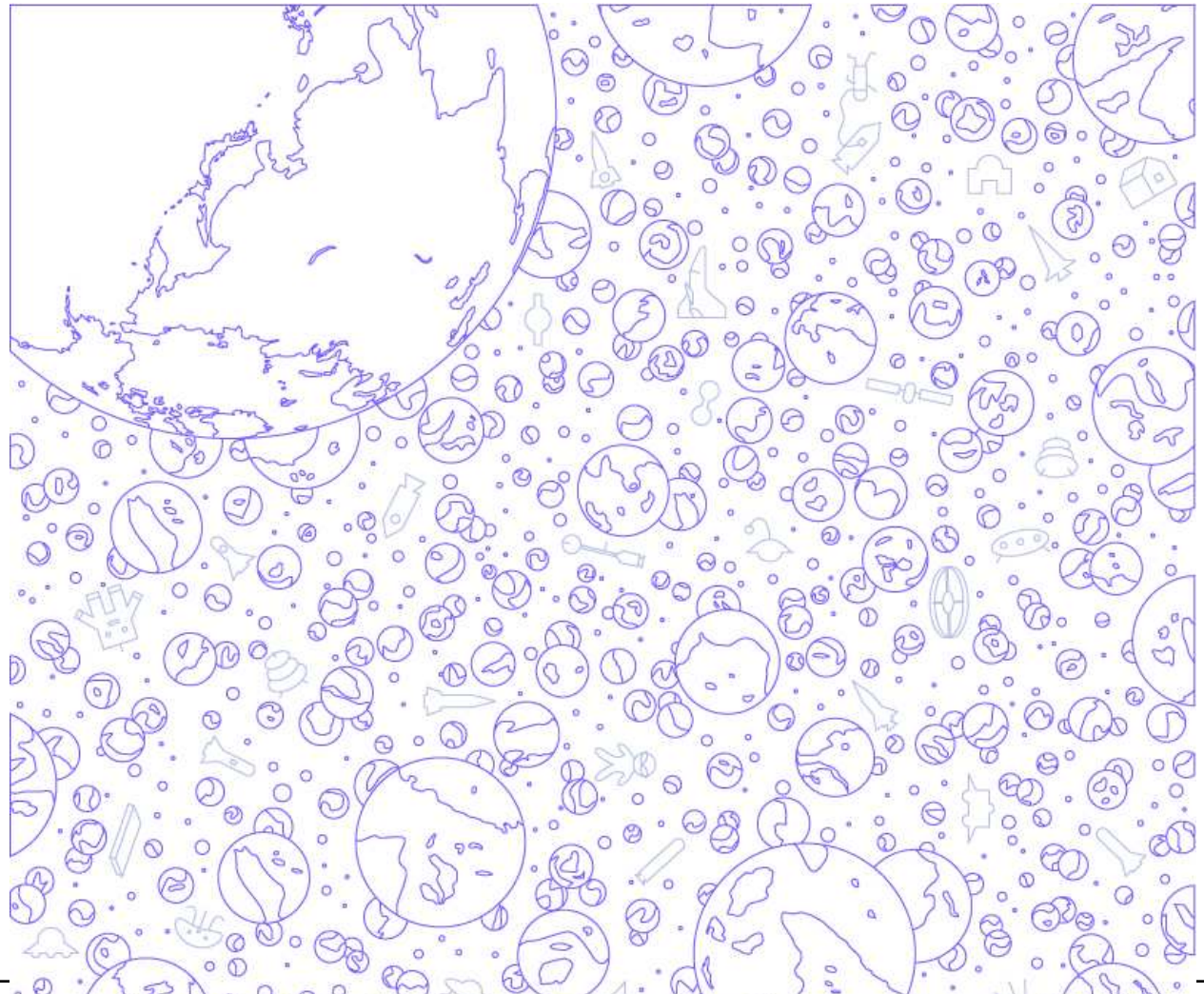


次世代天文学 惑星系天文学編

惑星系班世話人 小久保英一郎(国立天文台)



惑星系班構成員

母体 = 光赤外将来計画サイエンスWG惑星系班

相川裕理 (神戸大学)

井田茂 (東京工業大学) (世話人)

倉本圭 (北海道大学)

田中秀和 (東京工業大学)

田村元秀 (国立天文台) (観測アドバイザー)

中本泰史 (筑波大学)

百瀬宗武 (茨城大学) (観測アドバイザー)

渡部潤一 (国立天文台)

渡辺誠一郎 (名古屋大学)

小久保英一郎 (国立天文台) (世話人)

カバー する分野: 原始惑星系円盤から惑星系

発表内容

惑星系形成シナリオとその問題点(小久保)

原始惑星系ガス円盤(中本)

原始惑星系円盤でのダスト成長(田中)

惑星系の多様性(小久保)

惑星系天文学の基本的問題

惑星系はどのようなものか？

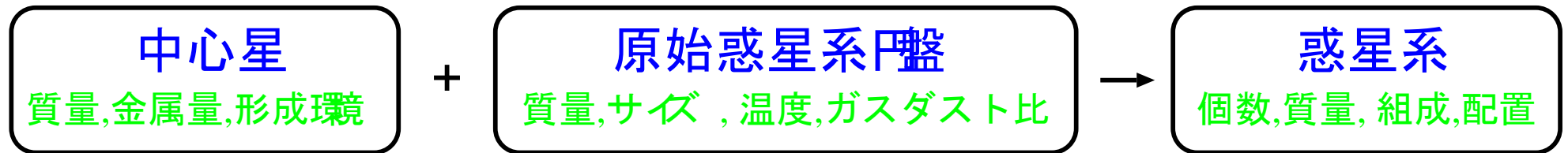
惑星系はどのくらいあるのか？

惑星系はどのようにしてできるのか？

第2の地球(生存可能惑星)はあるのか？

惑星系形成論

原始惑星系円盤から惑星系までの
形成理論を構築する

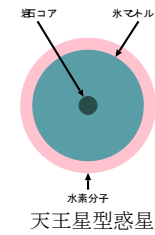
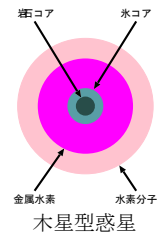
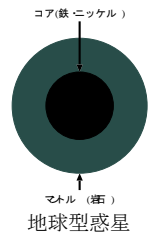


