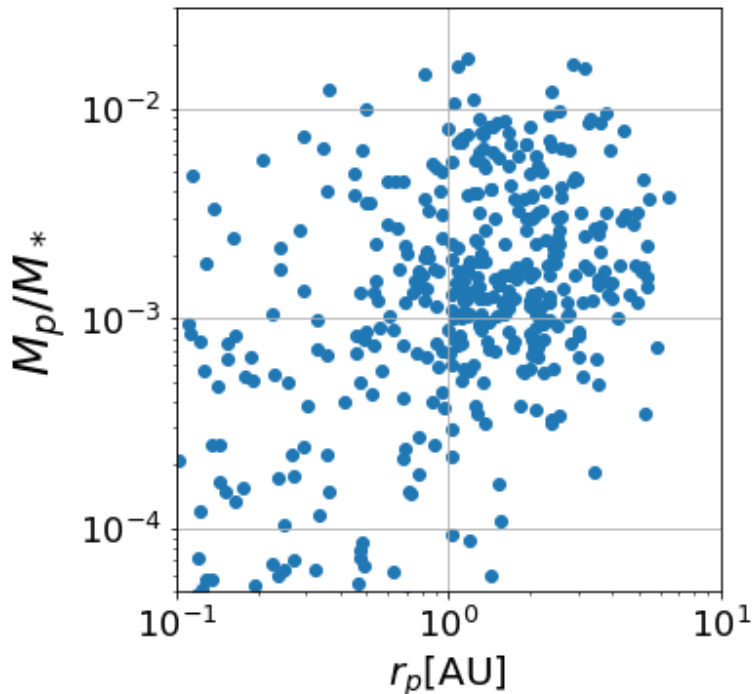


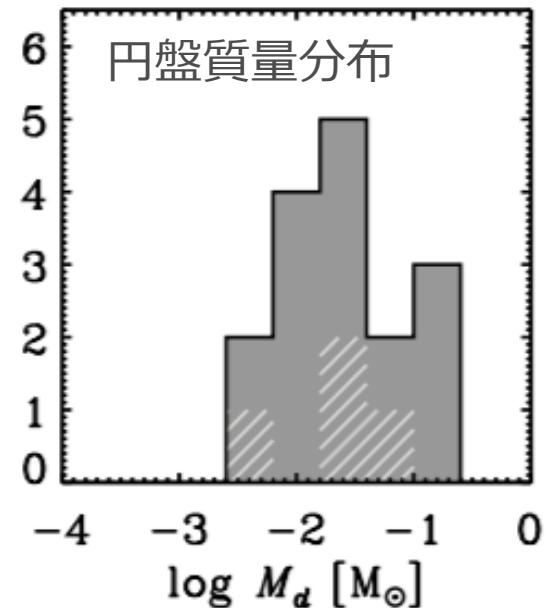
巨大惑星形成モデルで再現する 系外惑星分布

村瀬 清華(東北大B4)、田中秀和 (東北大)

系外惑星の質量と軌道半径



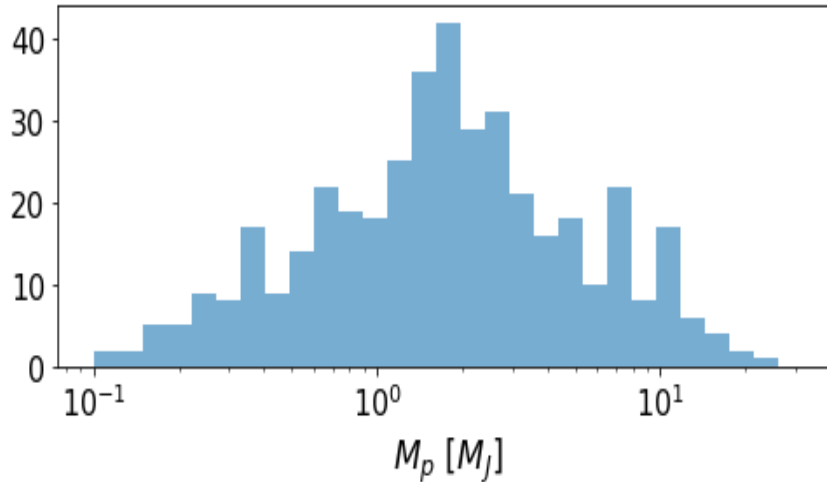
へびつかい座星形成領域の
サブミリ波観測(SMA)
(Andrews et al. 2010)



