

# 惑星系形成進化における計算科学と計算機

小久保英一郎 (国立天文台)

# 目次

## 惑星系

- 太陽系
- 系外惑星系

## 惑星系形成

- 太陽系形成標準シナリオ
- 課題

## 惑星系形成シミュレーション

- 問題の特徴
- 多体シミュレーションの現状と課題
- 次世代計算

# 惑星系形成論

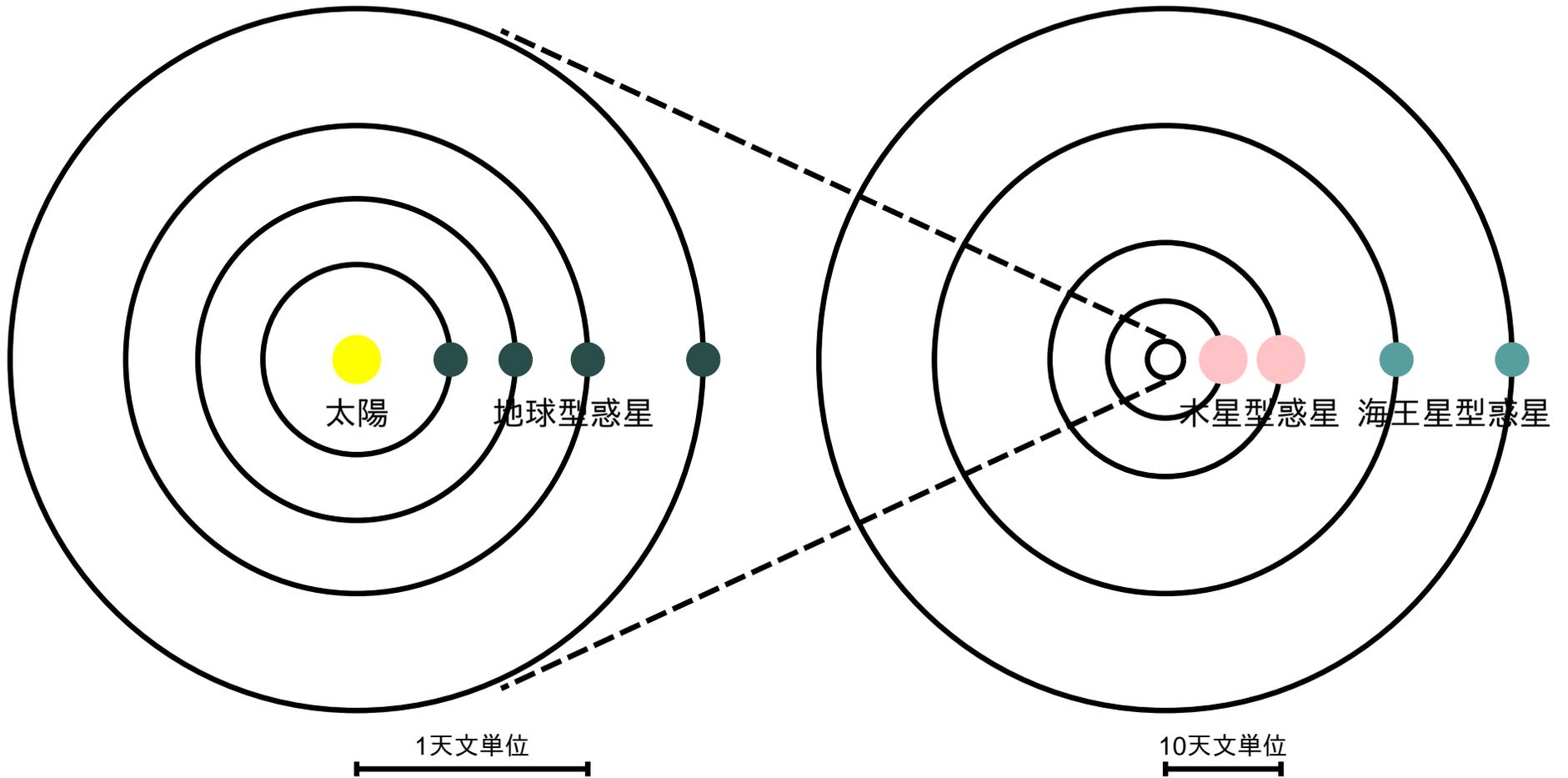
## 目標

原始惑星系円盤から惑星系までの形成理論を構築する



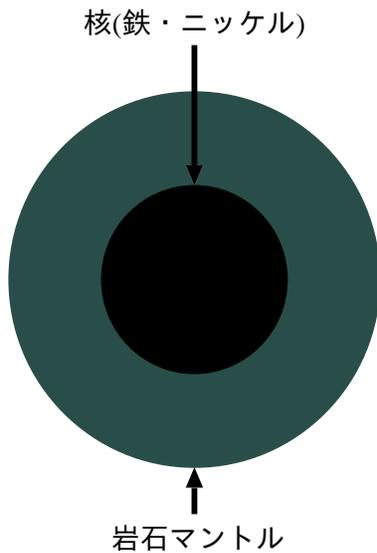
- 太陽系 (惑星, 衛星, 環, 小惑星, 彗星, ...) の起源
- 系外惑星系 (灼熱巨大惑星, 大離心率惑星, ...) の起源
- 第2の「地球」の存在可能性
- 生命の起源

# 太陽系の構造

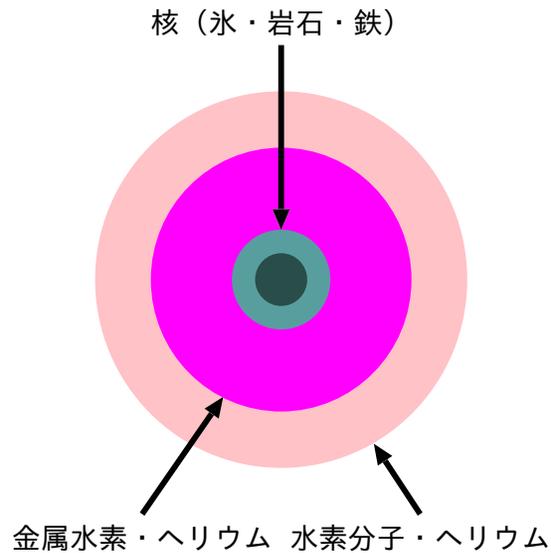