- 太陽系の起源
- 系外惑星系の起源
- 第**2**の地球の存在可能性

太陽系形成シナリオとその問題点

惑星の種類

惑星種	地球型	木星型	天王星型
別名	岩石惑星	巨大ガス惑星	巨大氷惑星
存在範囲 [天文単位]	0.4-1.5	5-10	20-30
質量 [地球質量]	0.1-1	100	10
主成分	岩石, 鉄	水素, ヘリウム	水, メタン, アンモニア



太陽系の特徴(1)

大きさと惑星の数

- 惑星領域の半径は約**40**天文単位
- 8(9)**個の惑星(+無数の小天体)

質量と角運動量

- 惑星の質量の合計は太陽の質量の**1/1000**倍
- 惑星の軌道角運動量の合計は太陽の自転角運動量の**190**倍

太陽系の特徴(2)

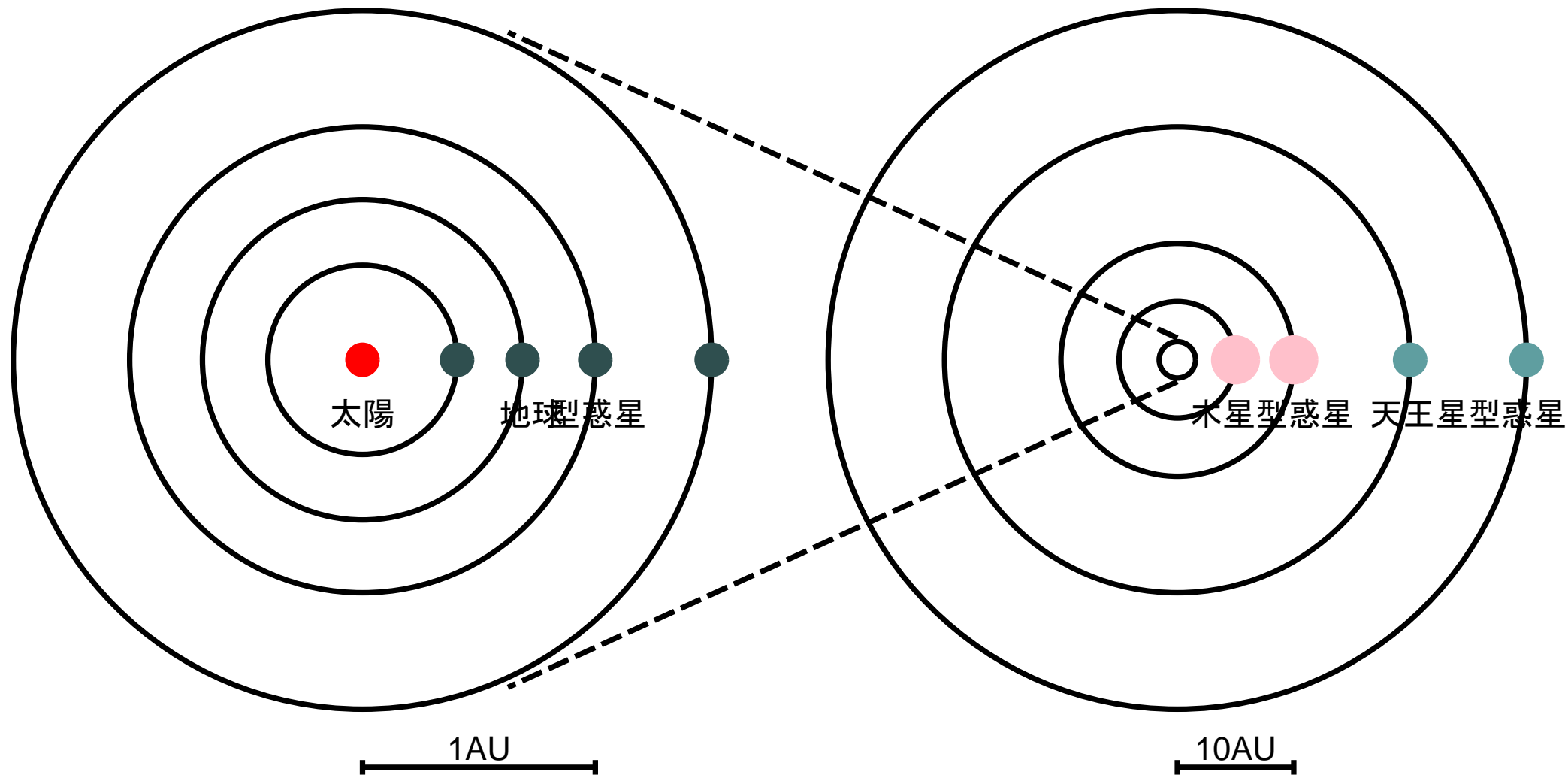
惑星の軌道

- ほぼ同一平面上でほぼ円軌道
- 太陽から遠いほど軌道の間隔は広い

惑星の組成

- 地球型惑星: 岩石(固体)
- 木星型惑星: 水素、ヘリウム(ガス)
- 天王星型惑星: 氷(固体)

