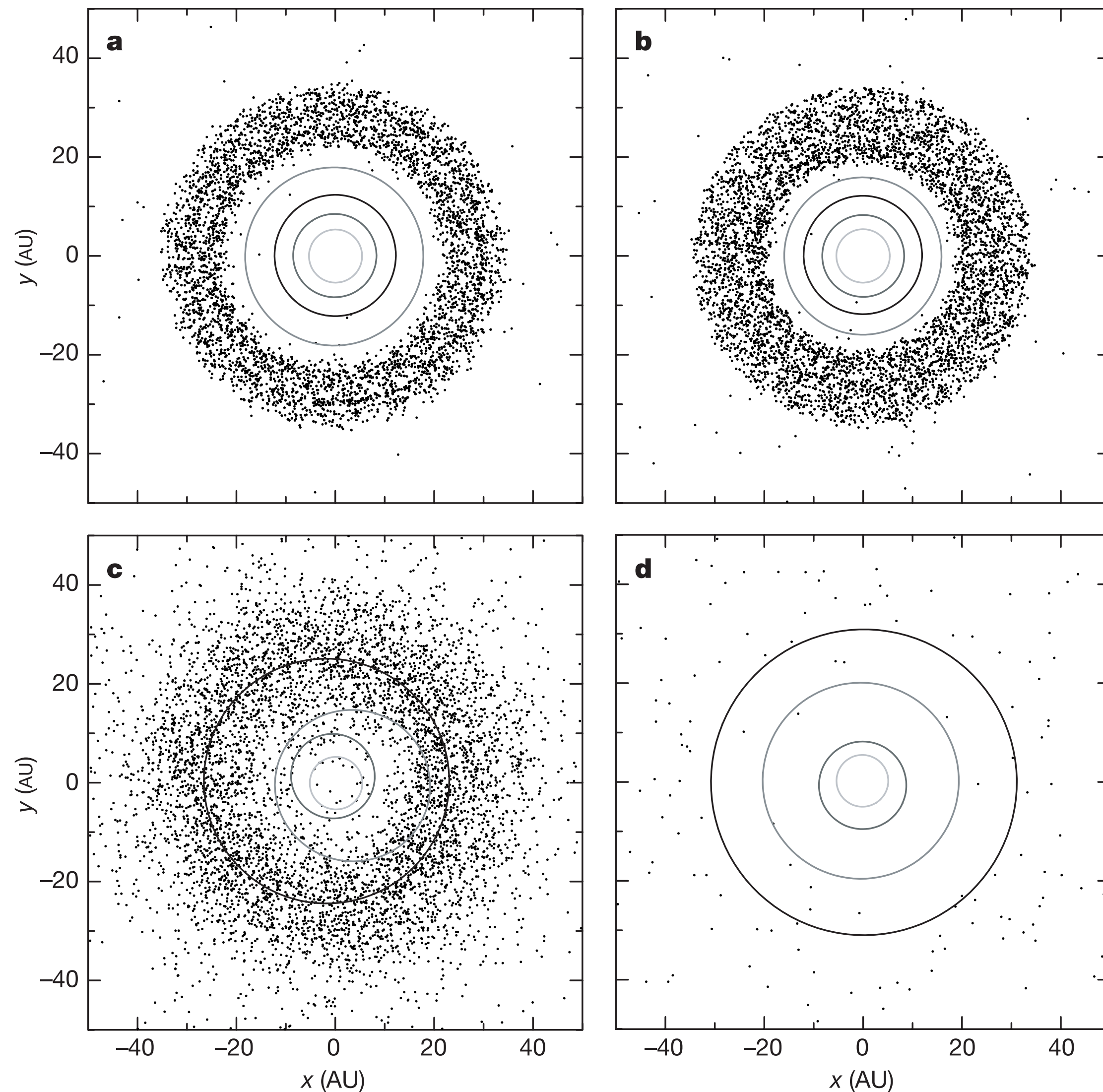
形成期の木星と土星が内向きに移動し、  
火星軌道付近で外向きに引き返したという仮説

