

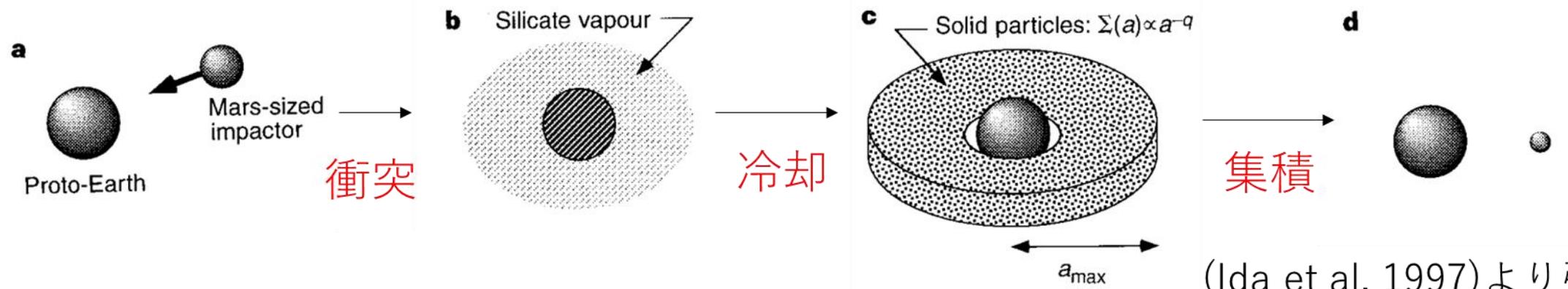
月降着過程における 角運動量輸送の解像度依存性 について

神戸大学(M2)

吉村 洋一

研究背景：月形成理論

• ジャイアントインパクト仮説



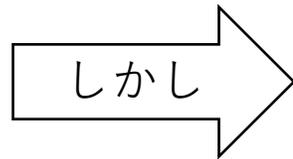
- 月の鉄含有率が低い
- 地球と月の酸素同位体比が非常によく似ているなど、現在の月の特徴をうまく説明できる。

研究背景：集積過程

- N体シミュレーションによって検討されてきた。

Kokubo et al. (2000)

10^4 個の粒子で原始月円盤をモデル化し、約1か月で月ができることが分かった。



月が形成する段階では粒子は10kmサイズであったと考えられており、これは約 10^7 個の粒子を使用したシミュレーションに相当する。

Sasaki & Hosono (2018)

$10^4 \sim 10^7$ 個の粒子で原始月円盤をモデル化し、粒子数依存性を調べた。

Yamaoka (修論)

粒子数による構造の違いが、粘性不安定性によって生じることを明らかにした。

研究背景：Sasaki & Hosono (2018)

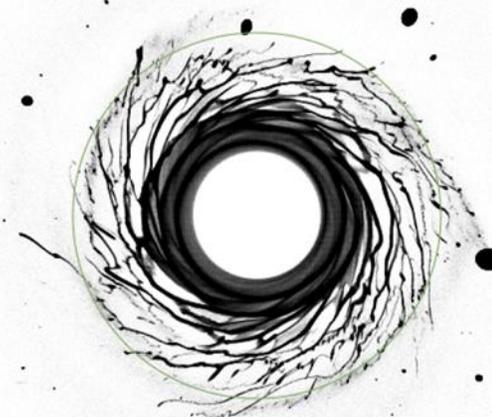
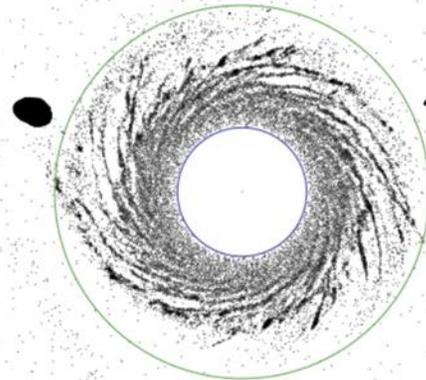
- 集積過程の粒子数依存性を調べるために、粒子数を $10^4 \sim 10^7$ 個で変化させてシミュレーションを行った。
 - ▶ 粒子数の多いシミュレーションでは、渦巻腕が互いにつながり複雑な構造を形成している。

$t=40T_K$

10^5 粒子

$t=40T_K$

10^7 粒子



研究背景：Sasaki & Hosono (2018)

- 粒子数の少ないシミュレーション
 - 序盤に急成長
 - 現在の月質量の半分程度になる
- 粒子数の多いシミュレーション
 - ゆっくりと成長
 - 現在の月質量の30%程度になる