▶ 背景・目的

● 背景

系外惑星の質量分布

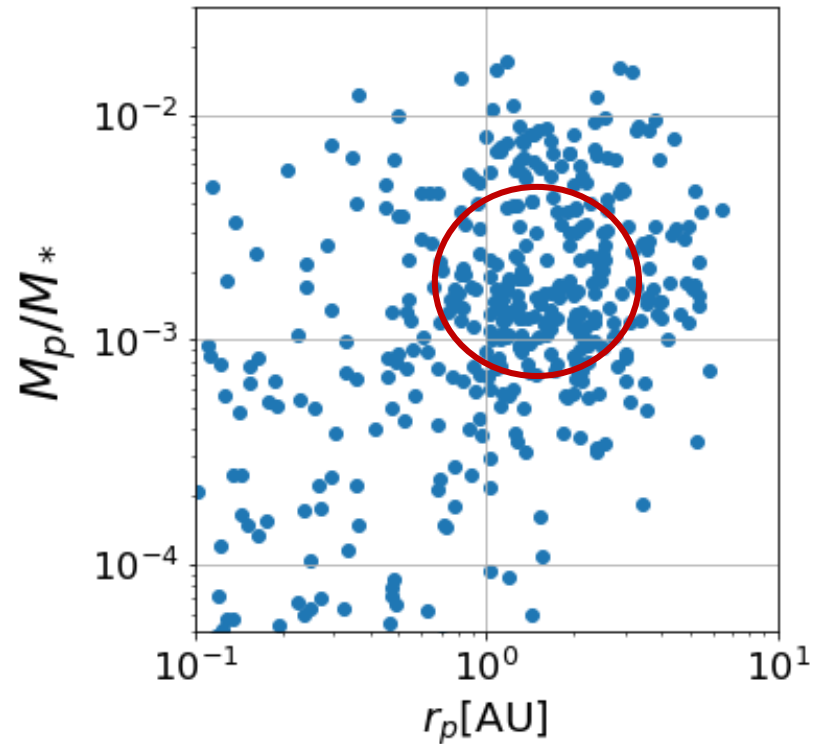


● 研究目的

巨大ガス惑星形成モデル (Tanigawa & Tanaka 2016)

- 分布を説明する
- 系外惑星を作った円盤はどのようなものか

ドップラー法で観測された系外惑星



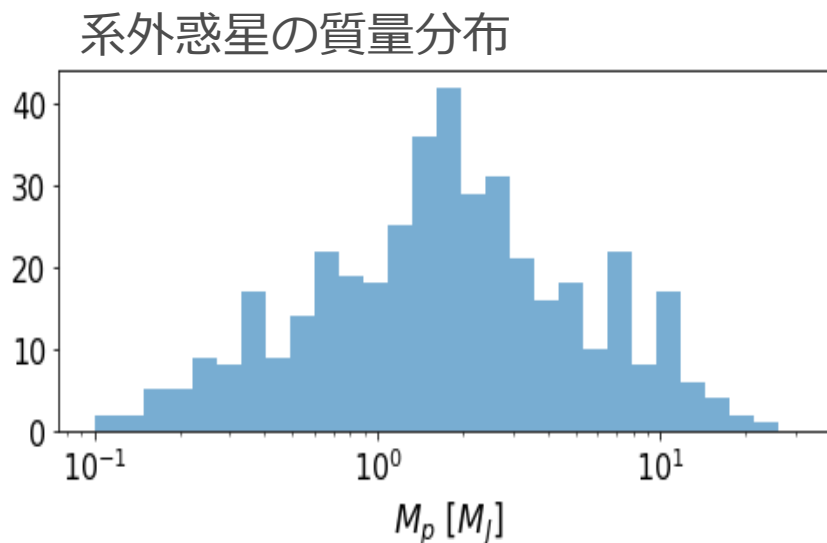
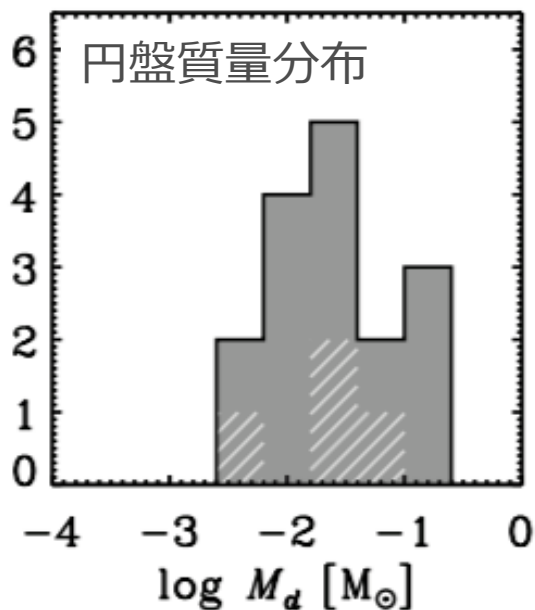
▶ 背景・目的