→ 太陽系の特徴を説明

- ・ 比較的小さな火星
- ・ 混在する小惑星

Image credit: Kevin Walsh

# 初期太陽系の惑星移動仮説



## ニース・モデル (e.g., Gomes et al. 2005)

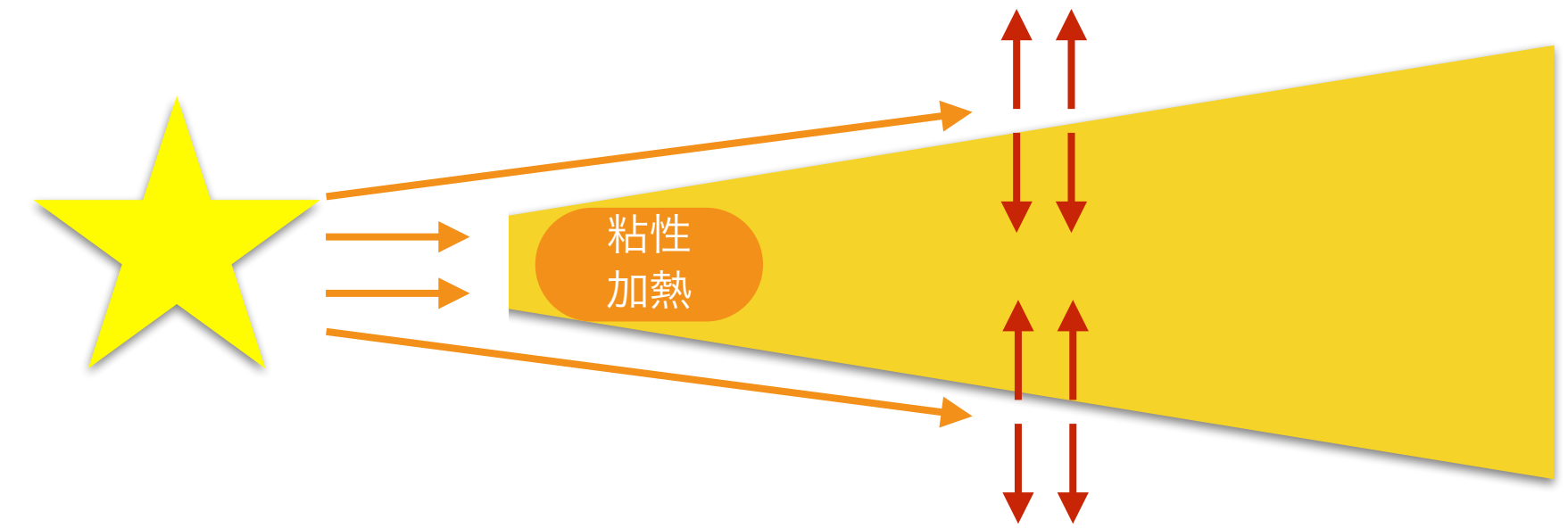