粒子数により月形成過程に変化が生じる。

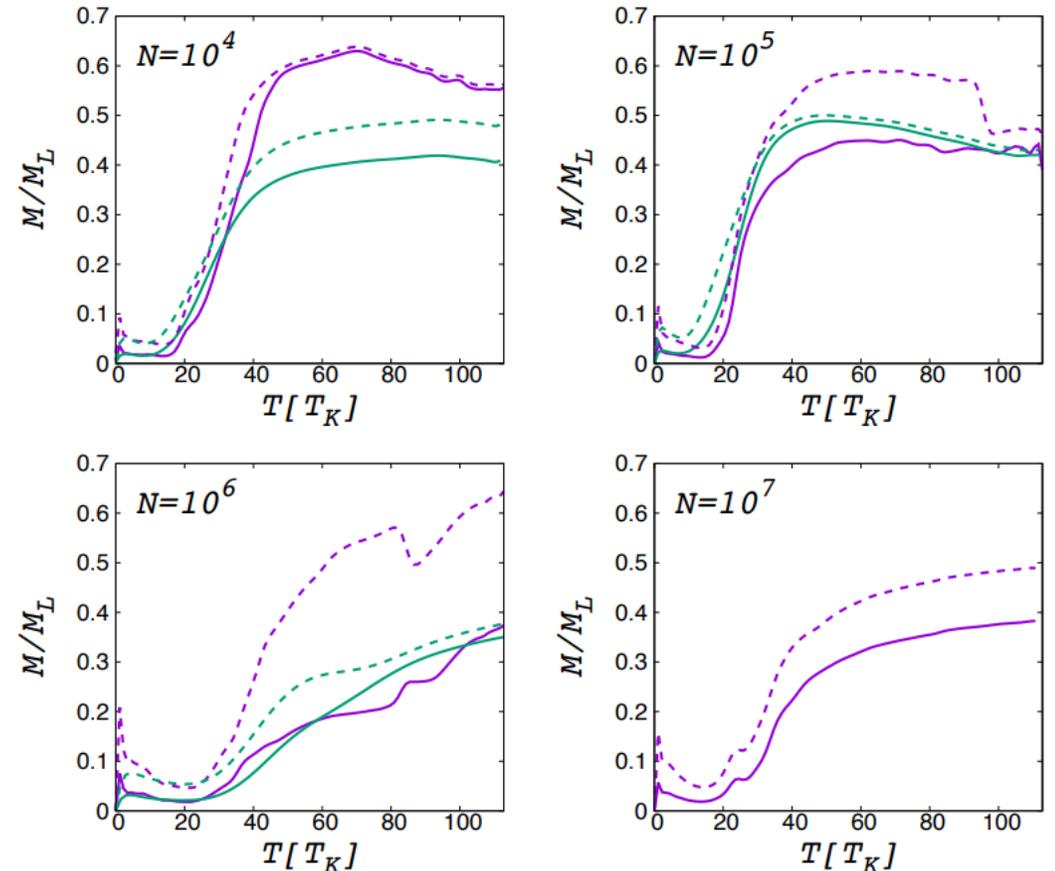
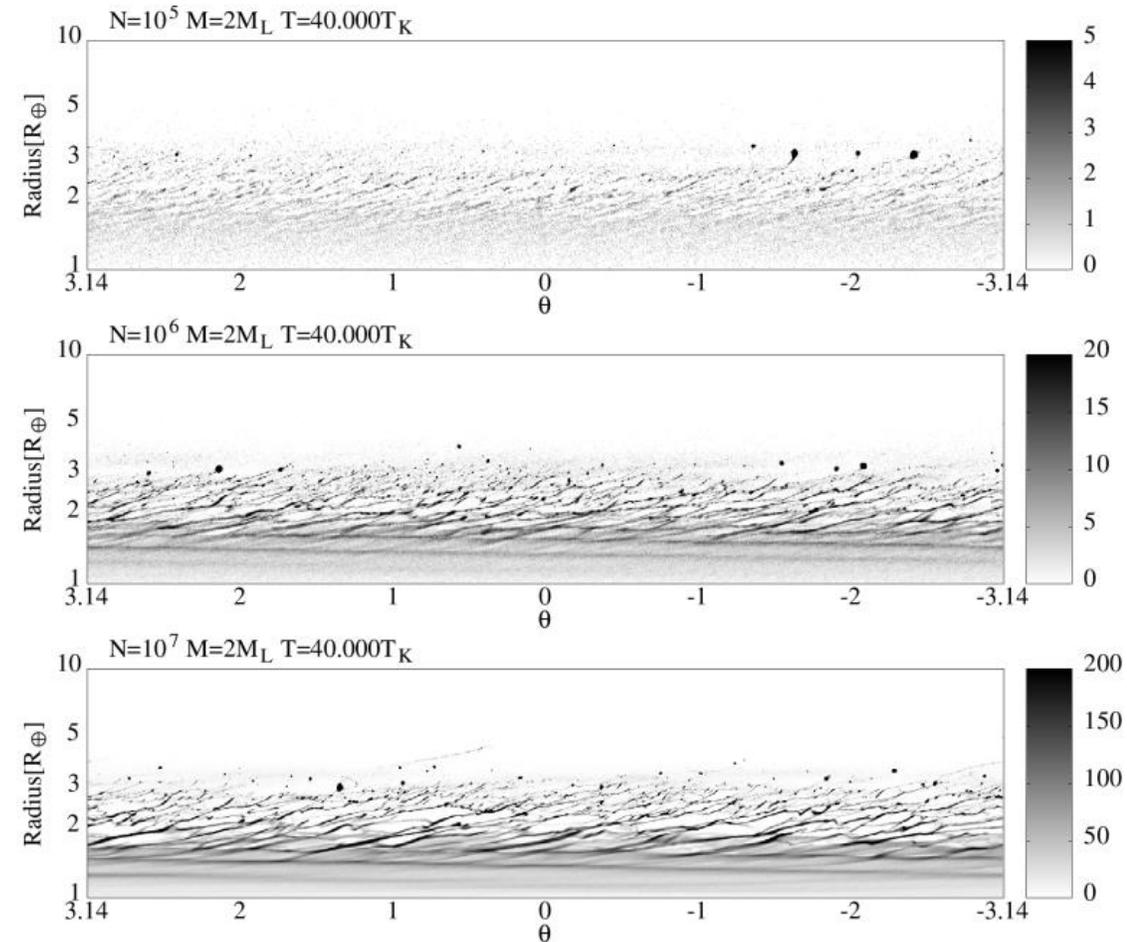


