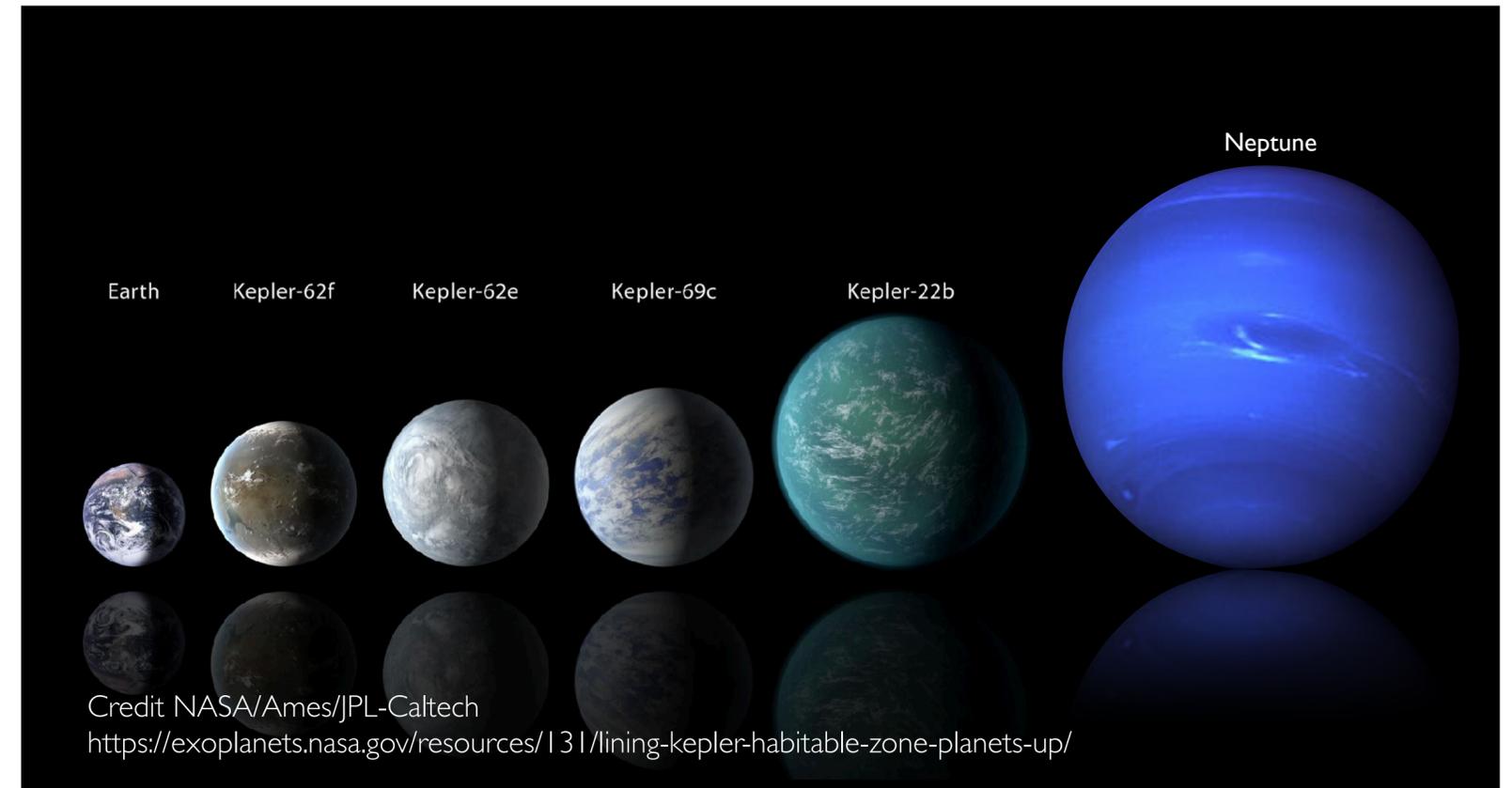
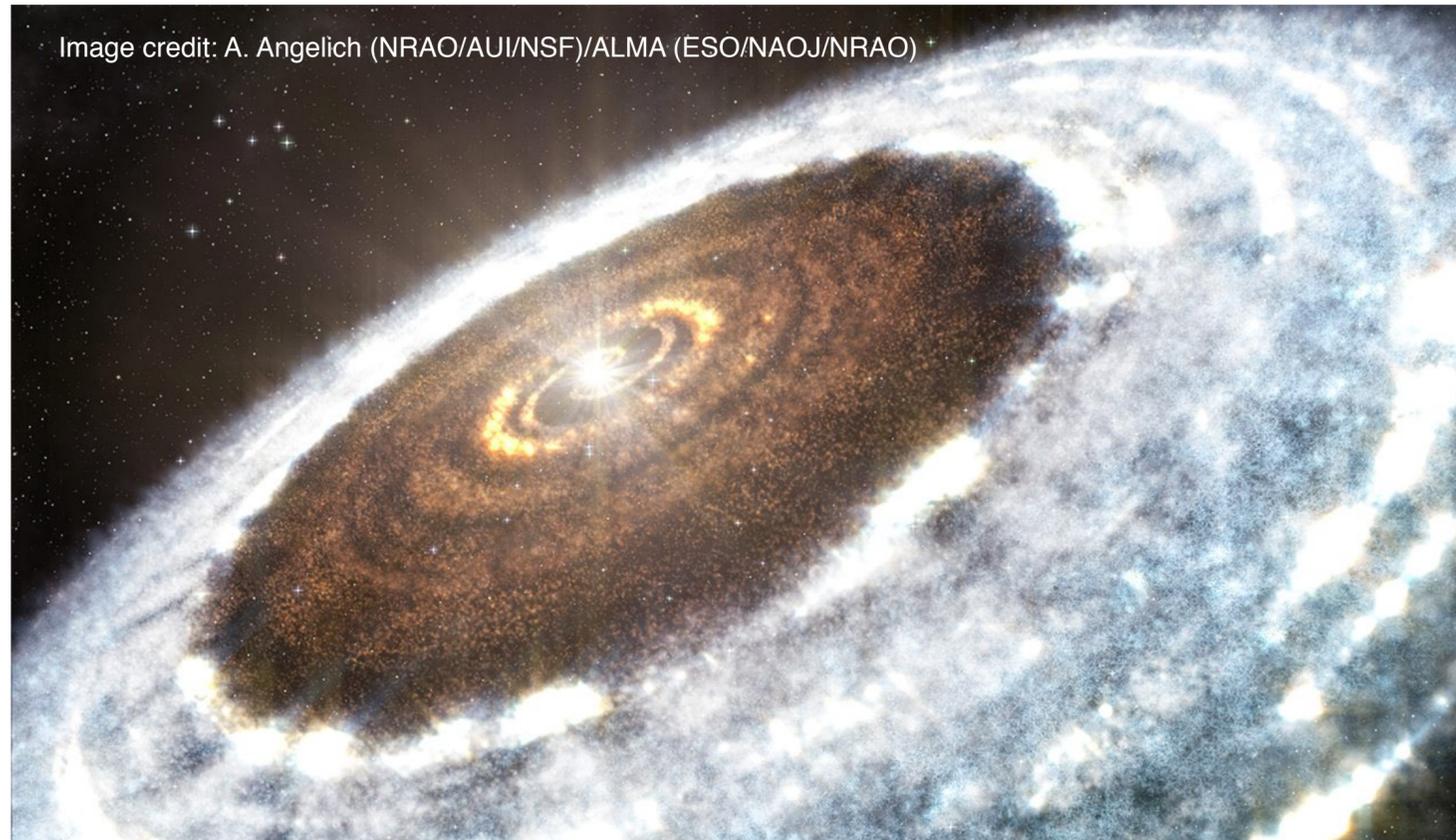