太陽系の構造



惑星系(太陽系)形成の基本概念

「円盤仮説」

- 星周円盤から惑星系は形成される
 - 質量は太陽集中, 角運動量は惑星集中
 - 惑星の軌道は同一平面上

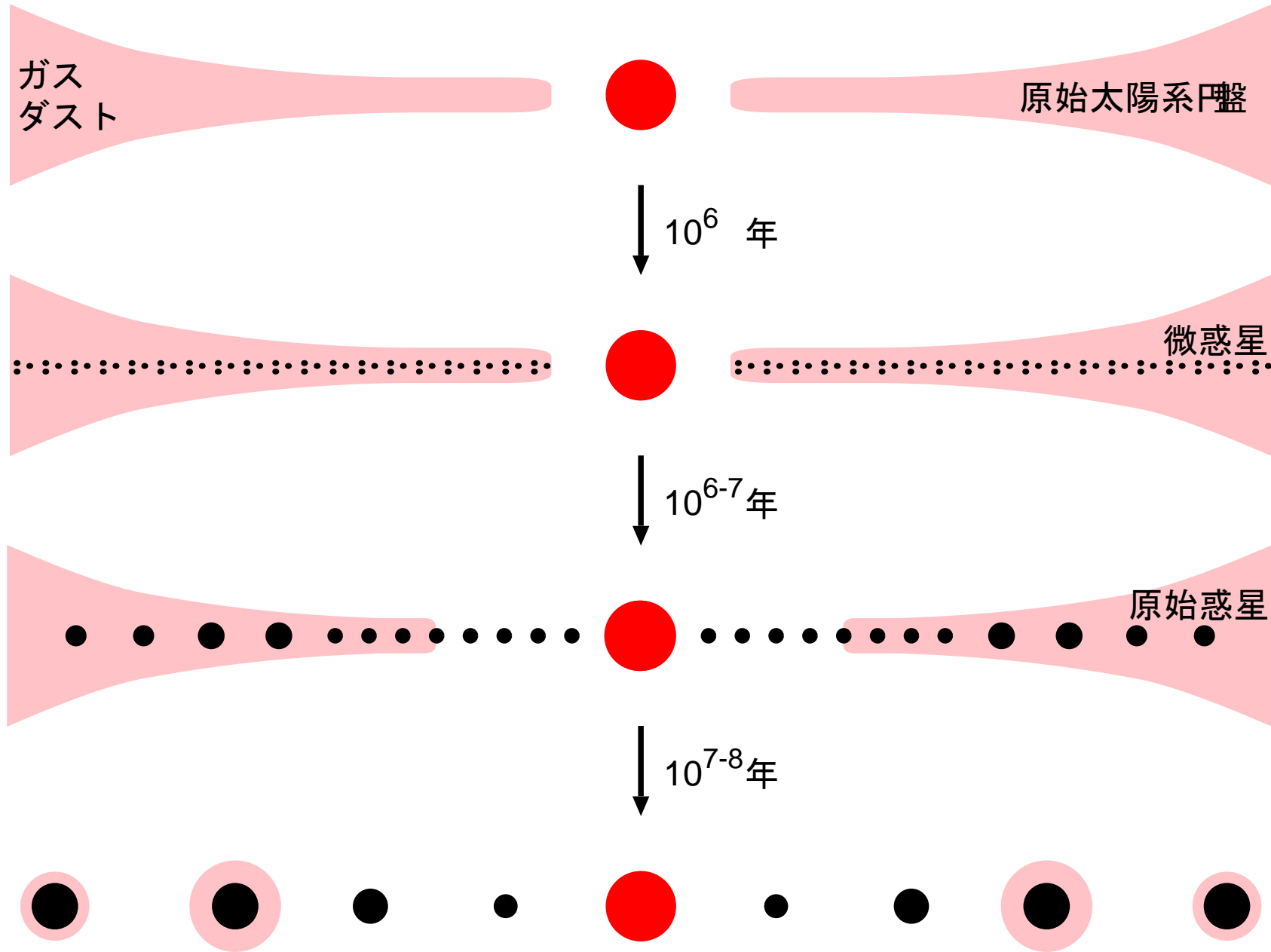
原始惑星系円盤の観測により実証

「微惑星仮説」

- 固体惑星が先に形成され, ガス惑星は固体惑星へのガス降着で形成される
 - 惑星の大きな金属存在度

観測的証拠はない

太陽系形成の標準シナリオ



残されている問題(1)

原始惑星系円盤の形成と初期構造

- 形成過程?
- 質量分布? ガスダスト比? 組成?

微惑星の形成過程(ダスト成長過程)

- 原始惑星系円盤の状態?(衝突合体 vs 重力不安定)

木星型・天王星型惑星の形成時間

- 木星コア形成時間 > ガス円盤の寿命?
- 海王星形成時間 > 太陽系年齢?

残されている問題(2)

惑星の移動(惑星落下問題)

- ガス円盤と惑星の相互作用?

原始惑星系円盤の散逸過程

- 惑星-円盤相互作用?
- 恒星風・恒星紫外線?

小天体の起源

- 小惑星、カイパーベルト天体、彗星、衛星系

今後の課題

検討するキーテーマ

原始惑星系ガス円盤の構造と進化(中本・百瀬)

原始惑星系ダスト円盤の構造と進化(渡辺・田中)

原始惑星系円盤の化学進化(相川・中本)

惑星とガス円盤の相互作用(田中・井田)

惑星の初期進化(倉本・井田)

太陽系外縁部の構造(渡部・小久保)

系外惑星系(井田・小久保)

居住可能惑星と生命の起源(井田・倉本)

キーテーマのまとめ方

現状の理解

残されている問題点

今後の方針と観測への提言

キープロジェクトの選定

(詳しくは光赤外天文学将来計画報告書参照)

今後の課題(ダイジェスト)

- 惑星系形成シナリオの理論化・精密化、観測との比較
- 原始惑星系円盤・惑星系の多様性とその起源
- 非孤立系・非太陽型星(質量、金属量、進化段階)での惑星系
- 惑星系外縁部の構造と進化
- 惑星初期進化と生命の起源への天文学的アプローチ

原始惑星系ガス円盤の構造と進化

形成

- 円盤の質量・サイズを決める機構は何か?