# 惑星の分類

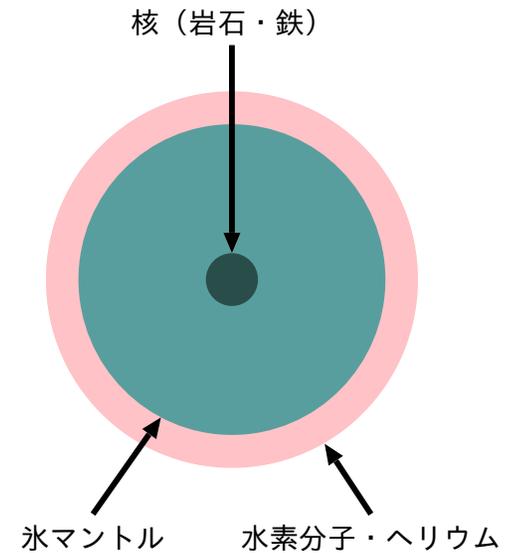
種類	地球型	木星型	海 (天) 王星型
別名	岩石惑星	ガス惑星	氷惑星
惑星	水星, 金星, 地球, 火星	木星, 土星	天王星, 海王星
存在範囲 (AU)	0.4-1.5	5-10	20-30
質量 ( $M_{\oplus}$ )	$\sim 0.1-1$	$\sim 100$	$\sim 10$
密度 ( $\text{gcm}^{-3}$ )	3.9-5.5	$\simeq 1$	$\simeq 1$
主成分	岩石・鉄	ガス ( $\text{H}_2$ , He)	氷 ( $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CH}_4$ , $\text{NH}_3$ )