惑星形成理論の課題



Tokyo Tech

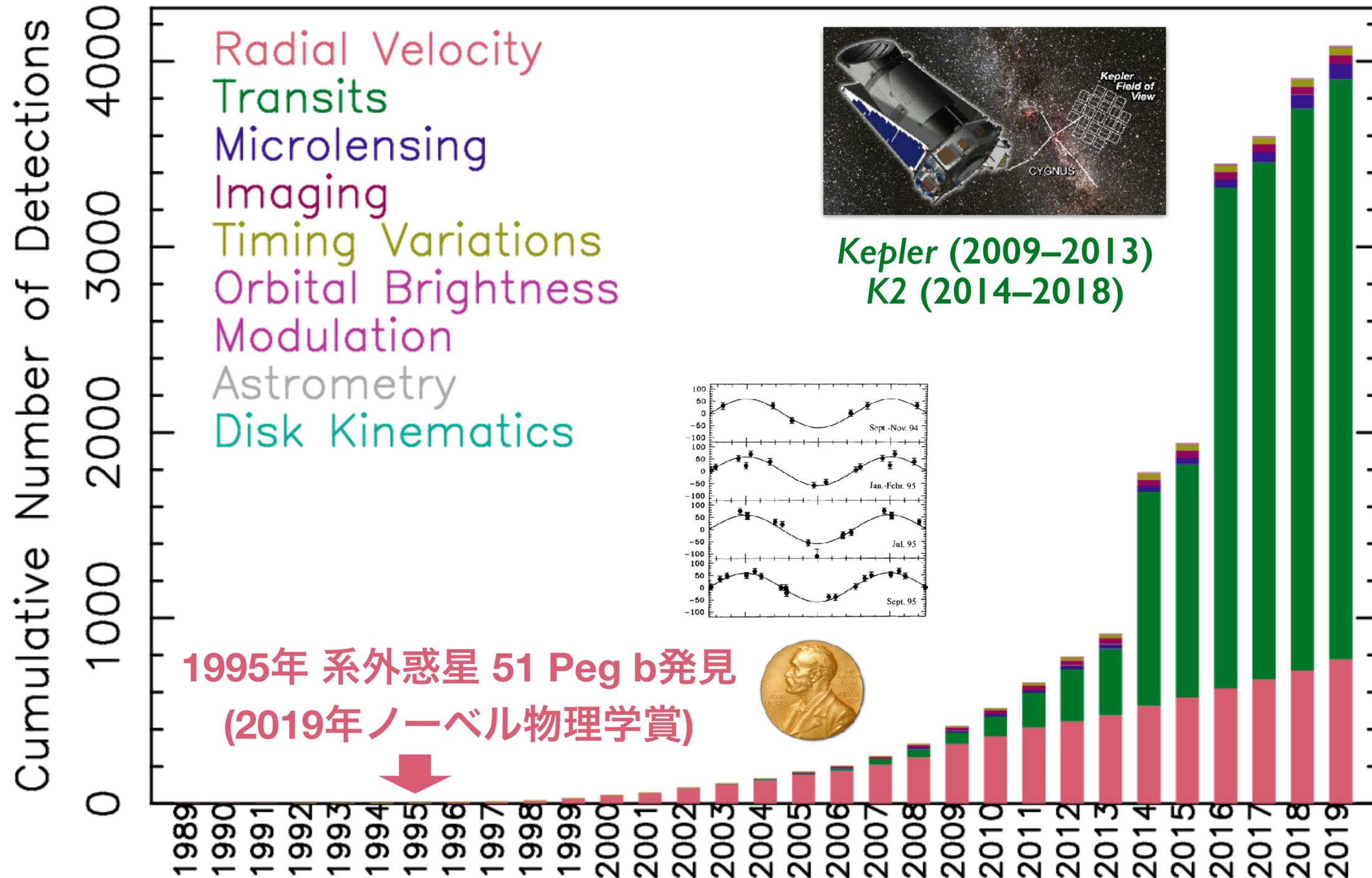
奥住 聡

東京工業大学 地球惑星科学系

理論懇 2019, 2019年12月26日

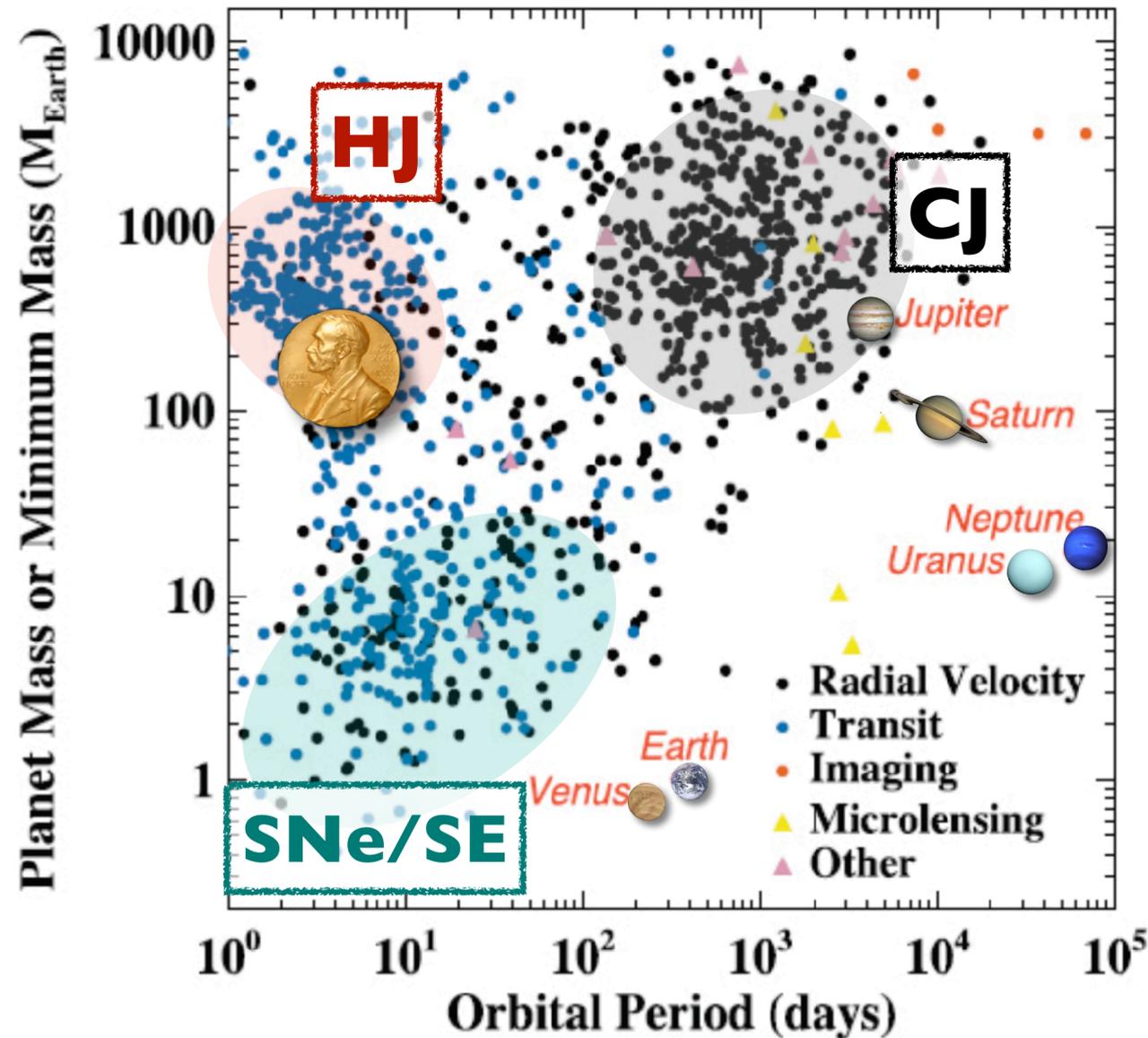
系外惑星探査の歴史

24 Oct 2019