構造

- 円盤構造の解明

進化

- 円盤内乱流の解明
- 円盤の重力不安定性

散逸

- 散逸の機構

原始惑星系ダスト円盤の構造と進化

ダスト

- ダストアグリゲイトの巨視的な物性が不明

進化

- 高ダスト/ガス比のガス・ダスト2流体の振る舞い
- ダストの半径方向の移動
- ダストの合体成長(破壊)過程
- 微惑星の形成過程

原始惑星系円盤の化学進化

- 化学組成の空間分布とその進化
- 円盤内での物質混合
- 周惑星円盤の構造と組成

惑星とガス円盤の相互作用

惑星移動

- **Type I migration** の再検討・形成シナリオへの導入
- ガス円盤の進化と **Type II migration**

惑星の初期進化

大気進化

- 成長時間と星雲ガス寿命の関係
- 惑星大気の進化

表面固体進化

- 地球型天体の表面組成進化

系外惑星系

恒星・惑星系の多様性

- 軌道・質量以外の情報
- 非孤立系・非太陽型星の惑星系
- 惑星系をもつ恒星の化学的・力学的性質

形成論

- 巨大惑星形成時間の問題
- 大質量原始惑星系円盤での惑星集積
- 連星系での惑星系形成
- 惑星系の安定性

太陽系外縁部の構造

太陽系

- **50**天文単位以遠の空白域の謎
- サイズ分布の謎
- 反射能の謎
- バイナリー の謎
- カイパー ベルトとオールト雲の関係

系外惑星系

- 系外ダスト円盤との関係

居住可能惑星と生命の起源

- **habitable zone**の天体力学的条件
- **habitable planet**の物質科学的条件
- プレートテクトニクス、磁場、大気組成
- 系外巨大ガス惑星の衛星での居住可能性

惑星系の多様性

系外惑星の発見

1995年 太陽型星での系外惑星の発見

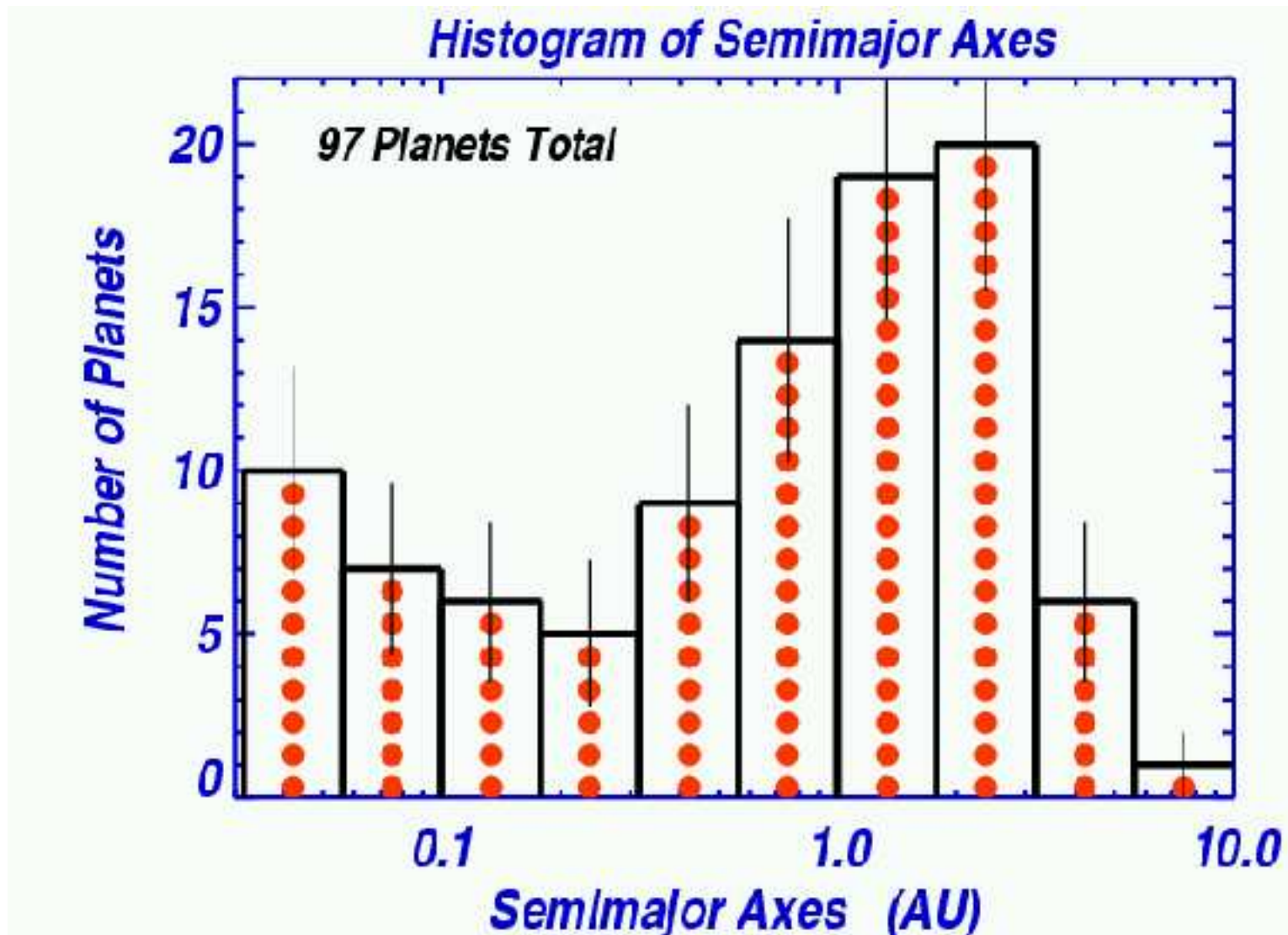
- 惑星系は太陽系だけではなかった
- 惑星系は太陽系のようなものだけではなかった