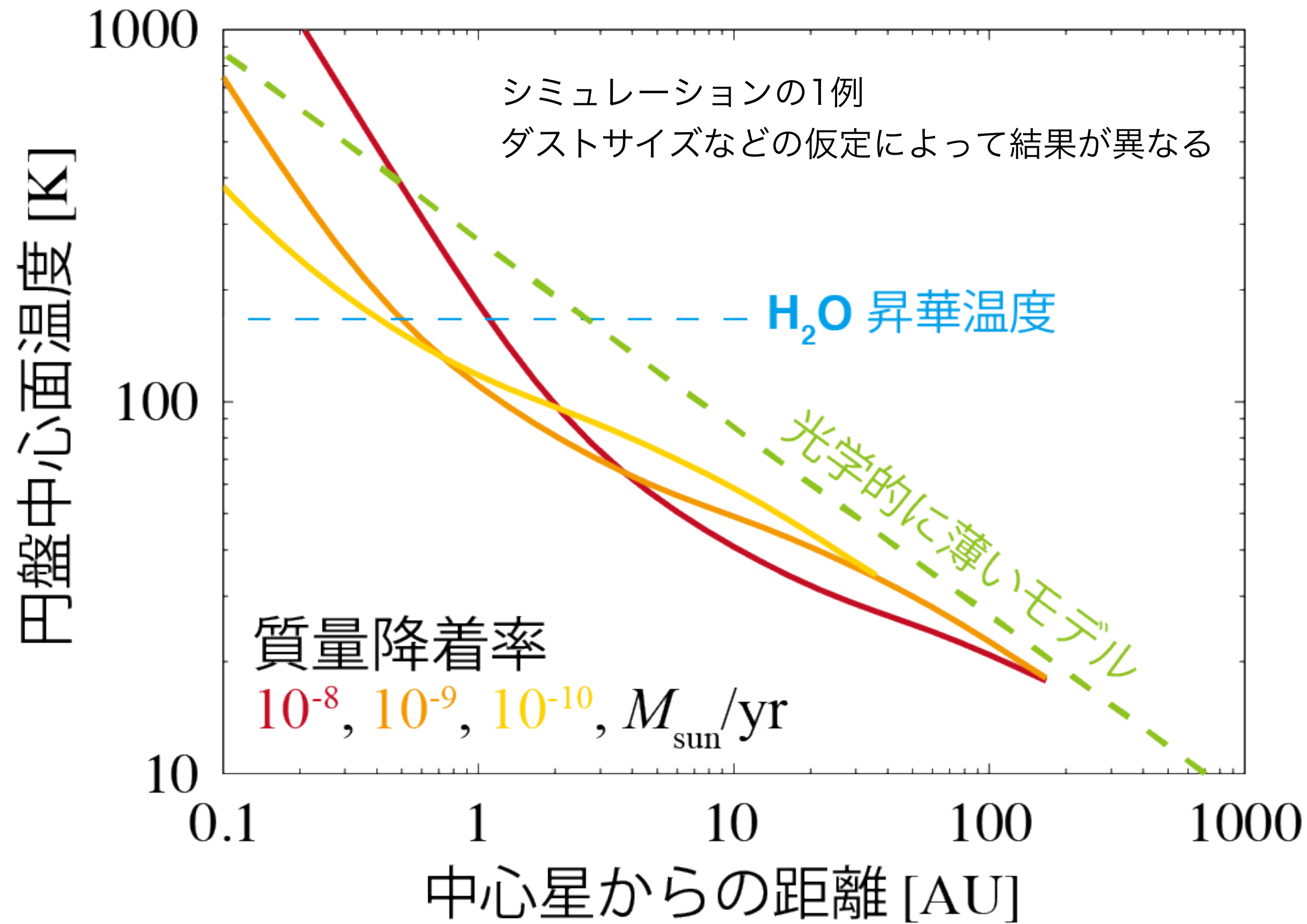
- 原始惑星系円盤散逸後のある時期(~数億年後)に, 巨大惑星同士の相互作用で軌道が変化したという仮説
- 後期天体重爆撃(5章)など, 太陽系の特徴・イベントを説明
- グランド・タックより後 (数百万~数億年後)