地球型惑星



木星型惑星



海王星型惑星

# 系外惑星

## 観測

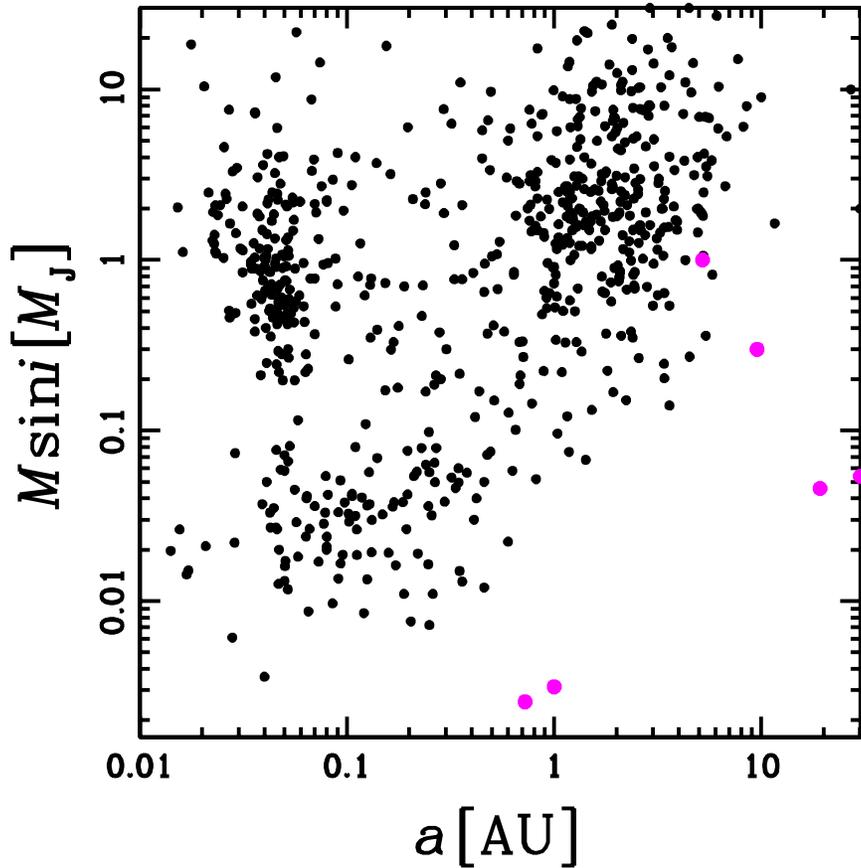
- 1995: 51 Peg b の発見 — 新時代の始まり
- 2013: 1000 個以上の惑星 — 木星型・海王星型惑星
- 2013: 2740 個の惑星候補天体 — 地球型惑星

## 惑星の多様性

- 軌道: 近接惑星, 大離心率惑星, 平均運動共鳴, ...
- 質量: 巨大ガス惑星, 巨大地球型惑星, ...
- 密度: 低密度惑星, ...

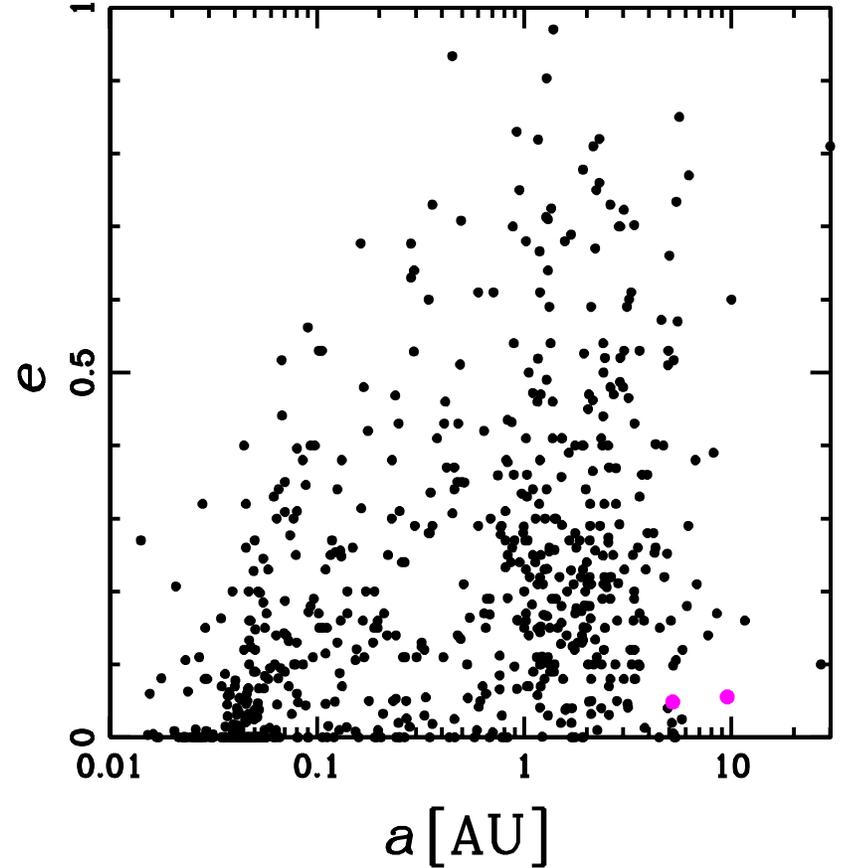
太陽系にはない軌道、質量、密度の惑星が存在する!  
太陽系とは何が違うのか?多様性の起源は?

