

## 計画研究 A02

多様な原始惑星系円盤における  
惑星形成過程の理論的解明

小久保英一郎 (国立天文台)

# 研究目的

## 新学術領域研究の目的

- 最新の星形成理論に基づき、これまでの星・惑星形成の理論にパラダイムシフトをもたらし、銀河系における惑星系の普遍性と多様性を理解し、生命を宿す可能性のあるハビタブル惑星の形成史を明らかにする。

## 計画研究 A02 の目的

- 様々な銀河系環境における多様な原始惑星系円盤における惑星系形成を対象とし、最先端の微惑星形成理論と惑星移動理論を用いることで、惑星系の多様性の起源を解明する。
- 星・円盤形成及び系外惑星系の最新観測結果 (計画研究 B01、B02、B03) と星・円盤形成理論 (A01) を活用し、これら全体を互いにリンクさせる。惑星大気形成・進化 (A03) を考える枠組みを与える。

# 計画研究 A02 班人員構成

## 研究代表者

- 小久保英一郎 (全体統括、固体惑星集積)

## 研究分担者

- 井田茂 (惑星種族合成モデル)
- 奥住聡 (原始惑星系円盤初期進化)
- 小林浩 (惑星衝突破壊過程)
- 田中秀和 (ダスト進化)
- 長澤真樹子 (天体力学)

## 研究協力者

- 谷川享行 (ガス惑星系形成)
- 中本泰史 (原始惑星系円盤初期物質進化)