● 原始惑星系円盤

へびつかい座星形成領域の
サブミリ波観測(SMA)

→ 円盤質量などを推定
(Andrews et al. 2010)

観測で得られた
円盤質量分布から
系外惑星の質量分布を
説明できるか？

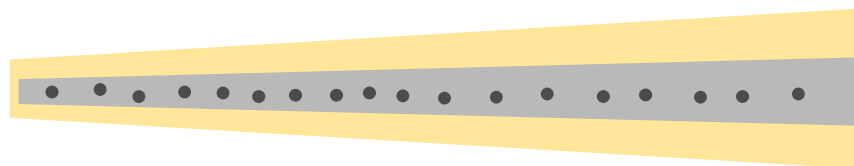


▶▶ 背景・目的

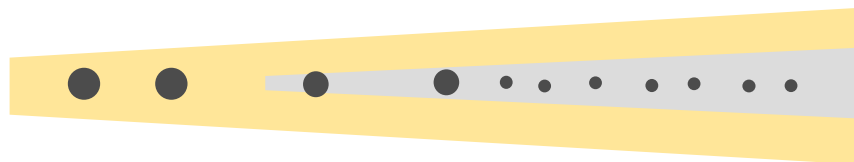
固体コアのガス捕獲による巨大惑星形成のモデル

(Tanigawa & Tanaka 2016)

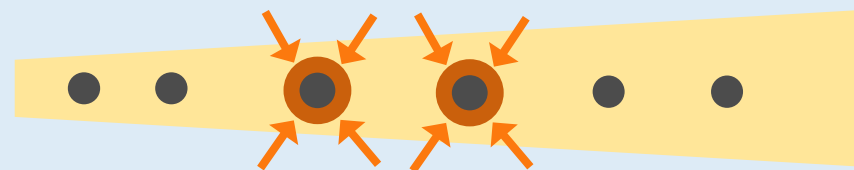
微惑星の形成



固体コアの形成



固体コアにガス降着



円盤の消失



$10^6 \sim 10^7 \text{ yr}$

モデル

惑星への質量降着率

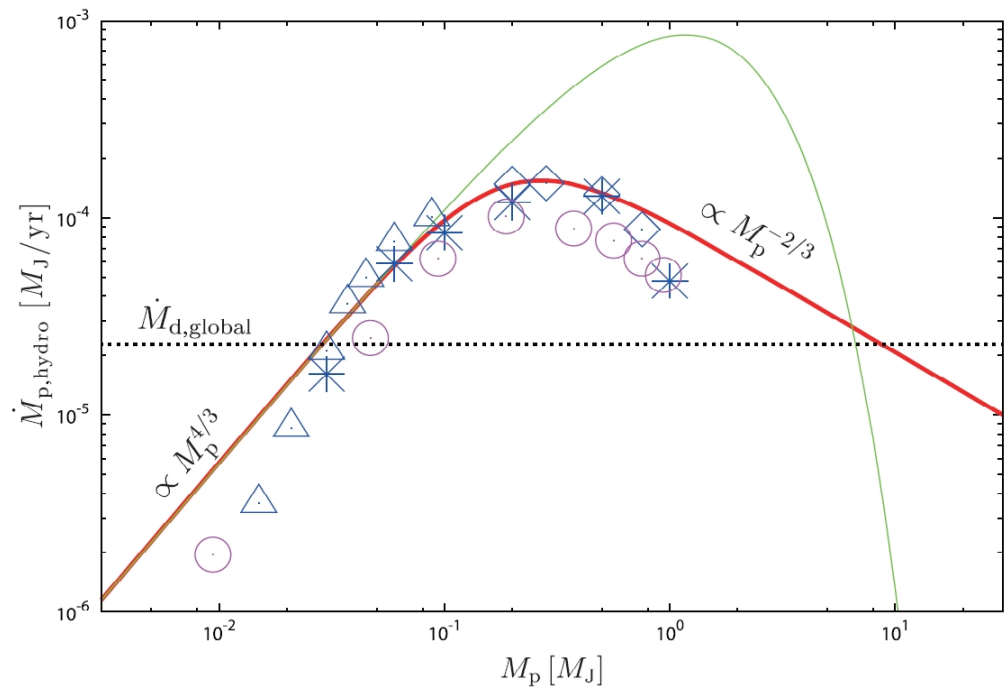
惑星移動速度

円盤モデル

▶ モデル (惑星)