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

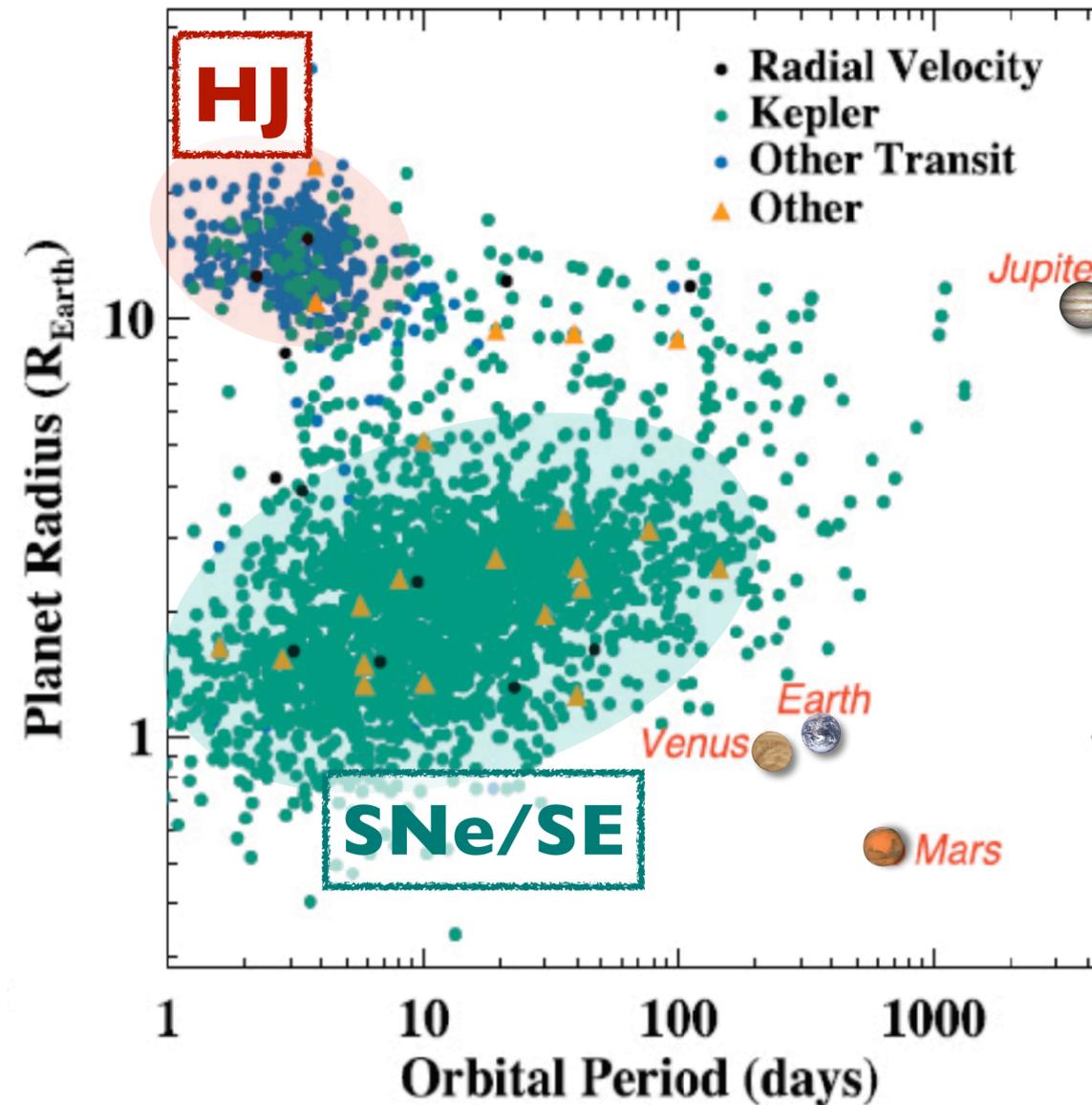


系外惑星の分布

惑星質量 - 公転周期



惑星半径 - 公転周期



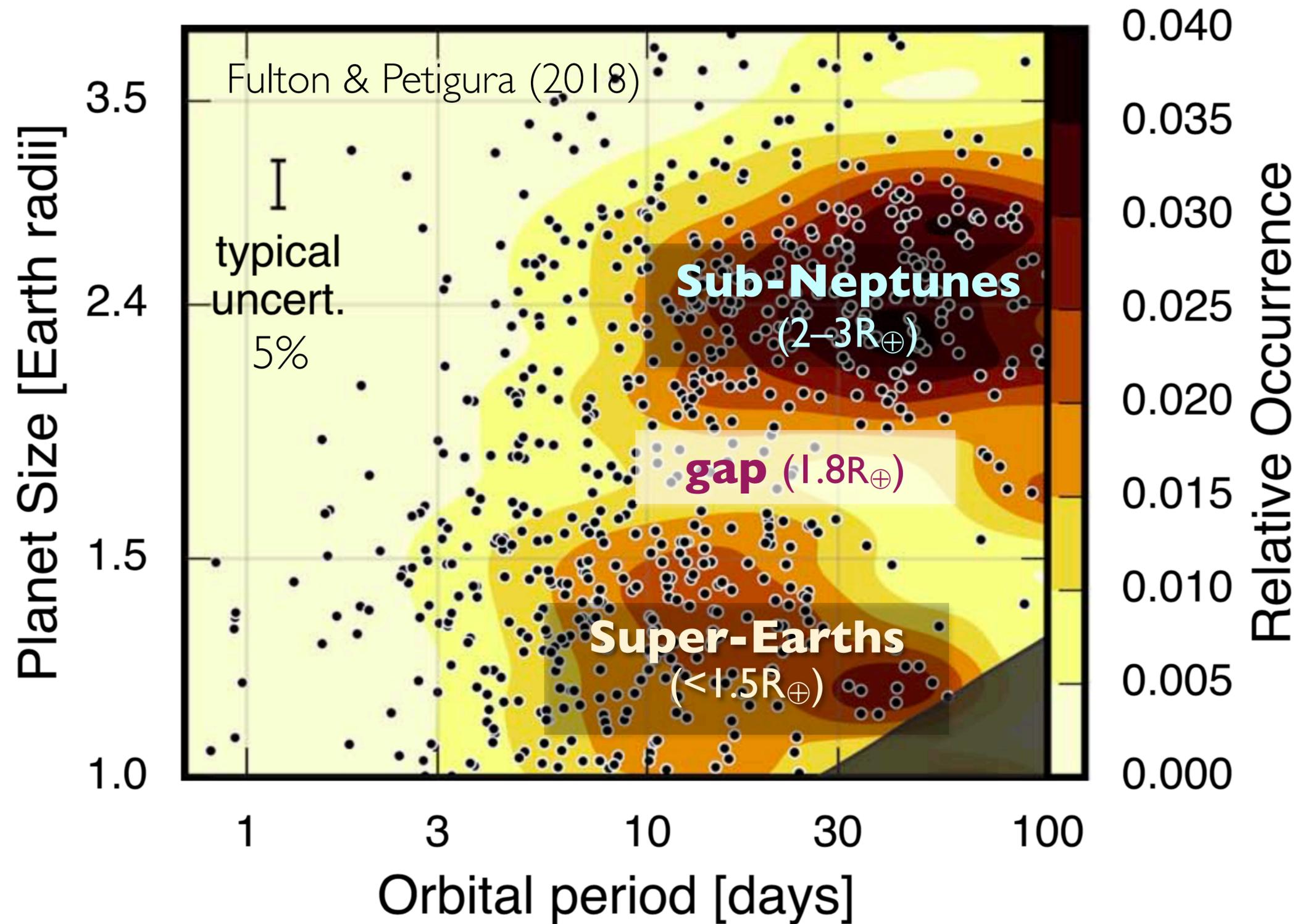
Hot Jupiters
(推定存在頻度 $\approx 1\%$)