図. 質量の時間変化
最大の塊(実線)と大きい塊3つの和(点線)

研究背景：Yamaoka (修論)

- Sasaki & Hosono (2018)と同様のシミュレーションを行い、粒子数の多いシミュレーションの内側領域にリーディングスパイラルができることを明らかにした。
- 土星リングとの比較により、この構造は粘性不安定性によって生じると考えられる。
- この構造により、内側領域での角運動量輸送が障害され円盤進化に影響を与えたと考えられる。



研究の目的

- 高解像度のシミュレーションで、それまで見られなかった構造が見えるようになった。
 - 渦巻腕、質量成長、リーディングスパイラル
- その構造が形成される物理的なメカニズムを明らかにする。

研究手法

- シミュレーションには、牧野先生の開発したnbody-with-centerという惑星リング系シミュレーションコードを用いた。
 - 中心星の周囲を質量が非常に小さい粒子が回転する運動を計算
- 円盤モデルはSasaki & Hosono (2018)と同様のものを用いた。

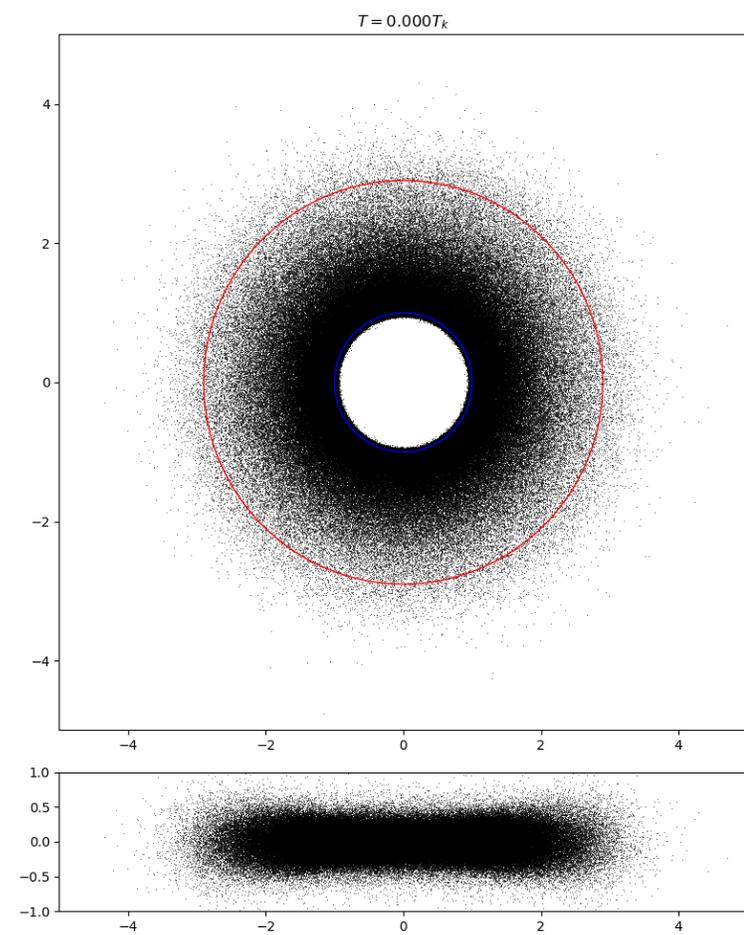
研究手法：月円盤におけるロッシュ限界

- 初期地球の密度 ρ_{\oplus} を現在の地球の密度と同じ 5.5 g/cm^3 に、円盤粒子の密度 ρ_p を現在の月密度と同じ 3.3 g/cm^3 に設定する。
- 中心星重力が支配的となるロッシュ限界半径は以下の式で求められる。

$$R_{Roche} = 2.456 \left(\frac{\rho_p}{\rho_{\oplus}} \right)^{-\frac{1}{3}} R_{\oplus} \simeq 2.9 R_{\oplus}$$