● 惑星への質量降着率

$$\dot{M}_p = 0.29 \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^4$$



$\Sigma_2(r_p)$: 惑星軌道付近(gap内)の面密度

● 惑星移動速度(type 1, type 2) Kanagawa et al. (2018)

$$\dot{r}_p = -\frac{6r_p^3}{M_p} \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^2 \left(\frac{h_p}{r_p} \right)^{-2} \Omega_p \cdot \Sigma_2(r_p)$$

▶ モデル (惑星質量と軌道進化)

● 惑星への質量降着率

Tanigawa & Watanabe (2002)
Tanigawa & Tanaka (2016)

$$\dot{M}_p = 0.29 \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^{4/3} \left(\frac{h_p}{r_p} \right)^{-2} r_p^2 \Omega_p \cdot \Sigma_2(r_p)$$

$\Sigma_2(r_p)$: 惑星軌道付近(gap内)の面密度

● 惑星移動速度(type 1, type 2) Kanagawa et al. (2018)

$$\dot{r}_p = -\frac{6r_p^3}{M_p} \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^2 \left(\frac{h_p}{r_p} \right)^{-2} \Omega_p \cdot \Sigma_2(r_p)$$

▶ 結果 1

● 惑星の成長曲線

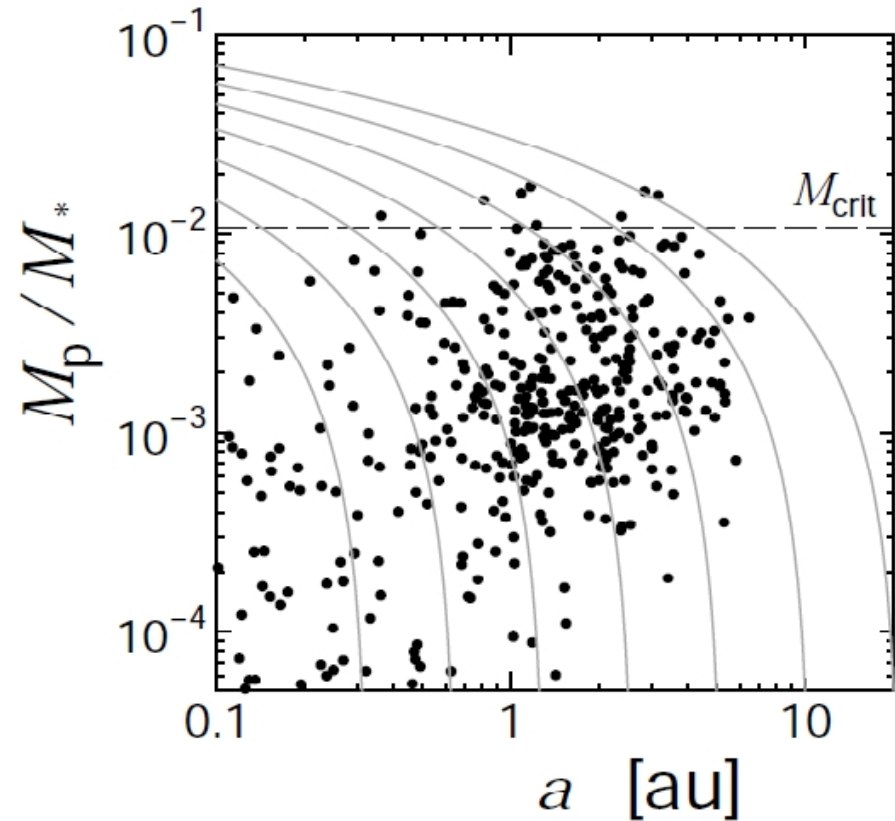
$$\frac{d \ln M_p}{d \ln r_p} = \frac{0.29}{6.0} \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^{-2/3} = \left(\frac{M_p}{M_{\text{crit}}} \right)^{-2/3}$$