# 系外惑星系の特徴



質量による分類

種類	$M(M_J)$
木星型惑星	$\simeq 1-10$
海王星型惑星	$\simeq 0.1-1$
(大型) 地球型惑星	$\lesssim 0.1$



軌道による分類

種類	$a(\text{AU})$	$e$
近接惑星	$\lesssim 0.1$	$\lesssim 0.1$
大離心率惑星	$\gtrsim 0.1$	$\gtrsim 0.1$

# 標準シナリオの基本概念

## 円盤仮説

- 惑星系は恒星周りの小質量の**円盤** (原始惑星系円盤) から形成される。
- 円盤はガスとダストから構成される。

## 微惑星仮説

- ダストの集積によって**微惑星**が形成される。
- 微惑星の集積によって固体惑星が形成される。
- 固体惑星 (核) にガスが降り積もることによってガス惑星が形成される (核集積モデル)。

(Safronov 1969, Hayashi+ 1985)

# 惑星系形成の特徴

## 系

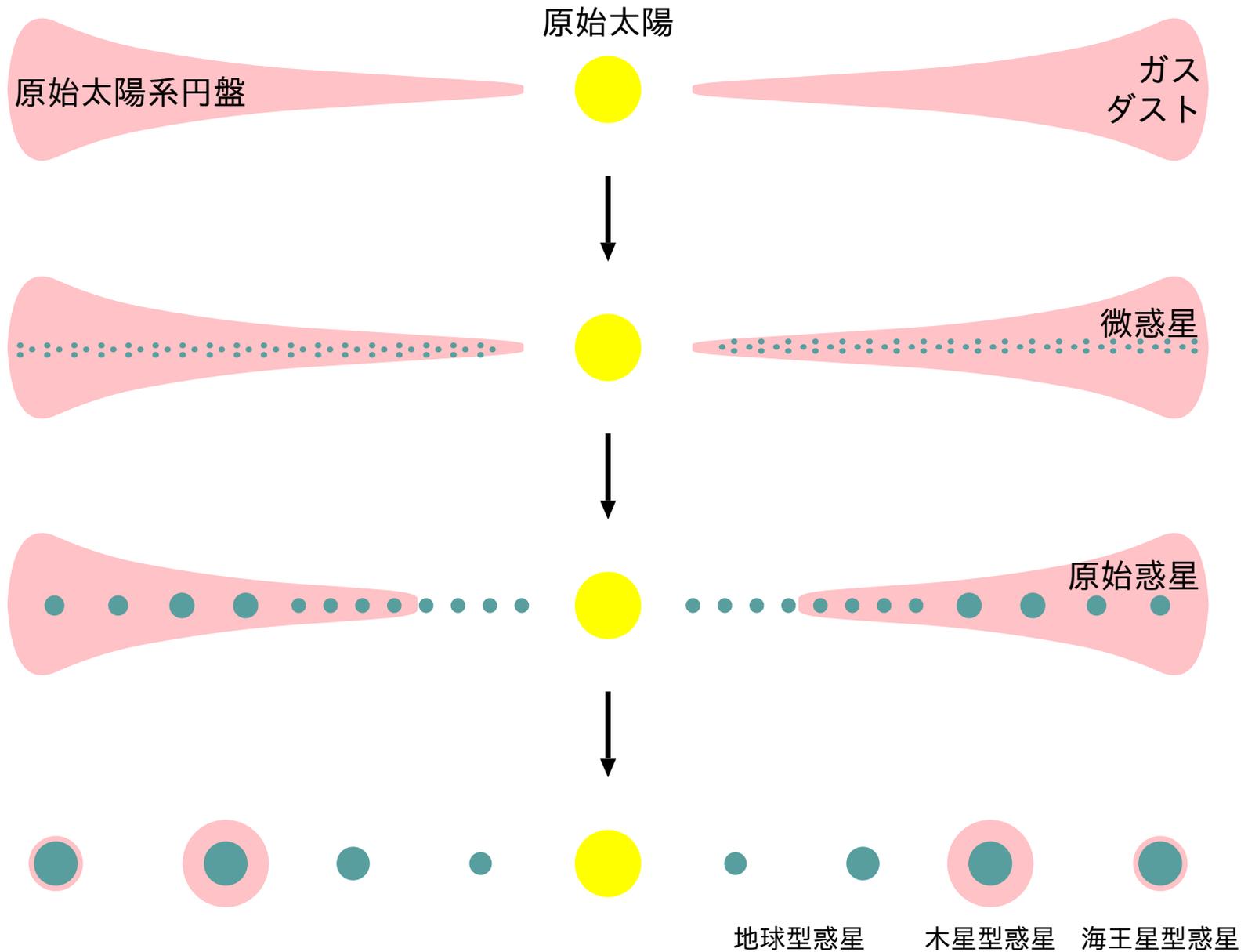
- 形状: 回転円盤
- 構成要素: 流体 (ガス) + 粒子 (ダスト)

## 形成過程の特徴

- 巨大な原子集団の長期かつ複雑多岐にわたる非可逆過程
- 原子・分子・光子の相互作用に関する微視的法則と重力が主役である巨視的な運動法則の両者によって規定

(林忠四郎)

# 標準シナリオの概要



# 残されている問題

## 微惑星形成

- ダスト層の重力不安定による分裂？ ダストの合体成長？

## 木星型惑星形成

- ガス円盤寿命内に形成可能？