ニース・モデルの提案する巨大惑星(円)と小天体(点)の軌道進化時系列は a, b, c, d (Gomes et al. 2005)

<https://www.youtube.com/watch?v=VXeOh3xmrQM>



# 現実的な円盤の温度 (光学的に厚い円盤)

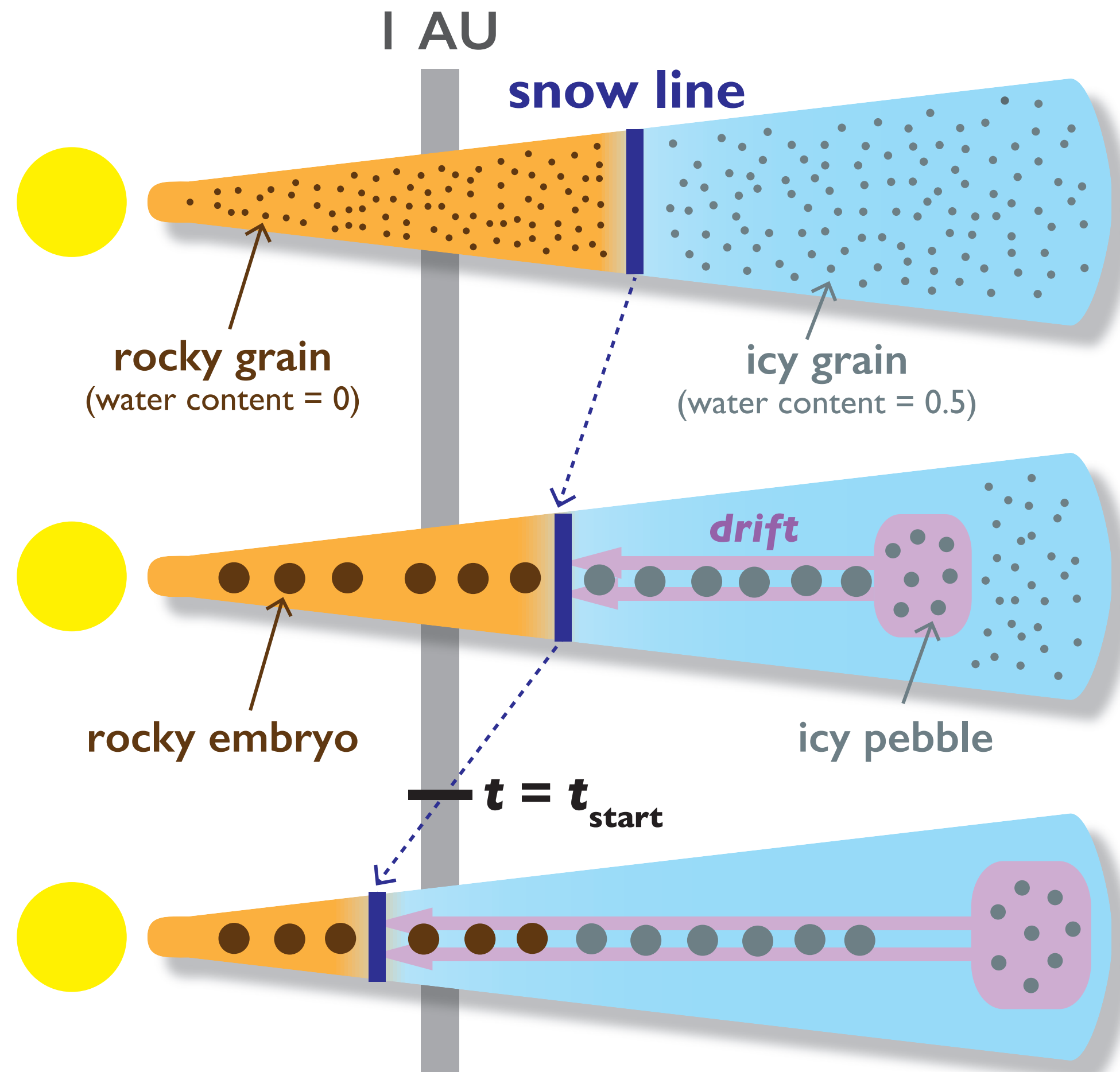


- 中心星の光は円盤内部に届かず、表面で吸収・再放射された光のみ寄与 → 光学的に薄いモデルより低温
- 中心星に近い領域のみ粘性加熱が効く
- 時間とともに質量降着率低下 → 低温
  - スノーライン < 1 au となる
  - 地球の水量問題 (Sato et al. 2016, *Astron. Astrophys.*)

Oka et al. (2011) *Astrophys. J.* を改変

# 地球の水量問題

円盤の温度進化を考慮したペブル集積の概念図



- H<sub>2</sub>Oスノーラインが岩石惑星の軌道領域まで移動  
→ “地球はなぜ水が少ないのか？”という新たな問題
- 例) 岩石惑星に氷を含んだペブルが大量に集積  
→ 氷惑星になってしまう (Sato et al. 2016)
- 解決策
  - 木星が早期に形成し、氷ペブルをせき止めた？ (Morbidelli et al. 2016)
  - 太陽系は小さい円盤から形成？ (Ida et al. 2019)

Sato et al. (2016) *Astron. Astrophys.*

# まとめ

---

- ガスとダストの回転速度差 → ダストの落下.  $\sim$  cm サイズを超えて成長できない
- ペブル集積モデル：落下してくるペブル( $\sim$  cm サイズのダスト)が集積して微惑星が急成長  
→ 巨大ガス惑星の成長時間の問題を解決
- 微惑星形成：低密度アグリゲイト合体成長, ダスト濃集(圧力バンプ, ストリーミング不安定)
- 惑星移動：自らが立てた密度波からのトルク(タイプ I), 溝と一緒に移動 (タイプ II)
- 太陽系の惑星移動モデル：小さい火星のサイズや小惑星帯の特徴を再現可能?
- 現実的な円盤温度： $\text{H}_2\text{O}$ スノーライン  $< 1$  au → 地球はなぜ水が少ない?



# レポート課題 (7/1 17時 締切)

分子雲コアから恒星が形成

・ **重力**  $F_G \sim \frac{GM}{R^2}$  — (1)

・ **遠心力**  $F_{\text{centr}} \sim R\Omega^2 \sim \frac{L^2}{R^3}$  — (2)

角運動量 :  $L \sim R^2\Omega = R_0^2\Omega_0$  — (3)

角運動量の保存からある半径  $R_{\text{centr}}$  で力が釣り合う

観測的に求められている分子雲コアの典型的な物理量 (半径  $R_0 \sim 0.1$  pc , 回転速度  $R_0\Omega_0 \sim 10^{-2}$  km/s) を用いて, 円盤の半径  $R_{\text{centr}}$  を au単位で見積もれ(有効数字1桁). ただし, 原始星は太陽質量  $2 \times 10^{30}$  kgとする. 1 pcは約  $2 \times 10^5$  au である.