$$M_{\text{crit}} = \left(\frac{0.29}{6.0} \right)^{3/2} M_* = 0.011 M_*$$

成長曲線は
円盤モデルに依存しない

- 最大の系外惑星も形成可能
- ~2AUに系外惑星の密集 ← ~3AUにコアが多数形成された

成長曲線と系外惑星分布



▶ 円盤モデル

円盤ガス面密度

粘性降着円盤の自己相似解 (惑星無し, 光蒸発無し)

$$\Sigma_0(r, t)$$

$$= \frac{M_{d,ini}}{2\pi R_0^2} \left(\frac{r}{R_0}\right)^{-1} t_{ss}^{-3/2} \exp\left(-\frac{r}{t_{ss} R_0}\right)$$

$M_{d,ini}$: 円盤初期質量

R_0 : 初期円盤半径

$$t_{ss} = 1 + \frac{t}{\tau_{ss}}, \quad \tau_{ss} = \frac{R_0^2}{3\nu_0}$$

円盤は中心星へ降着 → 惑星形成領域へ円盤ガス供給

円盤降着率 \dot{M}_d

$$\dot{M}_d = 3\pi\nu\Sigma_0 \propto t^{-\frac{3}{2}} \text{で減少}$$

▶ 円盤モデル

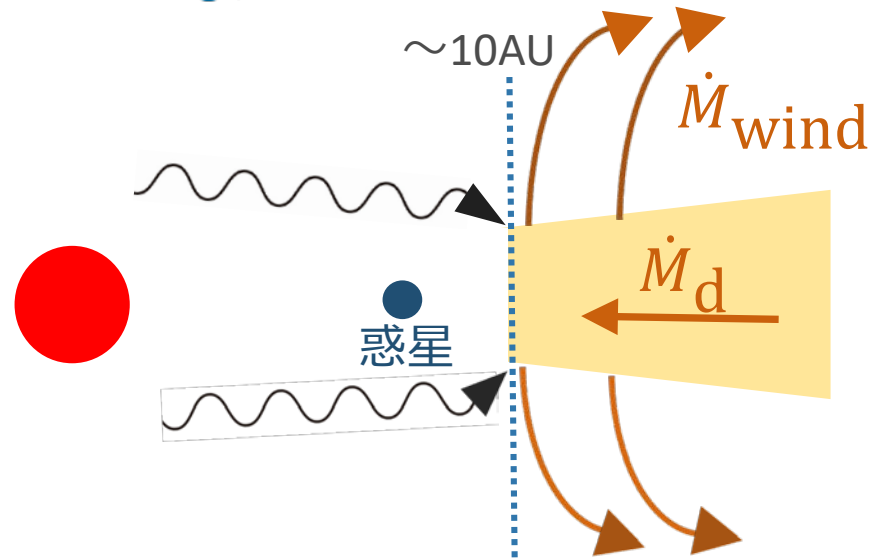
光蒸発による円盤ガス消失

中心星からの放射(FUV, EUV, X線)で円盤ガス消失

円盤消失率 $\dot{M}_{\text{wind}} : 10^{-10} \sim 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$

光蒸発を考慮した
惑星へのガス供給率

$$\begin{aligned}\dot{M}_{\text{supply}} \\ &= \dot{M}_{\text{d}} - \dot{M}_{\text{wind}}\end{aligned}$$



\dot{M}_{wind} : 惑星成長の終わりを決めるパラメータ

▶ 円盤モデル

円盤ガス面密度の低下 (1つの惑星の効果)