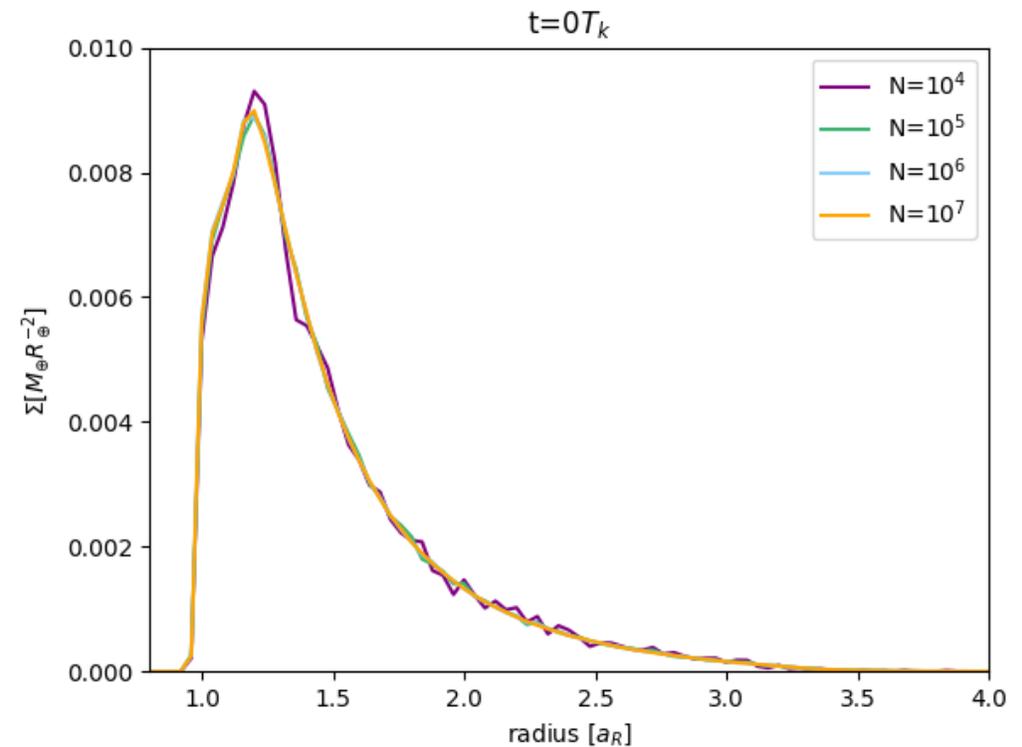
研究手法：月円盤モデル

- 円盤の総質量: $M_{\text{disk}} = 4M_L \simeq 2.94 \times 10^{26} \text{ g}$
- 円盤粒子が等質量のモデル: $m_p = M_{\text{disk}}/N$
- 面密度: $\Sigma \propto a^{-3}$, $R_{\text{in}} = R_{\oplus}$, $R_{\text{out}} = R_{\text{Roche}}$
- 離心率 e , 傾斜角 i : レイリー分布,
 $\langle e^2 \rangle^{1/2} = 0.30$, $\langle i^2 \rangle^{1/2} = 0.15$
- 昇交点赤経 Ω , 近点引数 ω : $[0, 2\pi]$ の一様分布
- 離心近点角 E : 平均近点角 M を $[0, 2\pi]$ の一様分布として,
 $M = E - e \sin E$ で求める。