2003年 G型巨星での系外惑星の発見

- 惑星系は太陽型星以外にも存在する
- 惑星系は主系列段階以外にも存在する

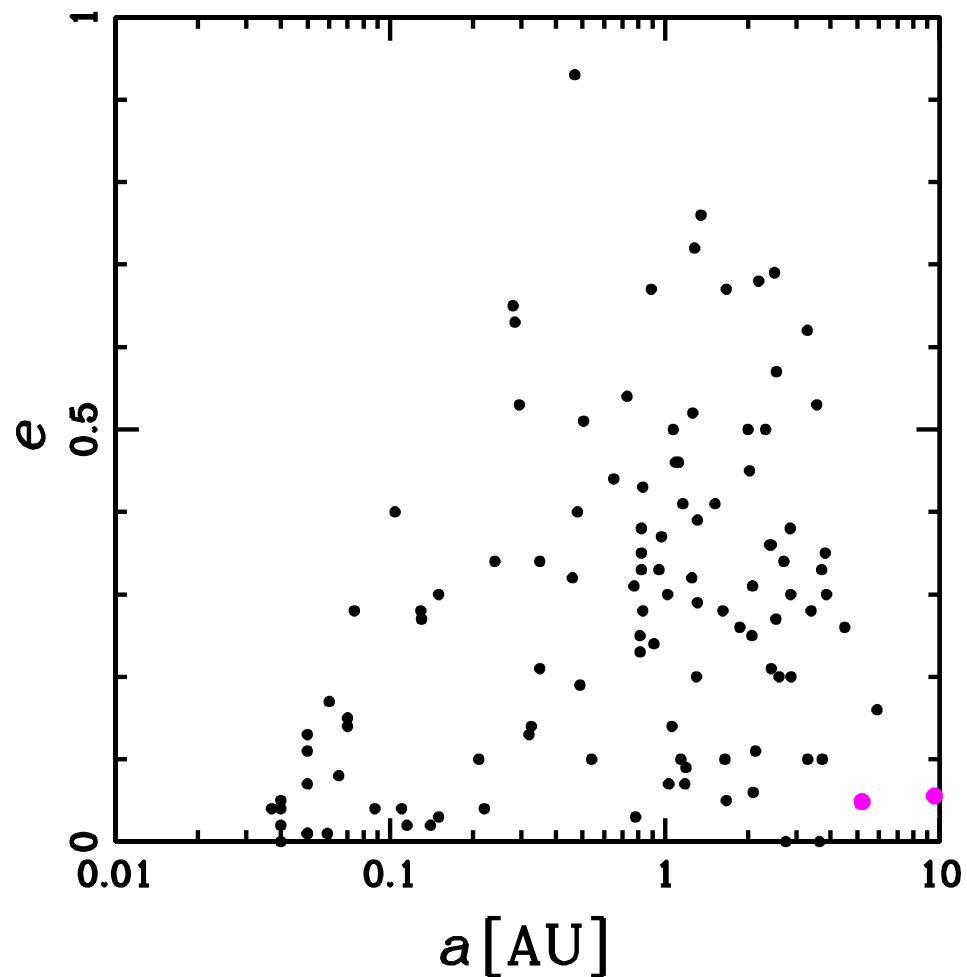
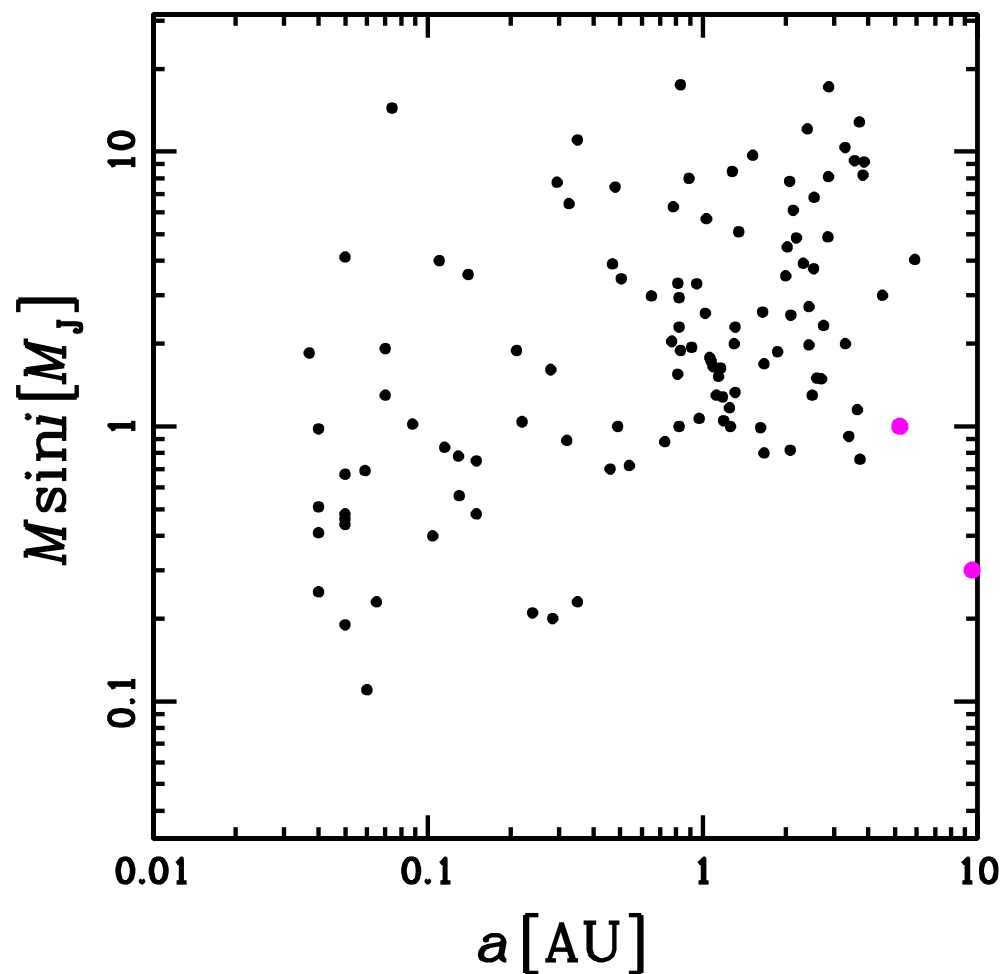
系外惑星の観測