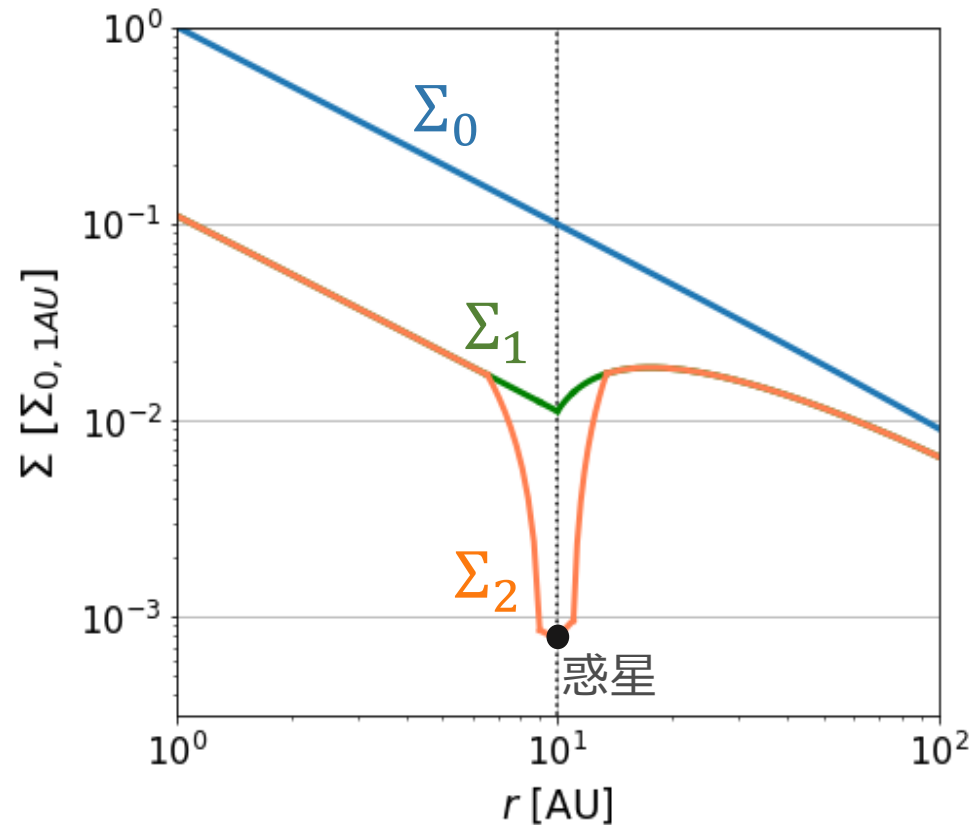
惑星へのガス降着による
面密度低下 (Tanigawa & Tanaka 2016)

$$\frac{\Sigma_1}{\Sigma_0} = \frac{\dot{M}_{\text{sup}} - \dot{M}_p}{\dot{M}_{\text{sup}}}$$

惑星が作るギャップによる
面密度低下 (Duffel & MacFadyen 2013
Kanagawa et al. 2015)

$$\frac{\Sigma_2}{\Sigma_1} = \frac{1}{0.04K+1}$$

$$K = \left(\frac{h_p}{r_p}\right)^5 \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \alpha^{-1}$$