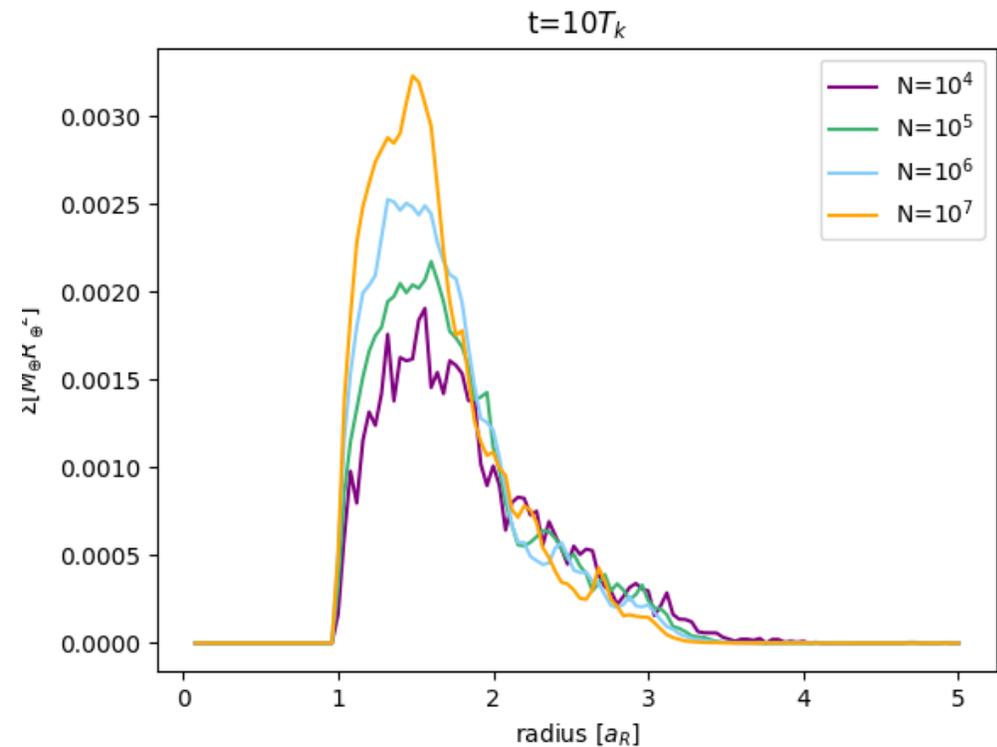
研究結果：面密度分布

- Yamaoka(修論)で分かった、粒子数の多いシミュレーションにて内側領域で質量成長が阻害されることを確認する。
- 初期の面密度分布は粒子数に関わらず同じである。