Cold Jupiters
(推定存在頻度 $\sim 10\%$)

**Sub-Neptunes
/Super-Earths**
(推定存在頻度 $\sim 30\text{--}50\%$)

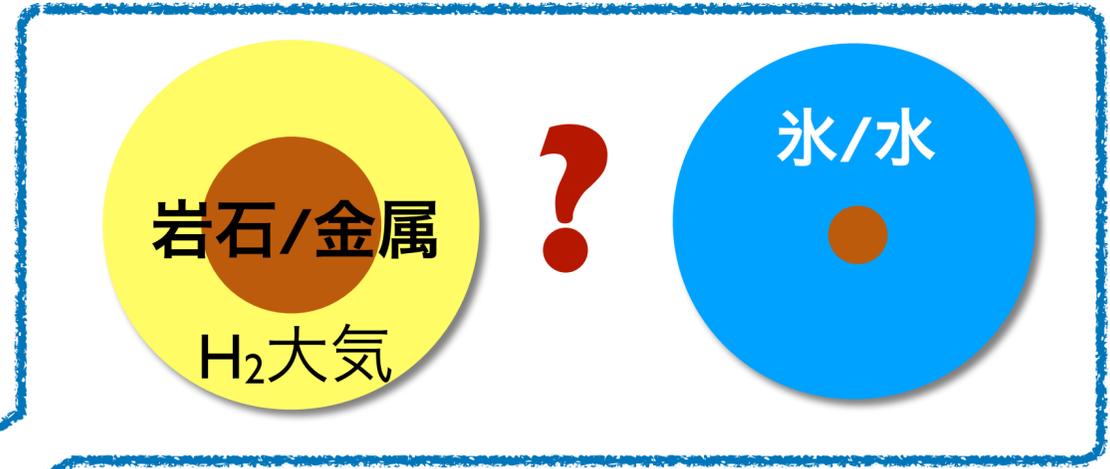
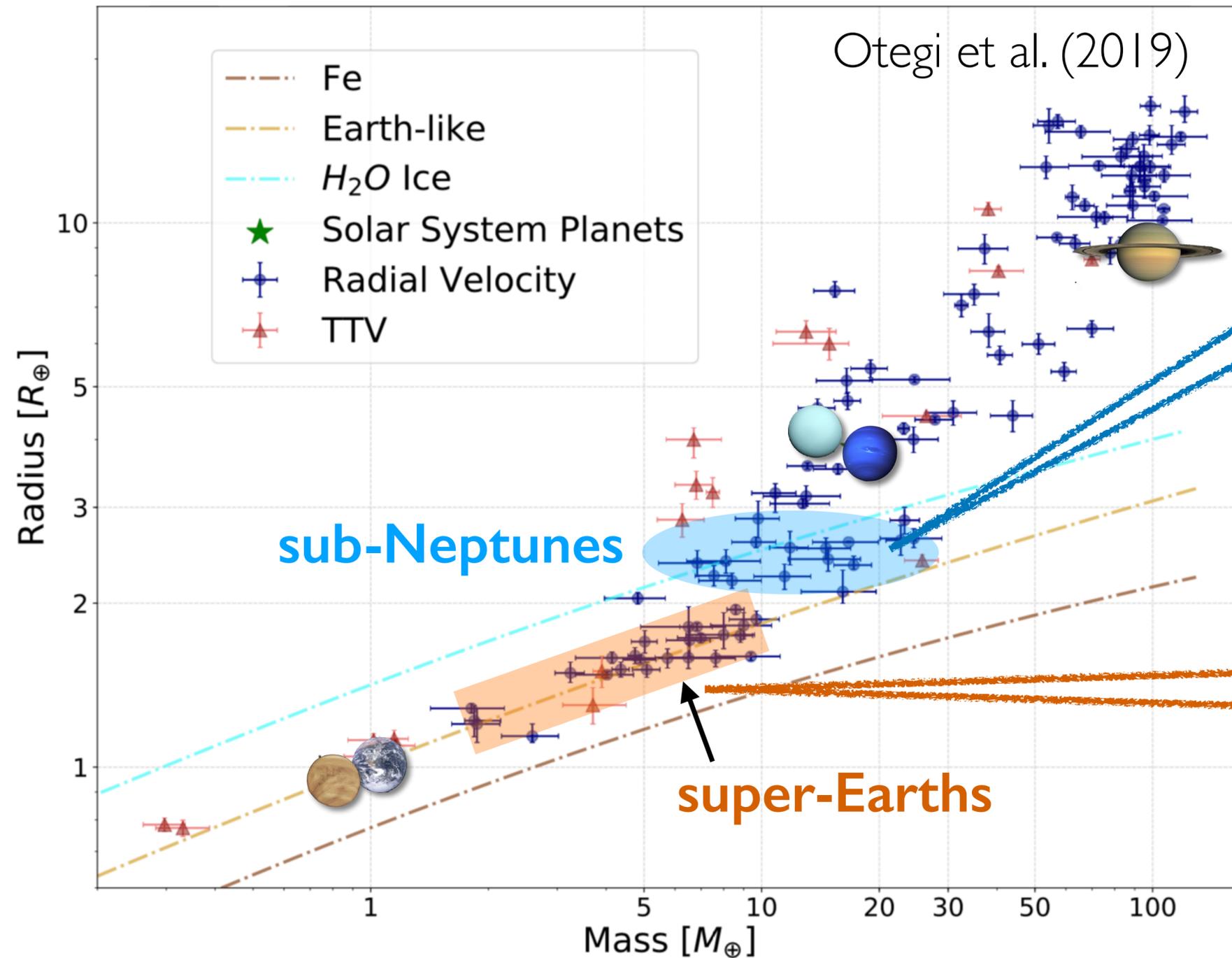
e.g., Zhu & Wu (2018)