## 海王星型惑星形成

- 太陽系年齢内に形成不可能？内側で形成後外側に移動？

## 小惑星帯の形成

- いつどうやって形成されたか？

## ガス円盤の散逸

- いつどうやって散逸したか？

...

# 形成論の一般化への課題

## 標準シナリオの仮定

- 最小質量円盤
- 連続分布円盤 (雪線除く)
- その場形成

## 原始惑星系円盤の理解

- 構造 (非一様性、不連続性)?
- 形成と初期進化?

## 原始惑星・惑星の移動の理解

- 原始惑星とガス円盤の重力相互作用によって移動、中心星に落下?
- 惑星とガス円盤の重力相互作用によって中心星に落下?
- 惑星系の軌道不安定性によって拡散?(Nice モデル)

# 惑星系の多様性の起源

## 初期条件の違い

- 原始惑星系円盤の大きさ・質量分布・ガスダスト比

## 境界条件の違い

- 中心星の種類・進化段階
- 孤立星、連星、星団
- 銀河系環境

## 多様性を生み出す形成過程

- 惑星の移動 (微惑星・ガス円盤との相互作用)
- 惑星どうしの重力散乱

# 究極の目標

## 第一原理計算による惑星系形成

中心星 + 原始惑星系円盤 → 惑星系

## 原始惑星系円盤

- 半径:  $r \sim 10 \text{ AU}$
- ガス質量:  $M_{\text{gas}} \sim 10^{-2} M_{\odot}$
- ダスト質量:  $M_{\text{dust}} \sim 10^{-4} M_{\odot}$
- 微惑星数:  $N \sim 10^{11}$
- 形成時間:  $t \sim 10^9 \text{ year}$