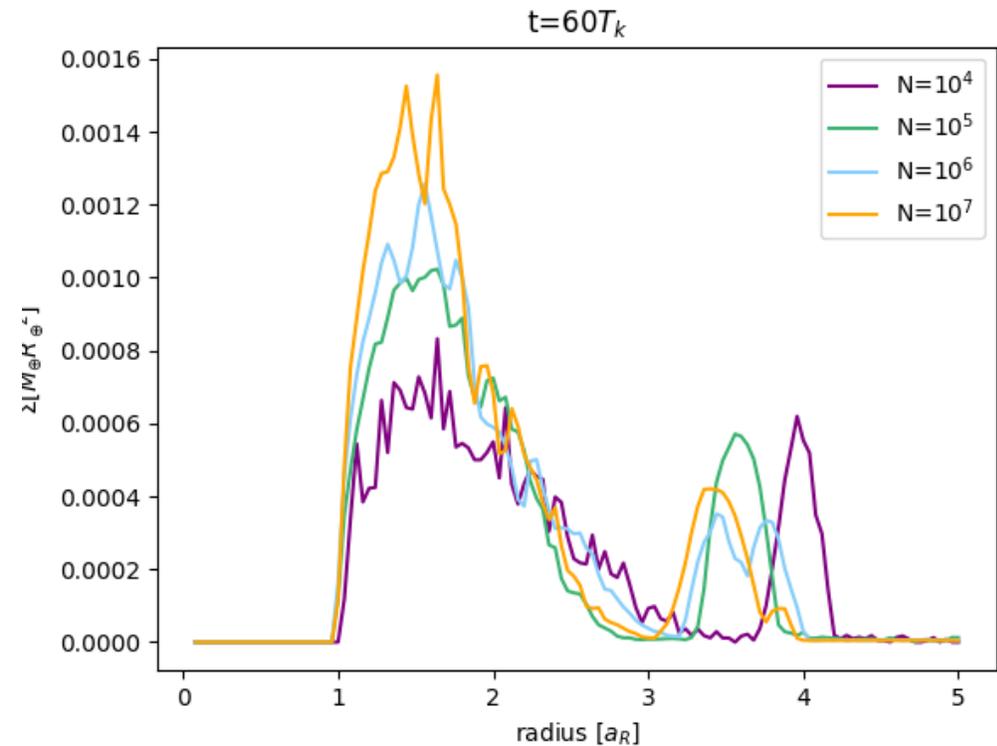
研究結果：面密度分布

- 時間がたつと質量が外側に輸送される。
- 粒子数が多くなるほど、ロッシュ限界半径内に多くの粒子が残る。



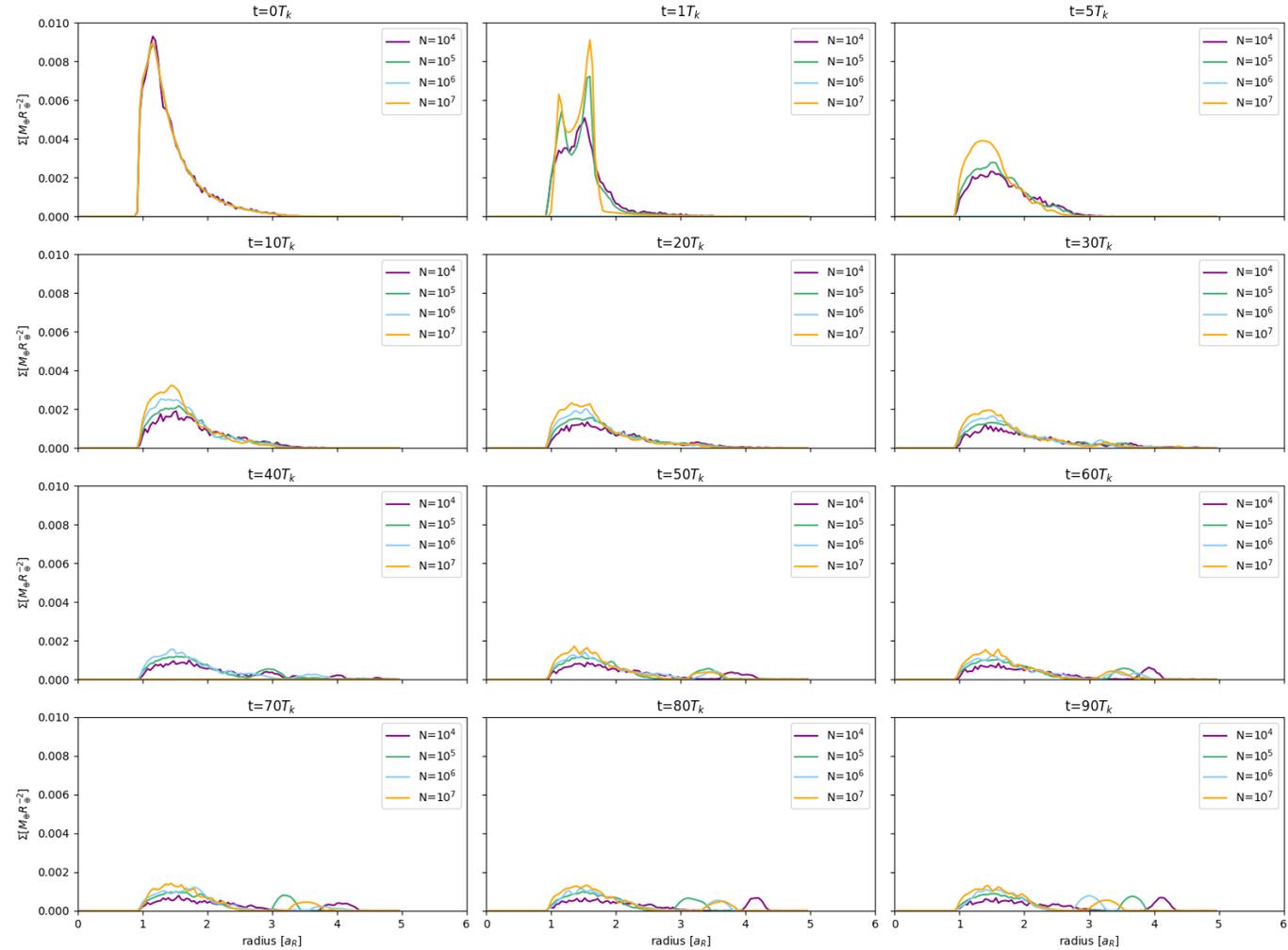
研究結果：面密度分布