# 基本戦略

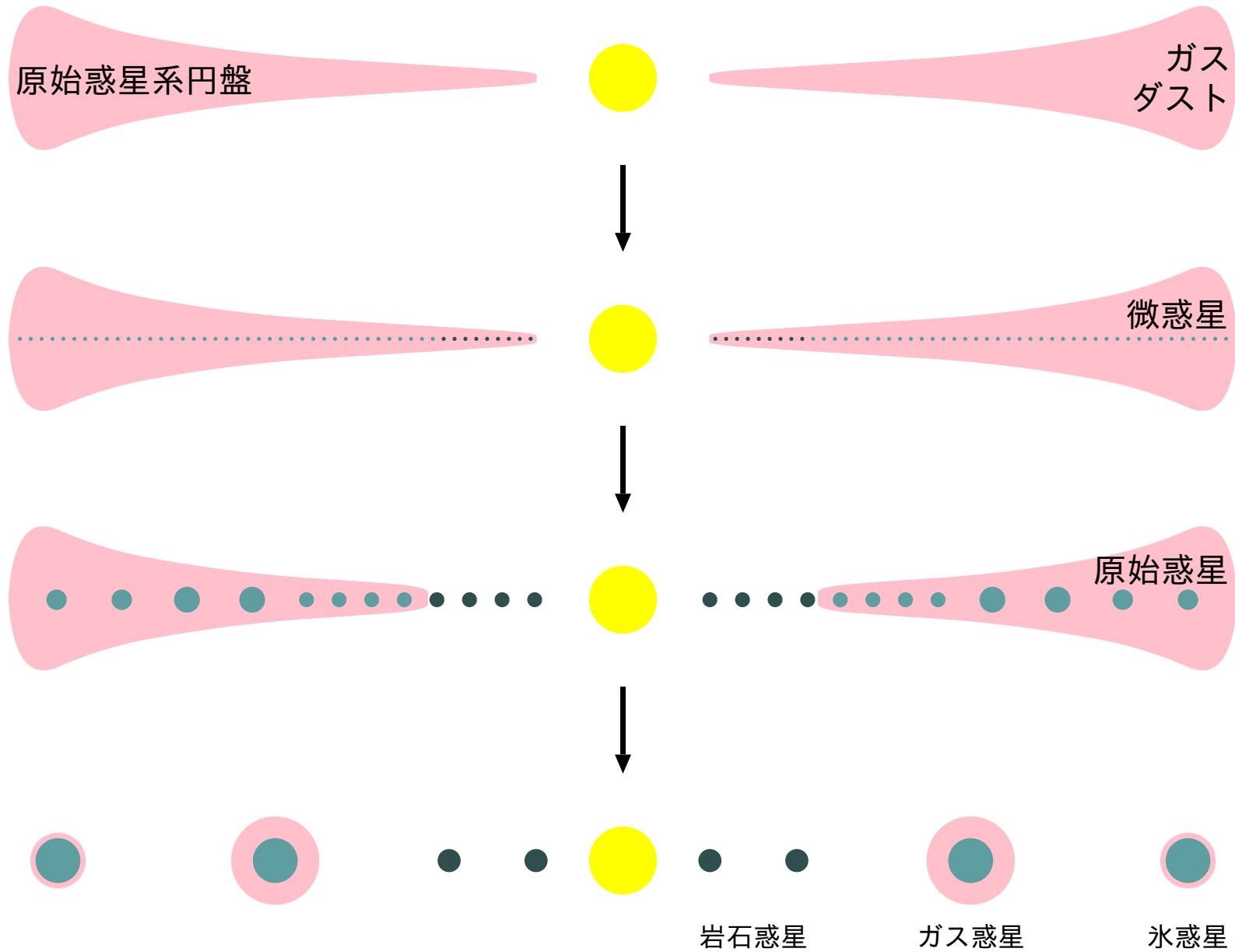
## 素過程の解明

- 微惑星形成と惑星形成の**重要素過程**について数値シミュレーションによって徹底的な解明を行う。

## 汎惑星形成論の構築

- 明らかになった素過程を総合して、**原始惑星系円盤の構造や物質の移動**を考慮した包括的な惑星系形成モデル、**汎惑星形成理論**を構築し、**惑星系の多様性と太陽系の起原**を明らかにする

# 標準シナリオ



# 標準シナリオの課題

## 標準シナリオの仮定

- 最小質量、連続分布円盤 (雪線除く)
- 微惑星、その場形成

## 原始太陽系円盤の理解

- 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

- 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?

## 衝突破壊・破片の効果

- 微惑星の破壊進化?
- 破片-惑星の相互作用?

# 最近の進展 (1)

## 微惑星形成

- 圧力バンプ (e.g., Johansen+ 2009, Taki+ 2016)
- ストリーミング不安定 (e.g., Youdin & Goodman 2005, Johansen+ 2007)
- 高空隙率ダストの付着成長 (e.g., Wada+ 2008, Okuzumi+ 2012, Kataoka+ 2013, Arakawa & Nakamoto 2016)
- 高空隙率ダスト層の重力不安定 (Michikoshi & EK 2016)

## 惑星集積

- ペブル (小石) 集積 (e.g., Lambrechts & Johansen 2012)
- 局所分布 (環) からの集積 (e.g., Hansen 2009)
- 不完全合体の効果 (e.g., EK & Genda 2010)
- 衝突破壊・破片の効果 (e.g., Kobayashi & Tanaka 2010)

# 最近の進展 (2)

## 原始惑星・惑星の移動

- 現実的な円盤での I 型移動 (e.g., Paardekooper+ 2010)
- 円盤風の I 型移動への影響 (e.g., Suzuki+ 2016, Ogihara, EK+ 2017)

## 大域的移動モデル

- Nice モデル (e.g., Tsiganis+ 2005)
- grand tack モデル (e.g., Walsh+ 2011)