ドップラー シフト法による太陽型恒星の観測



約130個(2004年12月現在)の木星型惑星(存在確立約5%)

系外惑星系の特徴



○軌道による分類

種類	a [AU]	e
灼熱巨大惑星	$\lesssim 0.1$	$\lesssim 0.1$
大離心率惑星	> 0.1	> 0.1

惑星系の普遍性と多様性

普遍性

- 太陽型星の約**5%**に存在

多様性

- 灼熱巨大惑星
- 大軌道離心率惑星
- 木星型巨大惑星

銀河系に惑星系は普遍的に存在する
惑星系は多様である

新たな問題

惑星系の多様性

- 灼熱巨大惑星・大離心率惑星の起源?
- 恒星、原始惑星系円盤、環境の違い?

太陽系型惑星系の普遍性

- 太陽系は特殊なのか?
- 第2の地球はあるのか?

太陽系形成論から一般的な惑星系形成論へ

惑星系の多様性の起源

初期条件の違い

- 原始惑星系円盤の質量・質量分布・ガス-ダスト比

境界条件の違い

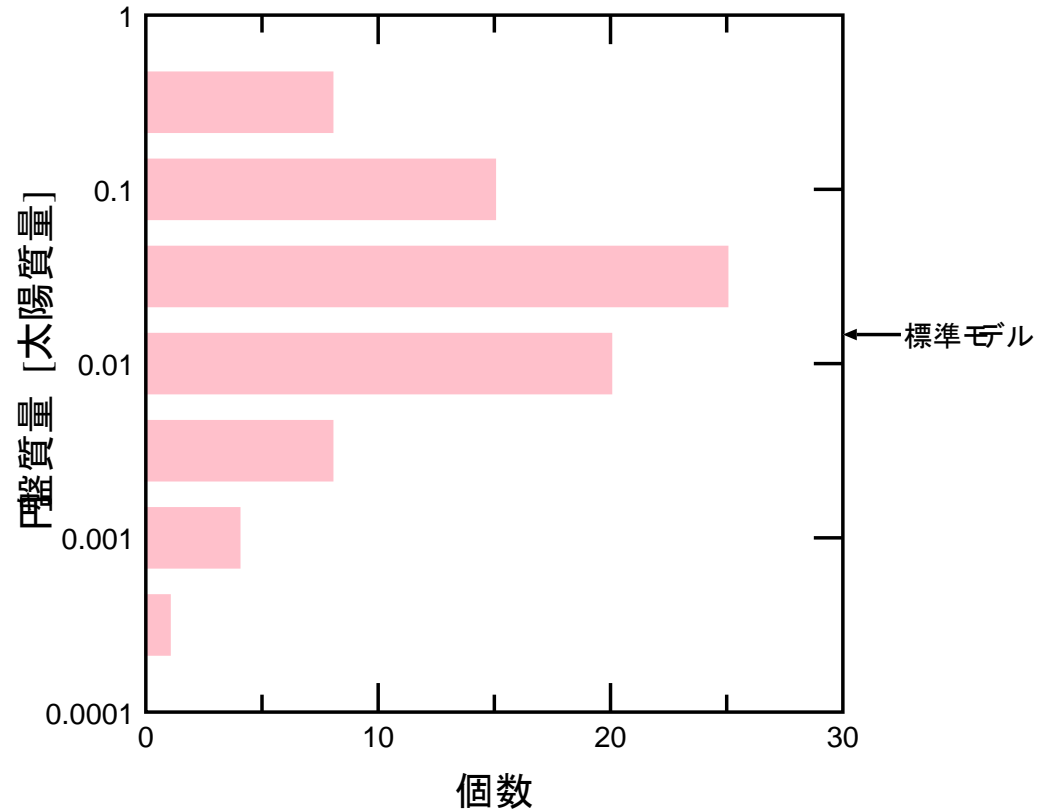
- 中心星の種類・進化段階
- 孤立星、連星、星団
- 銀河系環境
- 巨大惑星の配置

多様性を生み出す過程

- 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

原始惑星系円盤の多様性

おうし座、へびつかい座 (Beckwith & Sargent 1996)



質量:

$$M_{\text{disk}} \sim 10^{-3} - 10^{-1} M_{\odot}$$

質量分布:

?