- 時間がたってもロッシュ限界半径内で粒子数の変化による面密度の差がみられる。
- 地球半径の3~4倍のところに見られる山は月のもととなる比較的大きな塊である。



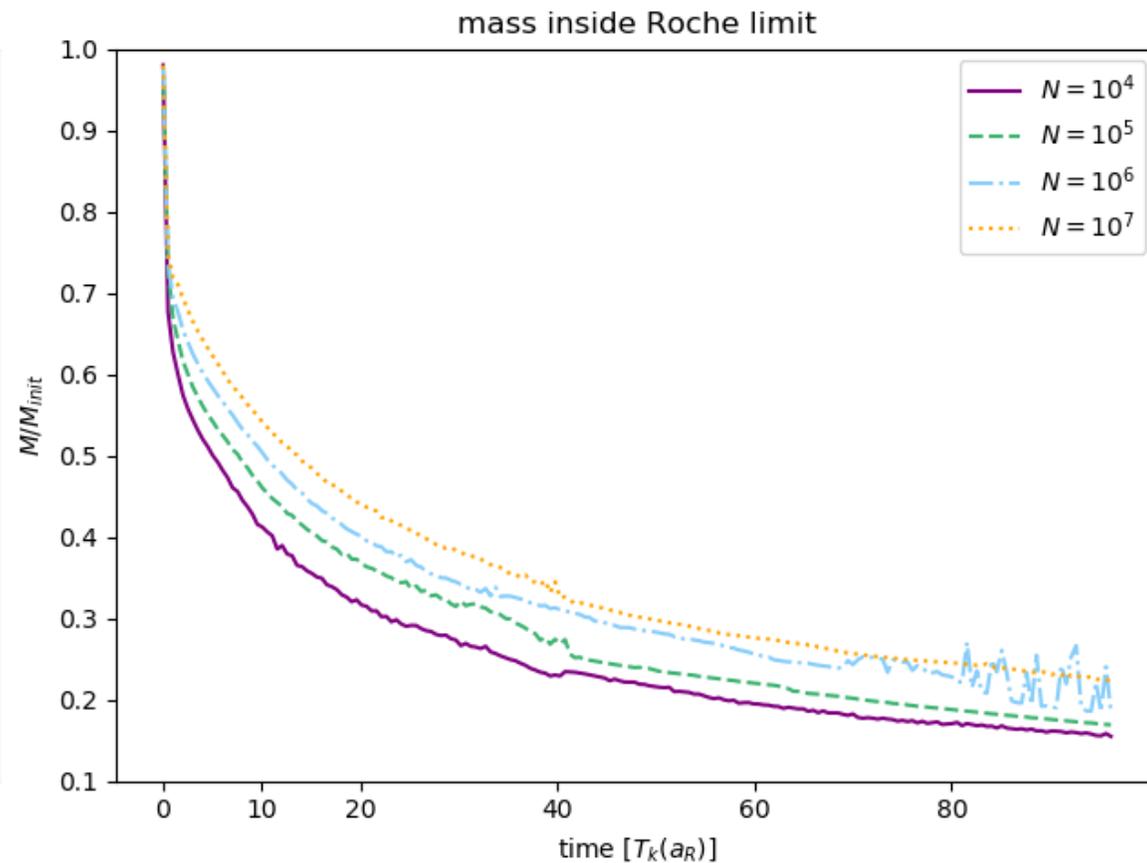
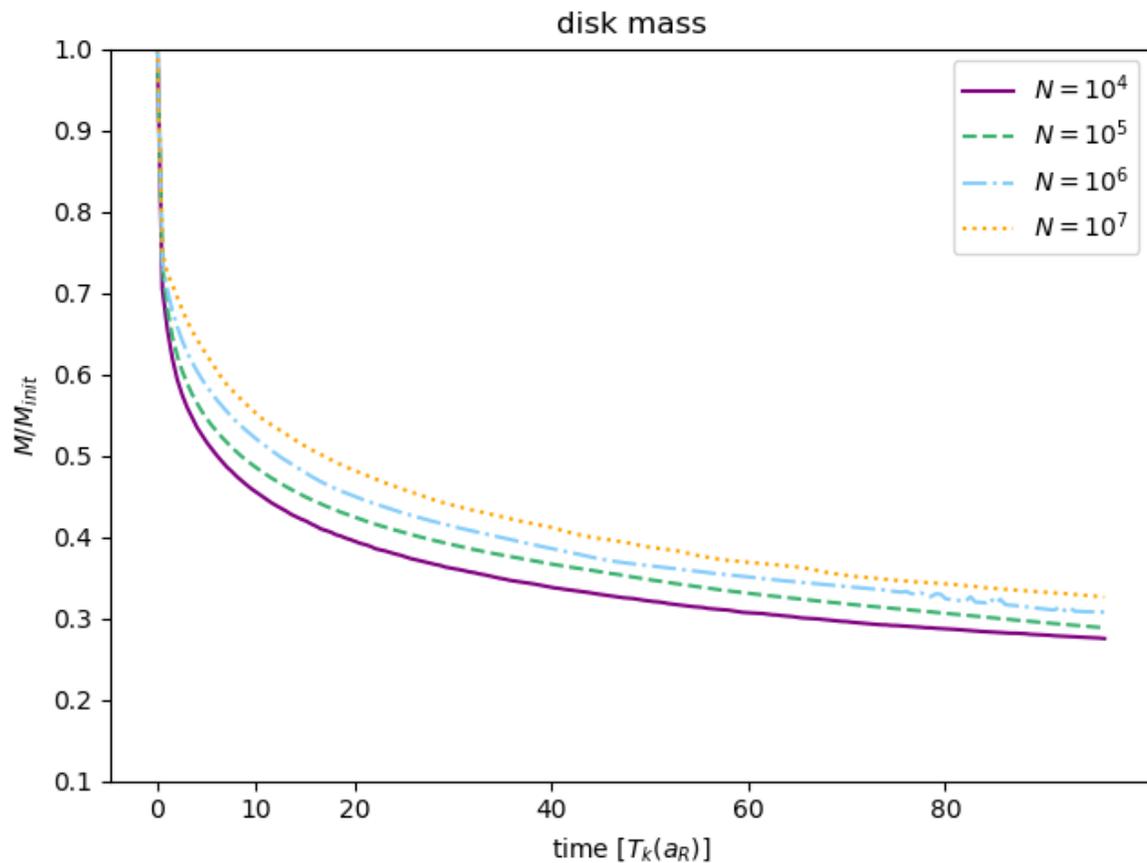
研究結果：面密度分布