短周期小型Kepler惑星の分布



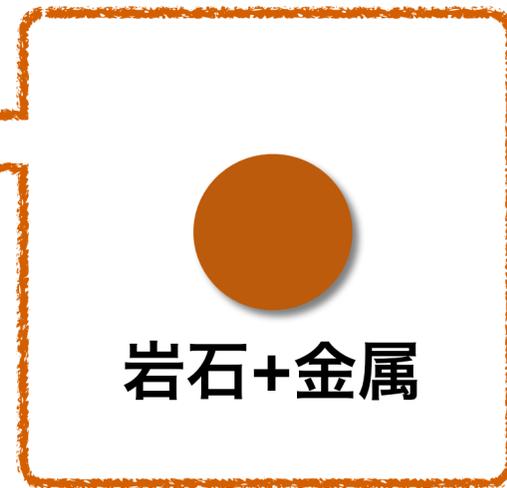
小型系外惑星は何でできているのか

質量-半径分布 (両方が高い精度で推定されている惑星のみ)



e.g. Adams et al. (2008)

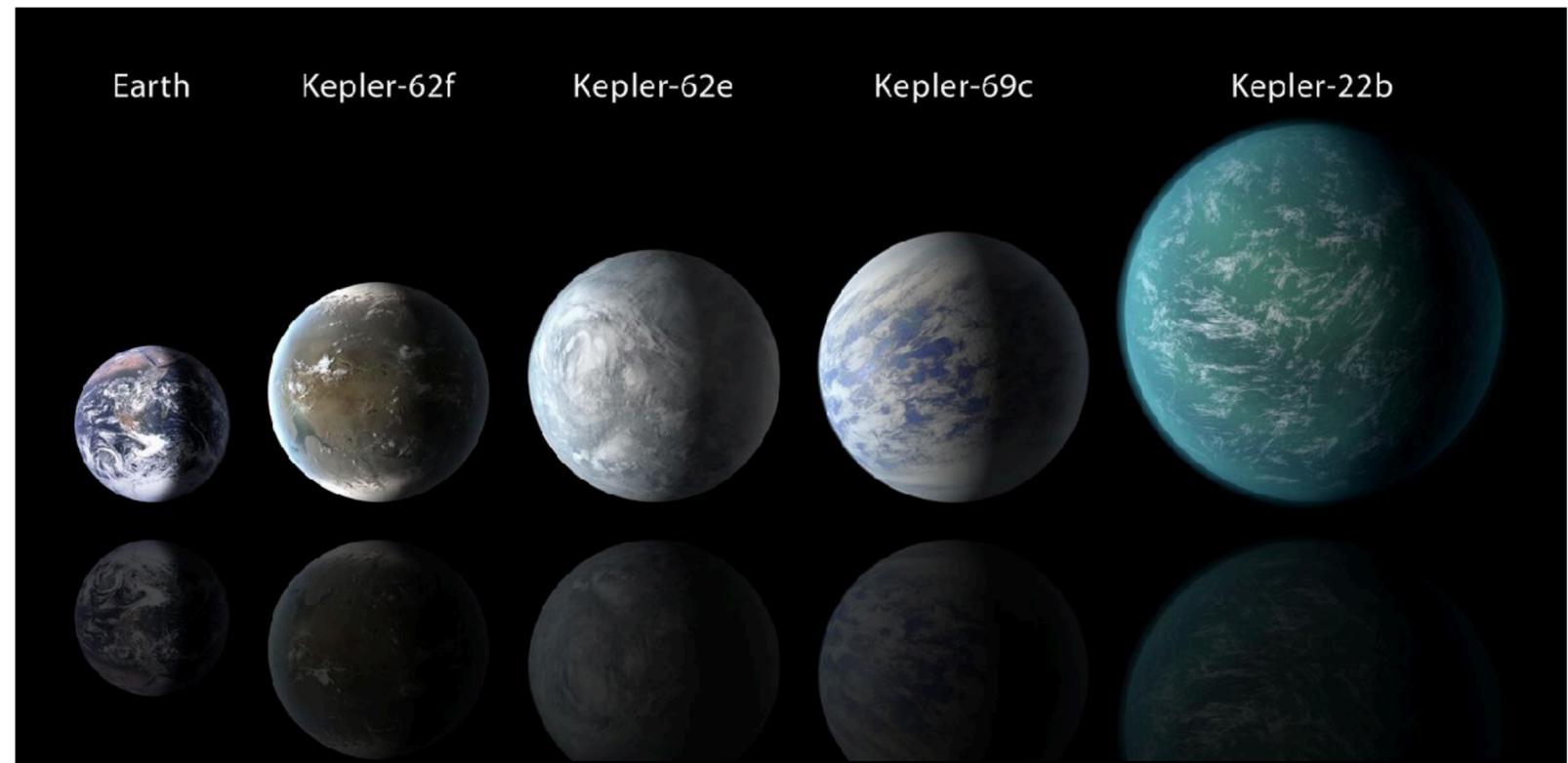
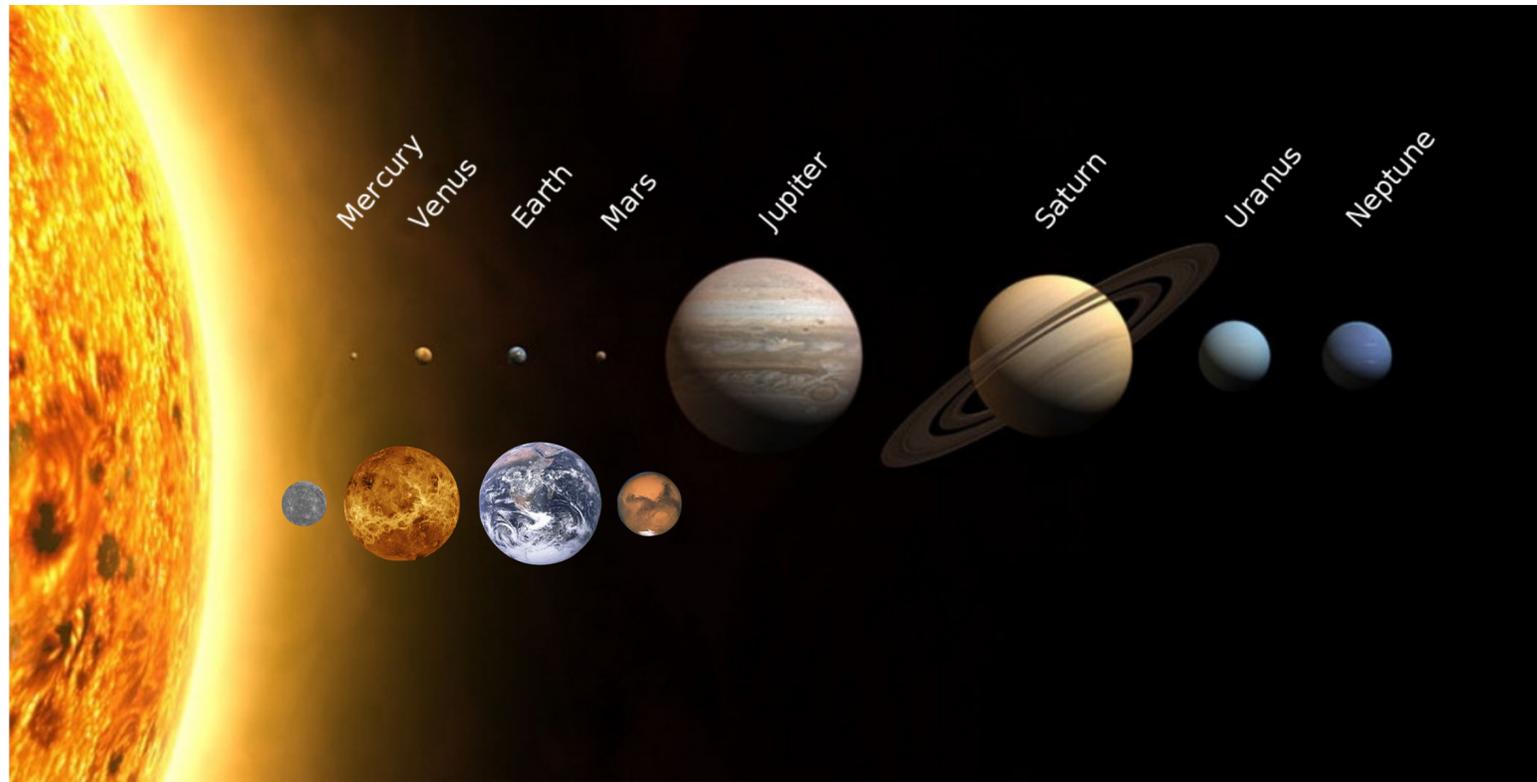
100% 水氷
70% 岩石 + 30% 鉄
100% 鉄