原始惑星の寡占的成長モデル

原始惑星系円盤モデル

$$\Sigma_{\text{solid}} = f_{\text{ice}} \Sigma_1 \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{-\alpha} [\text{gcm}^{-2}], \Sigma_{\text{gas}} = f_{\text{gas}} \Sigma_1 \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{-\alpha} [\text{gcm}^{-2}]$$

(仮定: 軌道間隔 \propto ヒル半径、ガスあり 移動なし、集積効率100%)

原始惑星の孤立質量

$$M_{\text{iso}} \simeq 0.16 \left(\frac{\tilde{b}}{10} \right)^{3/2} \left(\frac{f_{\text{ice}} \Sigma_1}{10} \right)^{3/2} \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{(3/2)(2-\alpha)} M_{\oplus}$$

原始惑星の成長時間

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

木星型惑星の形成条件

ガス円盤寿命

$$T_{\text{disk}} \sim 10^{6-8} \text{ [year]}$$

ガス降着時間

$$T_{\text{cont}} \sim 10^{8-9} \left(\frac{M_{\text{iso}}}{M_{\oplus}} \right)^{-5/2} \text{ [year]}$$

Ikoma et al.

(2000)

形成条件

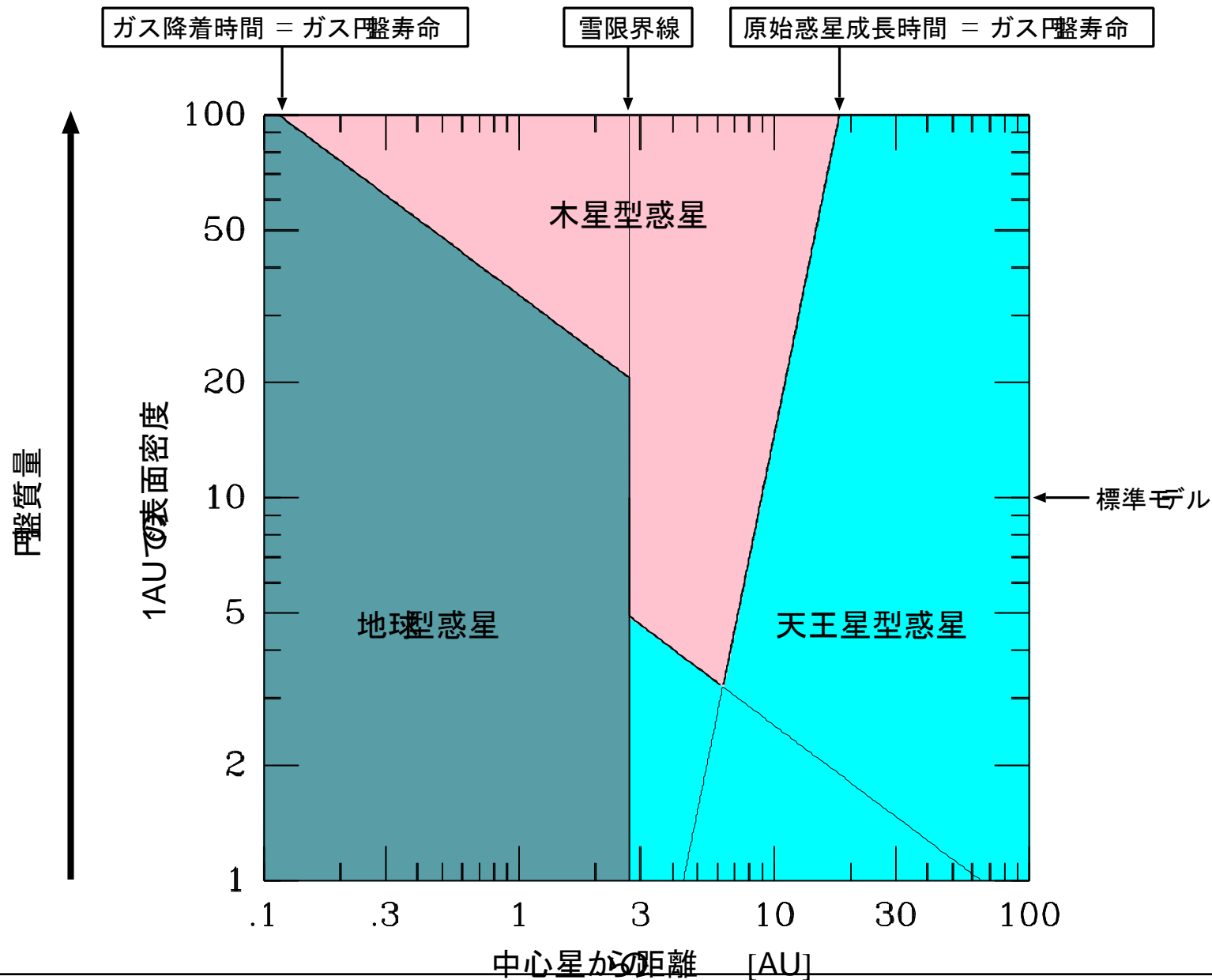
原始惑星成長時間 < ガス円盤寿命 $\implies a < a_{\text{gas}}^{\text{max}}$

ガス降着時間 < ガス円盤寿命 $\implies a > a_{\text{gas}}^{\text{min}}$

木星型惑星領域	$a_{\text{gas}}^{\text{min}} \lesssim a \lesssim a_{\text{gas}}^{\text{max}}$
地球型惑星領域	$a_{\text{gas}}^{\text{min}} \lesssim a \lesssim a_{\text{gas}}^{\text{max}} \cap a \lesssim a_{\text{snow}}$
天王星型惑星領域	$a_{\text{gas}}^{\text{min}} \lesssim a \lesssim a_{\text{gas}}^{\text{max}} \cap a \gtrsim a_{\text{snow}}$