# 研究計画概要

## 計画

1. 微惑星形成の素過程
2. 惑星形成の素過程
3. 汎惑星形成論と太陽系の起源

## 重要課題

- 円盤の**構造**と**進化**
- 惑星材料物質の**局在**
- 惑星材料物質の**移動**

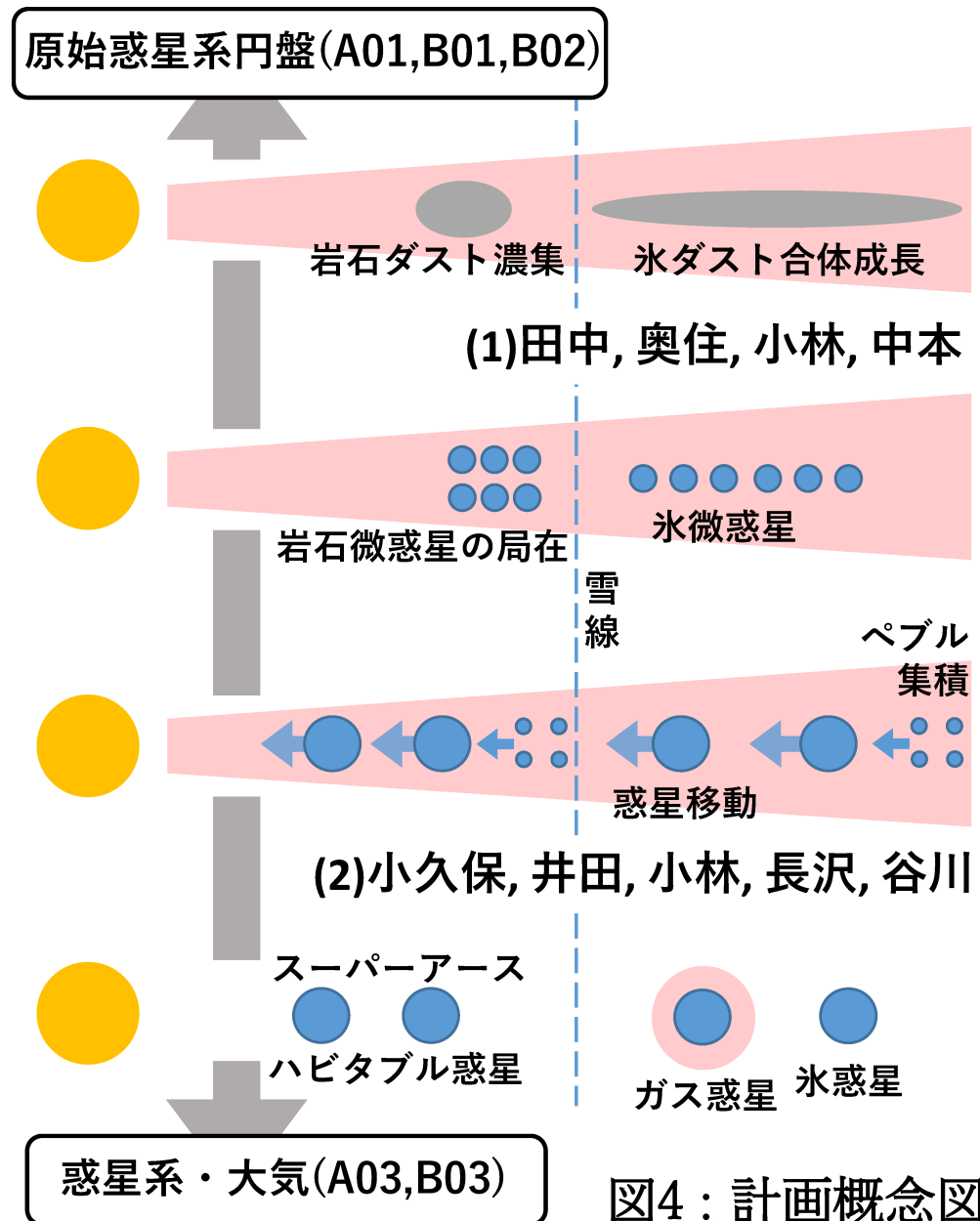


図4：計画概念図

# 微惑星形成の素過程

## 背景と目的

- 惑星形成理論の最重要課題。近年の観測によって、原始惑星系円盤の**縞構造**や**非軸対象構造**など、多様な構造が明らかになってきている。このような多様な円盤における**ダストの移動と成長**、それによる**微惑星や小石(ペブル)の形成過程**を明らかにする。

## 課題

- 形成・進化中の円盤におけるダストの成長・移動モデルの構築 (奥住, 田中, 中本)
- ダストの衝突合体・破壊とペブル生成モデルの構築 (田中, 奥住, 小林)
- 雪線内側におけるダスト濃集と重力不安定による岩石微惑星形成のモデル構築 (奥住, 田中, 小久保)
- ダスト、微惑星、ペブルの統合モデルと円盤観測との比較

# 惑星形成の素過程

## 背景と目的

- 最近の円盤の観測や理論によって、**惑星材料物質の局在**や大規模な**半径方向の移動**などが示されている。このような状況下での惑星形成の素過程を明らかにする。局所的な微惑星分布からの惑星集積、ペブル集積、そして近接地球型惑星形成について調べる。

## 課題

- (a) 微惑星の衝突・破壊過程 (小林, 小久保)
- (b) 微惑星の局所集積 (小久保, 小林, 長澤)
- (c) 材料物質の移動を考慮した集積 (田中, 井田, 小久保)
- (d) ガス惑星の形成 (小久保, 田中, 小林, 長澤, 谷川)
- (e) 近接スーパーアース系の形成 (小久保, 井田, 小林)

# 汎惑星形成論と太陽系の起源

## 背景と目的

- 多様な銀河系環境下で、多様な原始惑星系円盤から形成される惑星系の多様性を記述可能な惑星系形成モデル、汎惑星形成理論を完成させる。
- 銀河系におけるハビタブル惑星の形成条件を明らかにし、太陽系がどのような原始惑星系円盤からどのように形成されたのかを明らかにする。

## 課題

- (a) 汎惑星形成モデルの構築 (種族合成モデルへの各素過程の組み込み)
- (b) ハビタブル惑星の形成条件
- (c) 太陽系の起源 (形成過程とその特殊性/普遍性)

# 2019年度雇用計画

## 高橋実道

- 2019.6- (国立天文台)
- 円盤のカス・タスト・磁場の共進化計算に基づく多様な円盤構造形成と微惑星形成

## 田中祐希

- 2019.6- (東北大学)
- 系外巨大惑星の形成モデル構築及びそれに関わる数値流体計算

# GPU サーバ

## NVIDIA DGX Station

- Tesla V100 x 4 (500 Tflops)

## ソフトウェア

- 衝突系: K&F GRAPE 互換ライブラリ
- 無衝突系/SPH: FDPS (Iwasawa+ 16)



# まとめ - 計画研究 A02 惑星形成理論

## 目的

- 多様な原始惑星系円盤と惑星系を繋ぐ、円盤構造や物質移動を考慮した新たな惑星形成理論の構築
- ハビタブル惑星の形成条件と太陽系の起源の解明

## 計画

1. 微惑星形成の素過程
2. 惑星形成の素過程
3. 汎惑星系形成論と太陽系の起源

## 今後

- 来年度: PD 2 名 (国立天文台、東北大学) 雇用
- 小研究会?
- 研究推進!