e.g. Dressing et al. (2015)

地球型惑星の仲間？

太陽系とスーパーアース系：基本的な問い

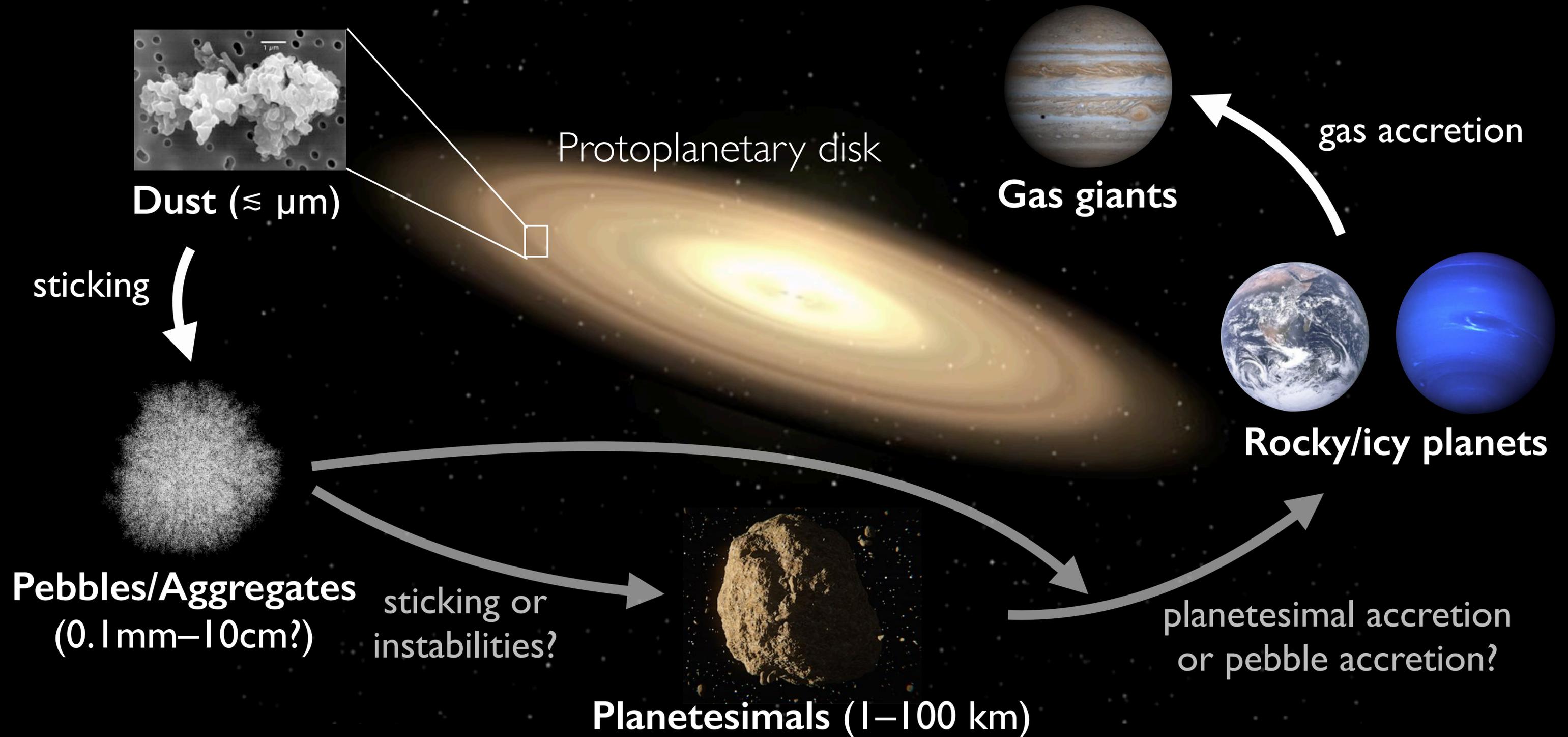


- 太陽系地球型惑星 (水金地火) は近接Super-Earthsの延長なのか？
- 地球などの岩石惑星は、原始惑星系円盤のどこからどこまでの場所できうるのか？
- なぜ太陽系には近接惑星が無いのか？