- どの時刻でも、粒子数が多いシミュレーションでロッジシュ限界半径内に留まる質量が多い。



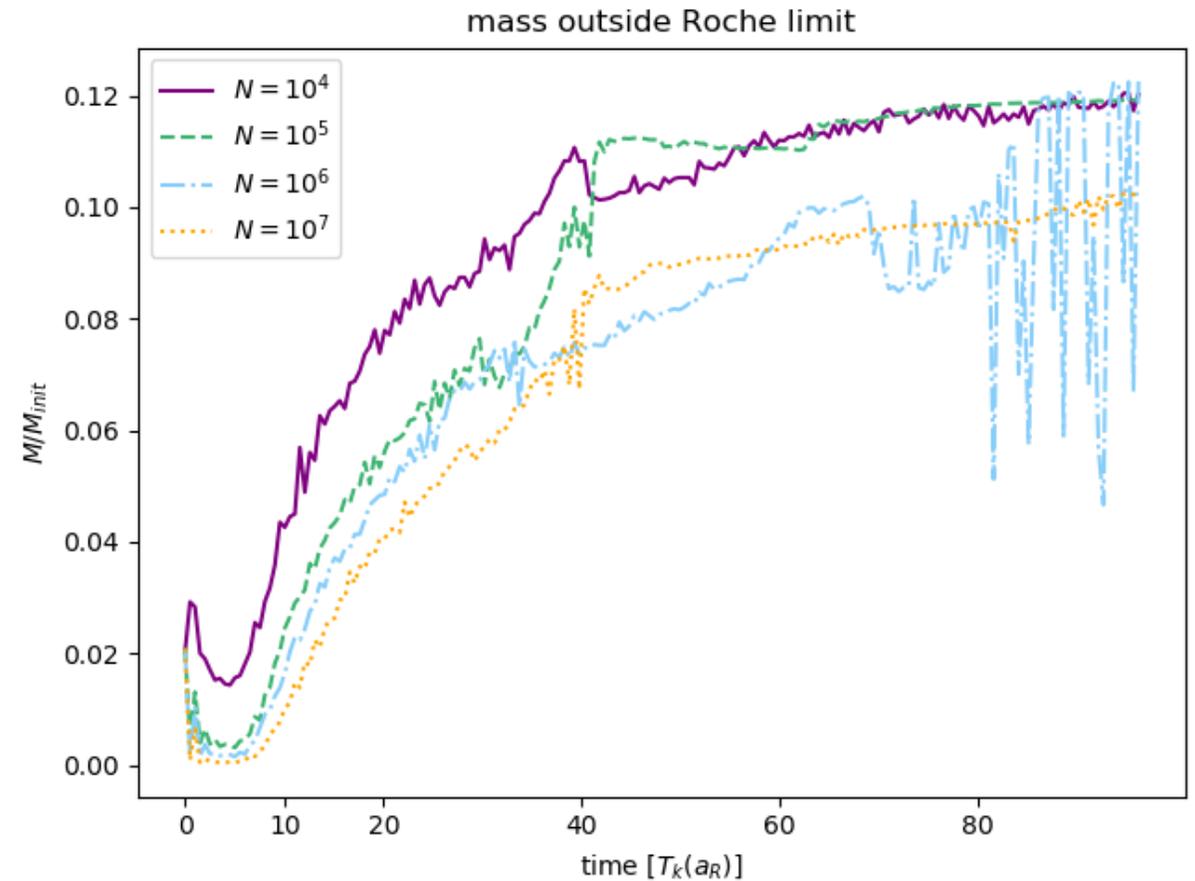
研究結果

- ロッシュ限界半径内の面密度分布が粒子数によって変化するの
は地球への落下による影響が大きい。



研究結果

- ロッシュ限界半径の外側に輸送される質量も解像度によって変化する。



まとめ

- 粒子数の多いシミュレーションでは、ロッシュ限界半径内により多くの質量が留まる。
 - リーディングスパイラルによって地球への落下が抑制されることが主な原因と考えられる。
 - 外側に輸送される質量も粒子数に依存すると考えられる。

今後の方針

- 現在、月円盤(光学的に厚い円盤)における角運動量輸送の理論がない。
 - 光学的に薄い場合の角運動量輸送と、シミュレーションにおける角運動量輸送を比較し、月円盤における角運動量輸送を調べる。
- Petit & Henon (1988)は光学的に薄い円盤の質量フラックスを定式化している。
 - この式から求められる質量フラックスと実際のシミュレーションにおける質量フラックスを比較して議論する。

$$\Phi_M = -\frac{3}{4}\pi I \left(\frac{2m_p}{M_\oplus}\right)^{\frac{4}{3}} \frac{a_0^5}{m_p} \frac{\partial \Sigma^2}{\partial r} \Omega_0$$