惑星の住み分け

$\alpha = 3/2$, ガス円盤寿命 = 10^8 年, ガス降着時間 = $10^8 (M/M_{\oplus})^{-5/2}$ 年



惑星の住み分け

小質量円盤(0.001-0.003太陽質量)

- 多数の小さな地球型惑星と天王星型惑星

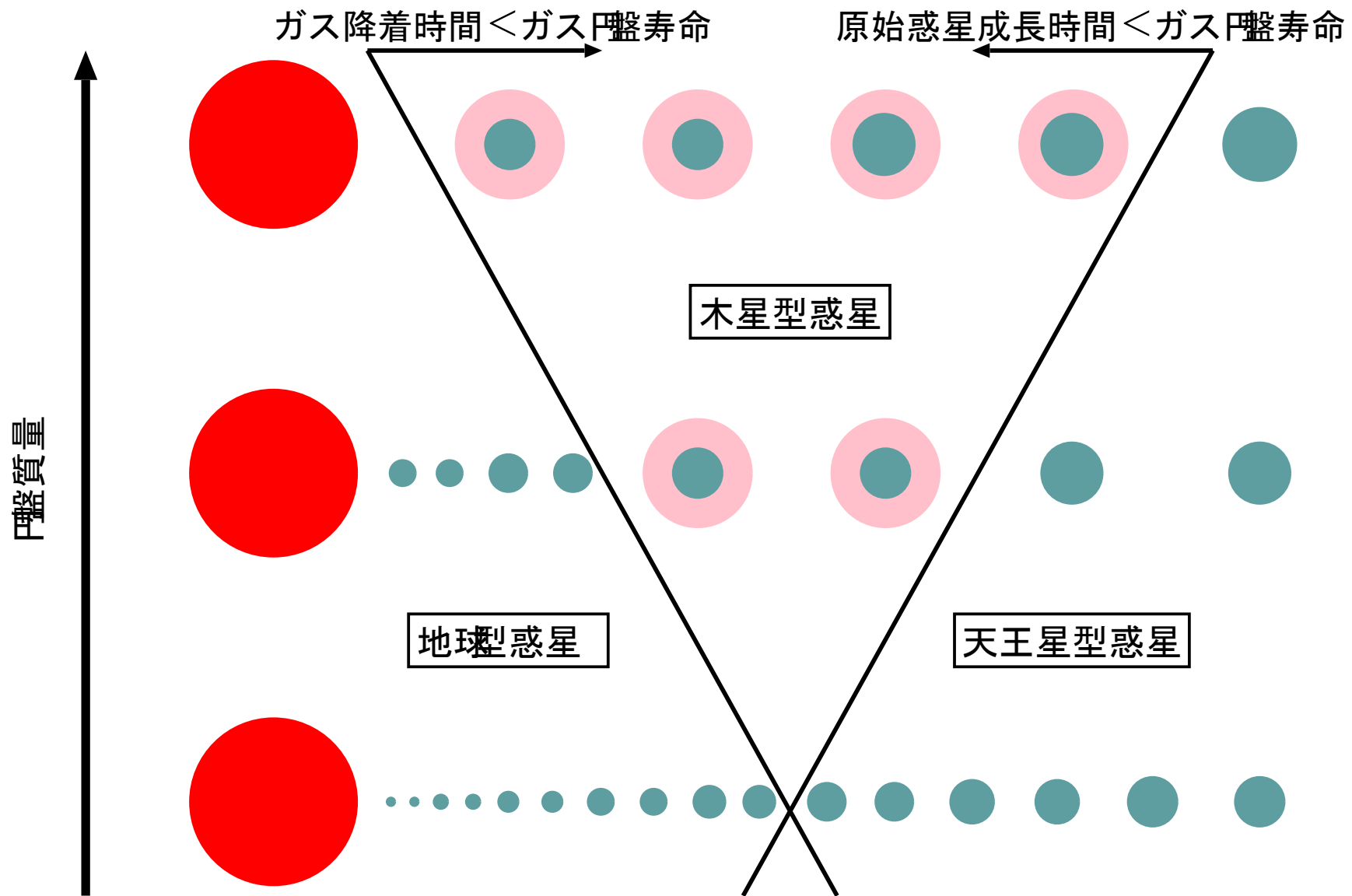
大質量円盤(>0.003太陽質量)

- 複数の木星型惑星と天王星型惑星
 - 軌道不安定 → 大離心率惑星
 - ガス円盤との相互作用 → 灼熱巨大惑星

中質量円盤(~0.01太陽質量)

- 太陽系型惑星系

惑星系の多様性



汎(銀河系)惑星系形成論

対象

- 銀河系に普遍的に存在する多様な惑星系

目的

- 惑星系の起源と進化を観測と理論により解明する

観測

- 原始惑星系円盤の詳細な観測
- 統計的議論ができるほど多数の惑星系の観測

主題

- 比較惑星系形成論
- 観測的惑星進化論
- 惑星生命科学(地球型惑星での生命探査)

次世代の系外惑星系の観測

中心星と惑星系の関係の統一的理解

- 質量、金属量、進化段階への依存
- 恒星系、銀河環境への依存

8-10mクラスの既存望遠鏡の活用

系外惑星科学の展開

- 天体力学的情報: 自転、衛星、リング
- 惑星物理学的情報: 扁平率、磁場、組成

高コントラストスペー ス望遠鏡による撮像・分光

地球型惑星探査

- バイオマーカー

高コントラストスペー ス望遠鏡による撮像・分光