円盤から固体惑星の誕生する過程は、直接観ることはできない

→ 理論 (惑星形成論) が必要

惑星形成論：原始惑星系円盤から惑星まで

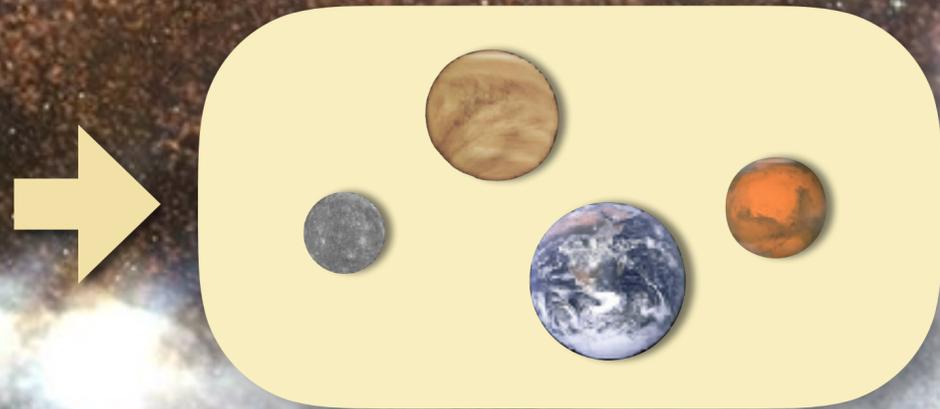


スノーライン: 岩石と氷の世界の境界

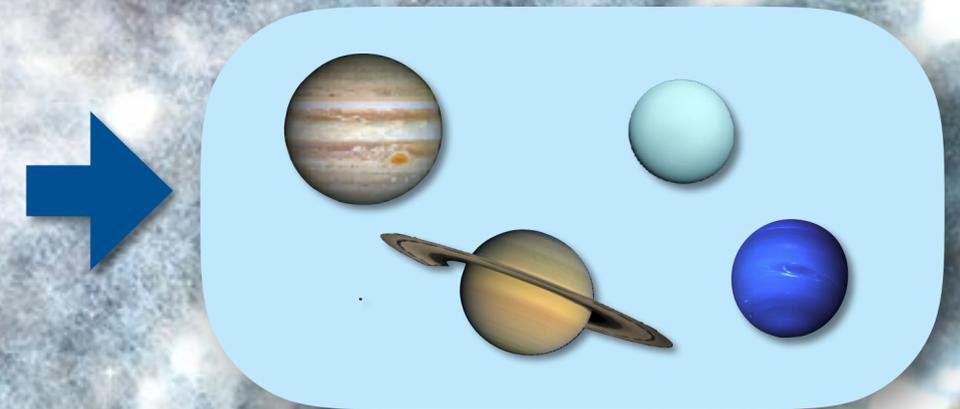
中心星

$T =$ 水氷の昇華温度
($\sim 150-170\text{K}$)

岩石(シリケイト)ダスト

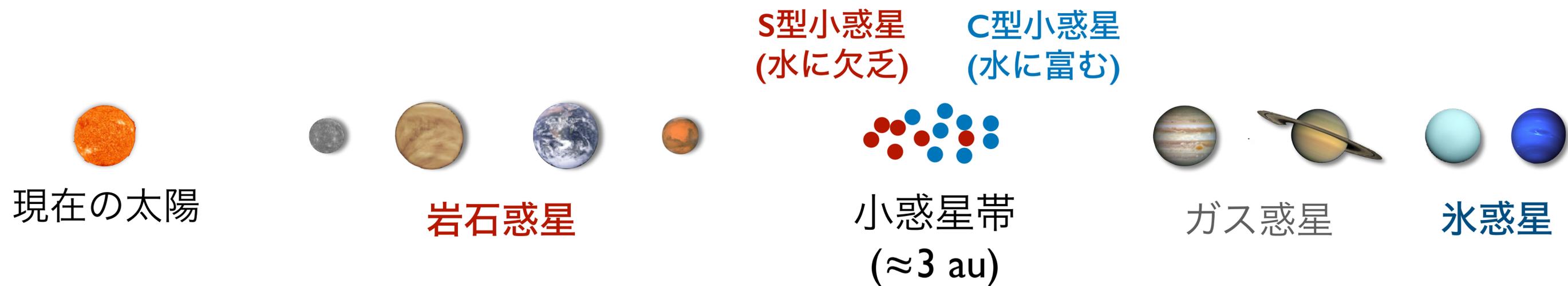
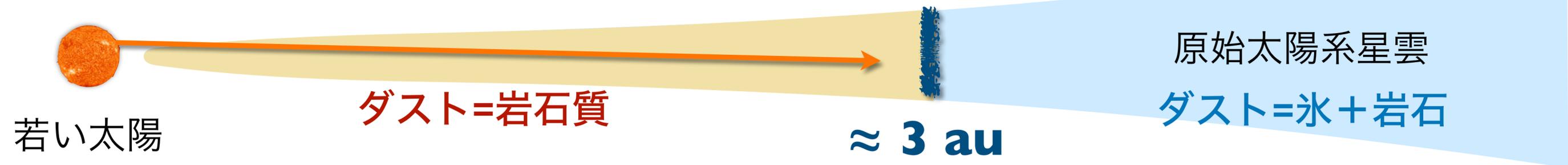


岩石+氷ダスト



スノーラインと太陽系形成：古典論 (神話?)

光学的に薄い円盤: $T = \left(\frac{L_*}{16\pi\sigma_{\text{SB}}r^2} \right)^{1/4} \approx 160 \left(\frac{r}{3 \text{ au}} \right)^{-1/2} \left(\frac{L_*}{L_{\odot}} \right)^{1/4} \text{ K}$ (e.g., Hayashi 1981)



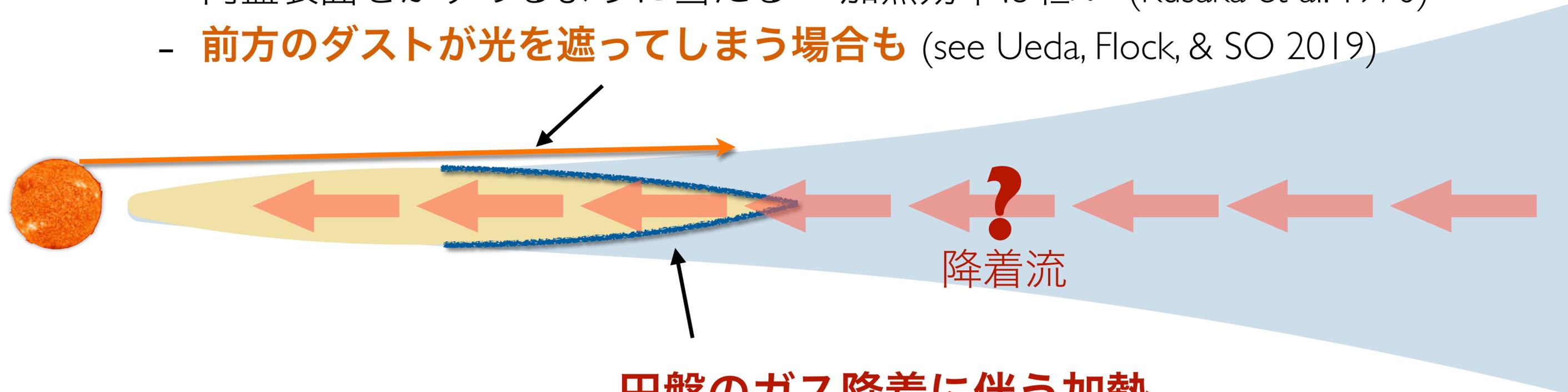
ダストも天体もスノーラインも移動しなければ、
太陽系の氷(水)の分布はきれいに説明される