円盤面密度分布

▶ 結果 2

円盤消失 と 惑星最終質量

光蒸発による円盤消失率と
円盤初期質量

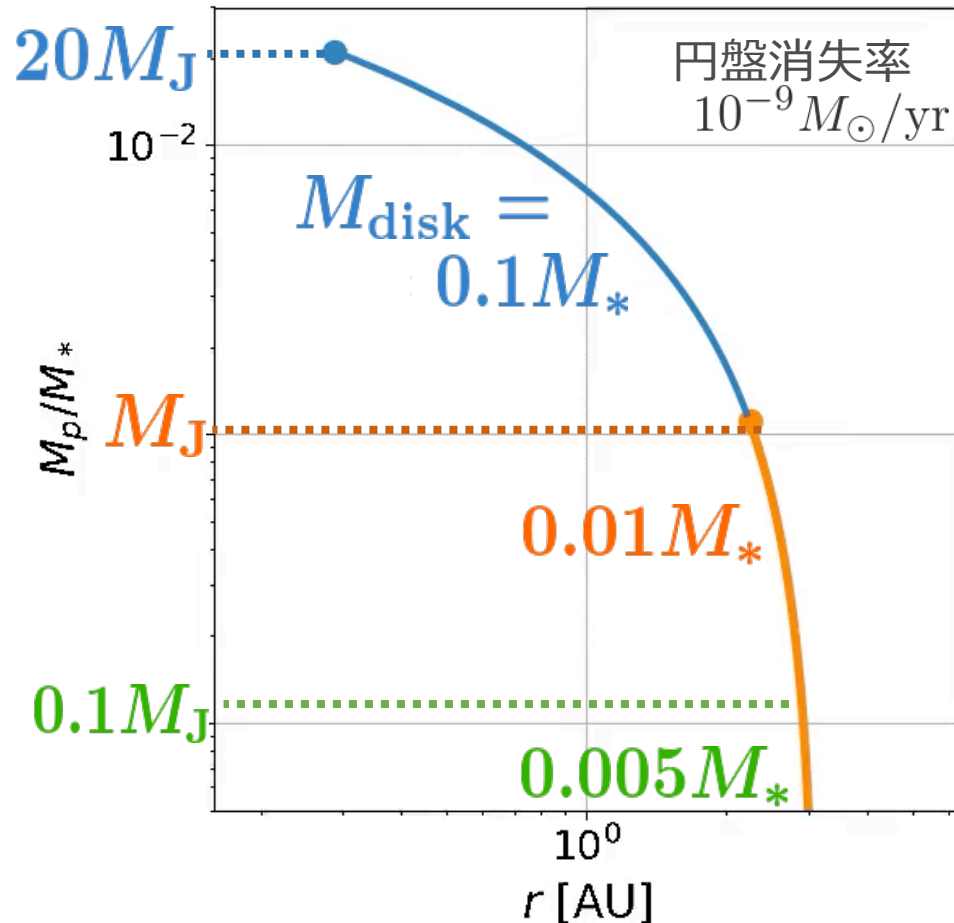


円盤消失時刻と惑星最終質量

各惑星の質量に対応し
円盤初期質量が1つ決まる

円盤初期質量：
惑星へのガス降着開始の円盤質量

円盤初期質量と惑星最終質量



▶ 結果 2

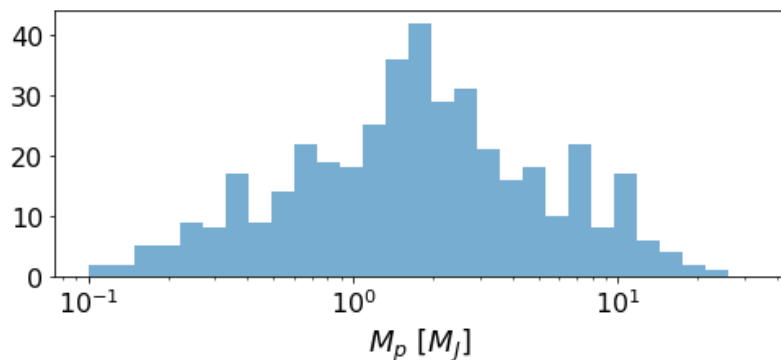
● 円盤初期質量分布の推定

惑星質量 \leftrightarrow 円盤初期質量

この対応関係から

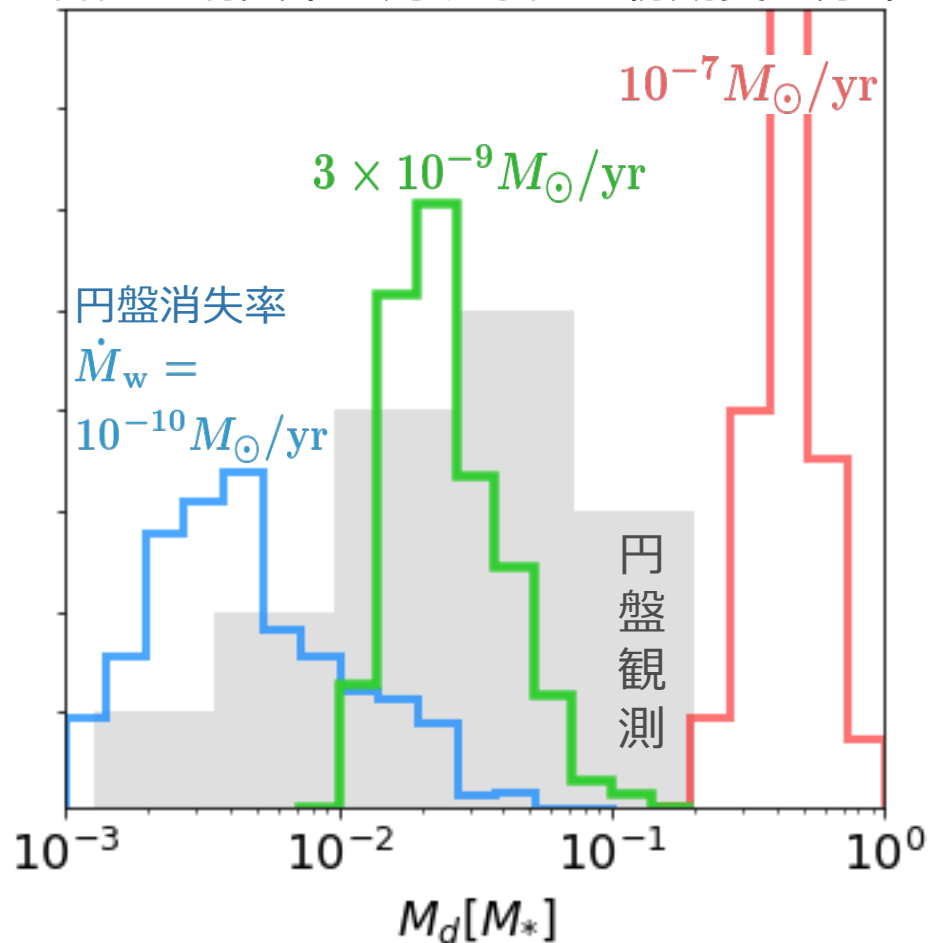
系外惑星の質量分布

→ 円盤の初期質量分布



$\dot{M}_{\text{wind}} = 3 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$