# 惑星系形成問題

## 運動方程式

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \underbrace{-GM_{\odot} \frac{\mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_i|^3}}_{\text{中心星重力}} + \underbrace{\sum_{j \neq i}^N Gm_j \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^3}}_{\text{自己重力}} + \underbrace{\mathbf{f}_{\text{gas}}}_{\text{ガス抵抗}} + \underbrace{\mathbf{f}_{\text{col}}}_{\text{衝突}}$$

- 太陽重力 (支配的)  $\Rightarrow$  ケプラー軌道
- 自己重力  $\Rightarrow$  軌道変化
- ガス抵抗  $\Rightarrow$  基準面円軌道化
- 衝突  $\Rightarrow$  質量変化

惑星系形成問題  $\simeq$  重力多体問題

# 微惑星円盤

## 系の特徴

- 公転運動 (中心星重量が支配的)
- 衝突系 (二体緩和による軌道進化)
- 物理的衝突 (質量分布の進化)
- 幅広い時間スケール (衝突から公転)

## 惑星形成の素過程

- 重力散乱 → 軌道進化
- 衝突 → 質量進化 (合体/破壊)

## 問題の難しさ

- 高精度の必要性 (衝突系)
- 長期計算 (長い集積進化の時間スケール)

# 標準シミュレーション方法

## 積分公式

- エルミート積分法 (予測子修正子法) (Makino & Aarseth 1992)

## 時間ステップ

- 階層的な時間ステップ (独立粒子時間ステップ) (Makino 1991)

## 応用

- 時間対称化 (Kokubo+ 1998, Kokubo & Makino 2004)
- ハイブリッド化 (Oshino+ 2011)

## 問題点

- 高効率並列化の困難

# 多体シミュレーションの現状

## 計算規模

- 微惑星形成:  $N \sim 10^5, t \sim 10^2$  year
- 原始惑星形成:  $N \sim 10^4, t \sim 10^5$  year
- 地球型惑星形成:  $N \sim 10-10^2, t \sim 10^8$  year
- 惑星系の安定性:  $N \sim 10, t \sim 10^9$  year
- 衛星形成:  $N \sim 10^5, t \sim 1$  year  
(時間ステップ数:  $\sim 10^2-10^3$  ステップ/year)

## 使用計算機

- 大規模計算: GRAPE

# シミュレーションの例

## 微惑星形成

- $N \simeq 10^5$
- $t = 20$  year
- 周期境界

## 原始惑星形成

- $N = 10^4$
- $t = 4 \times 10^5$  year
- 大域計算

# 多体シミュレーションの課題

## 大規模計算

- 移動
- 集積時間差による構造形成

## 破壊

- 衝突破片の効果 (運動/集積)

## ガスとの相互作用

- 移動、ガス惑星形成

# 次世代シミュレーション

## 現状最大規模計算

- $N \sim 10^5$
- $t \sim 10^5$  year
- $r \sim 1$  AU
- 計算機: GRAPE-DR ( $\sim 10^2$  Gflops,  $\sim 10$  日)

## 次世代計算規模

- $N \sim 10^8?$
- $t \sim 10^8$  year?
- $r \sim 10$  AU

# 京への提案

## 主題

- 超大規模多体シミュレーションで探る惑星系の構造の起源
- 小久保、牧野、似鳥

## 計算方法

- アルゴリズム: エルミート積分法 + 階層化時間ステップ
- 言語: C99
- 並列化: OpenMP/MPI

## 計算規模

- $N \sim 10^6$
- $t \sim 10^7$  year
- 使用メモリ: 約 1GB、使用ディスク容量: 約 1TB

# まとめ

## 多体系進化としての惑星系形成

- 重力相互作用による軌道進化
- 衝突合体による集積進化

## シミュレーション現状

- $N \sim 10^5, t \sim 10^5$  year
- GRAPE によるシミュレーション
- 並列化の困難

## 次世代シミュレーションへ向けて

- $N \sim 10^8?, t \sim 10^8$  year?
- 大規模並列化コードの開発
- 物理素過程 (特にガスとの相互作用) の理解