観測された円盤質量分布と近い

各円盤消失率に対する円盤初期質量分布

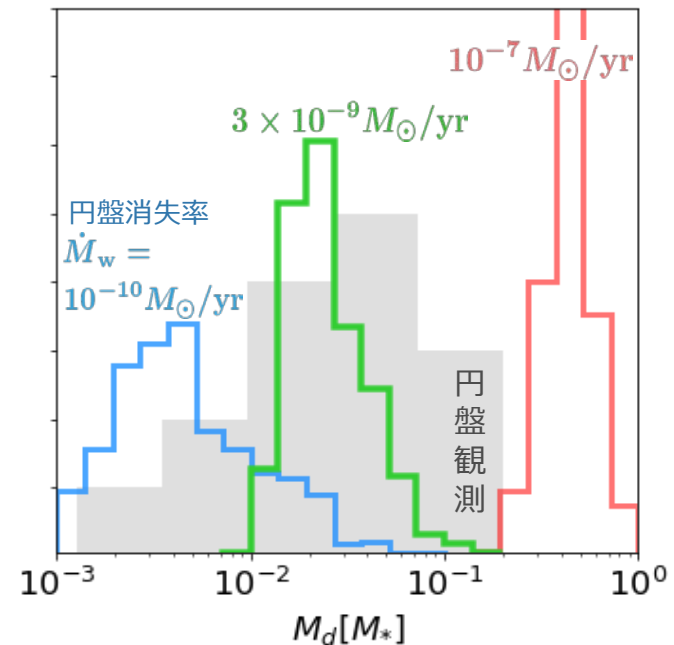
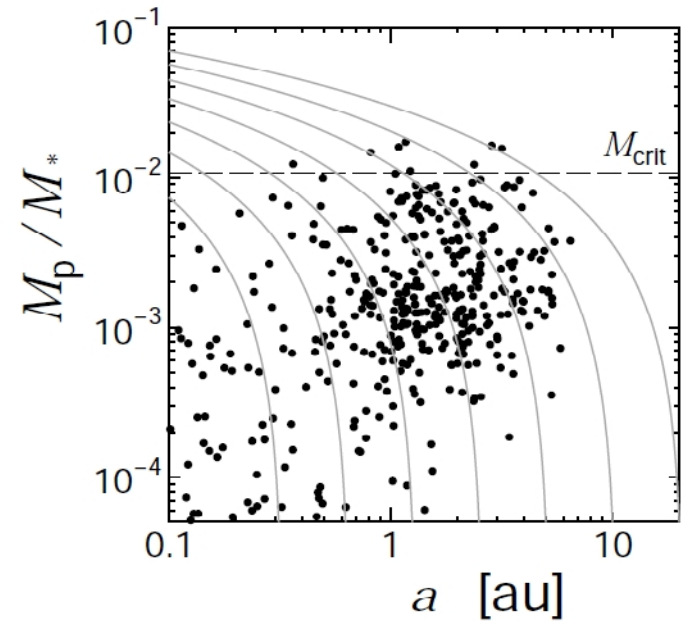


▶ まとめ

- 巨大惑星形成モデルで
系外惑星の分布全体を説明可能
- $\sim 2\text{AU}$ の系外惑星の密集は $\sim 3\text{AU}$ に
多数のコアが形成されたため
(スノーライン?)

- 系外惑星質量分布と
初期円盤質量分布を関連づけた

円盤消失率が $3 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$ の時
円盤質量分布と系外惑星分布は整合的



今後の課題

円盤初期質量分布の幅が合わない

- 同じ円盤に2つ以上惑星がいる効果
- 惑星軌道の離心率
- ガス降着率の再検討（数値流体計算）

円盤ギャップ + ガス降着 + 惑星移動