問題：スノーラインは本当はどこにあるのか？

惑星形成期 (特に前半) の円盤は、ダストの存在のために光学的に厚い。
光学的に厚い円盤の温度構造ははるかに複雑：

中心星による照射

- 円盤表面をかすめるように当たる→加熱効率は低い (Kusaka et al. 1970)
- **前方のダストが光を遮ってしまう場合も** (see Ueda, Flock, & SO 2019)

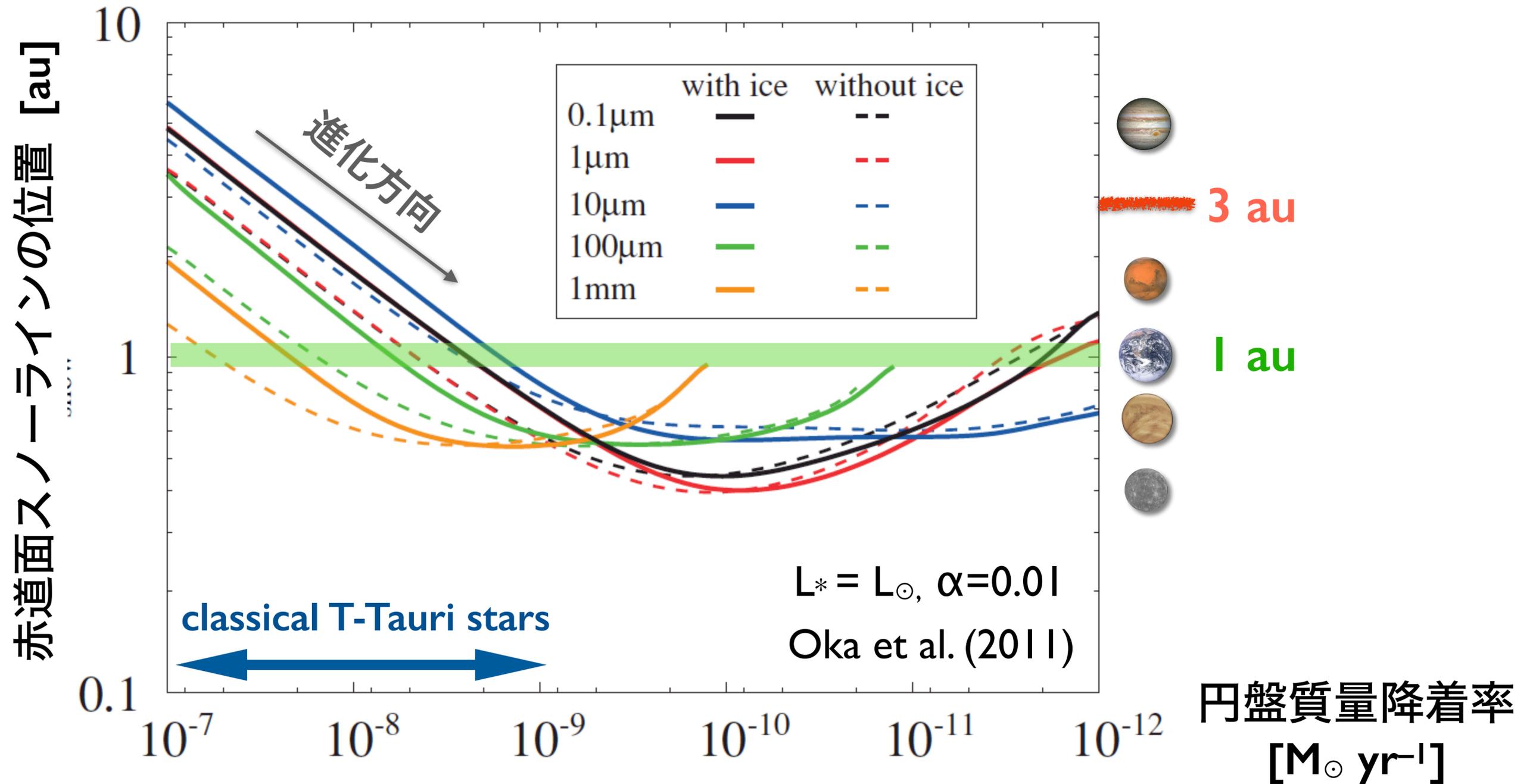


円盤のガス降着に伴う加熱

- 通例、一様粘性円盤を仮定して評価 (e.g. Oka et al. 2011; Bitsch et al. 2015)
- 本当は、**どの高度で降着(発熱)が起こるか**に気をつけなければならない

スノーラインの進化の例：一様粘性モデル

(=赤道面で降着が効率よく起こる)



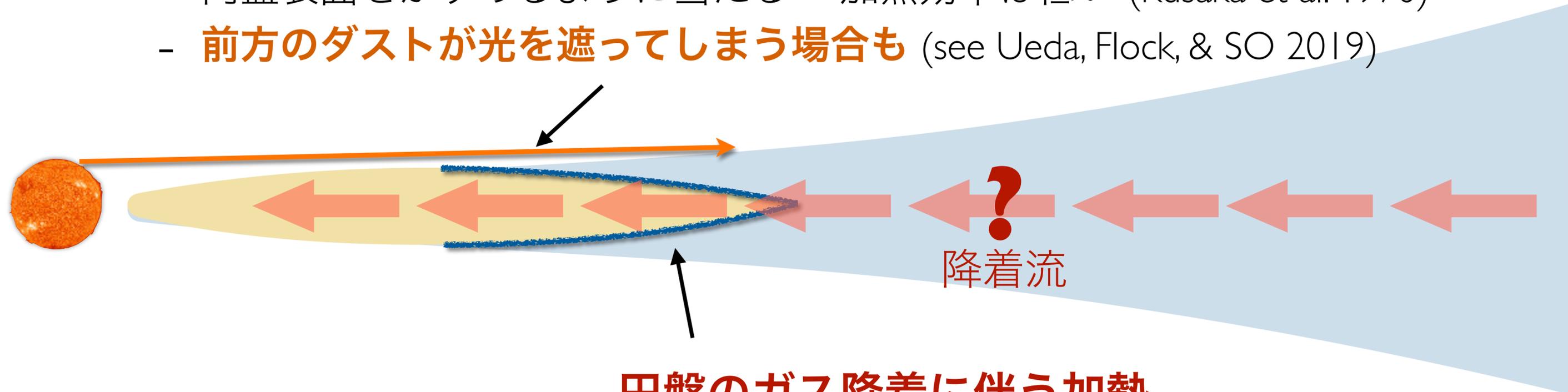
木星軌道(5au)から水星軌道(0.4au)まで大々的に移動

問題：スノーラインは本当はどこにあるのか？

惑星形成期 (特に前半) の円盤は、ダストの存在のために光学的に厚い。
光学的に厚い円盤の温度構造ははるかに複雑：

中心星による照射

- 円盤表面をかすめるように当たる→加熱効率は低い (Kusaka et al. 1970)
- **前方のダストが光を遮ってしまう場合も** (see Ueda, Flock, & SO 2019)



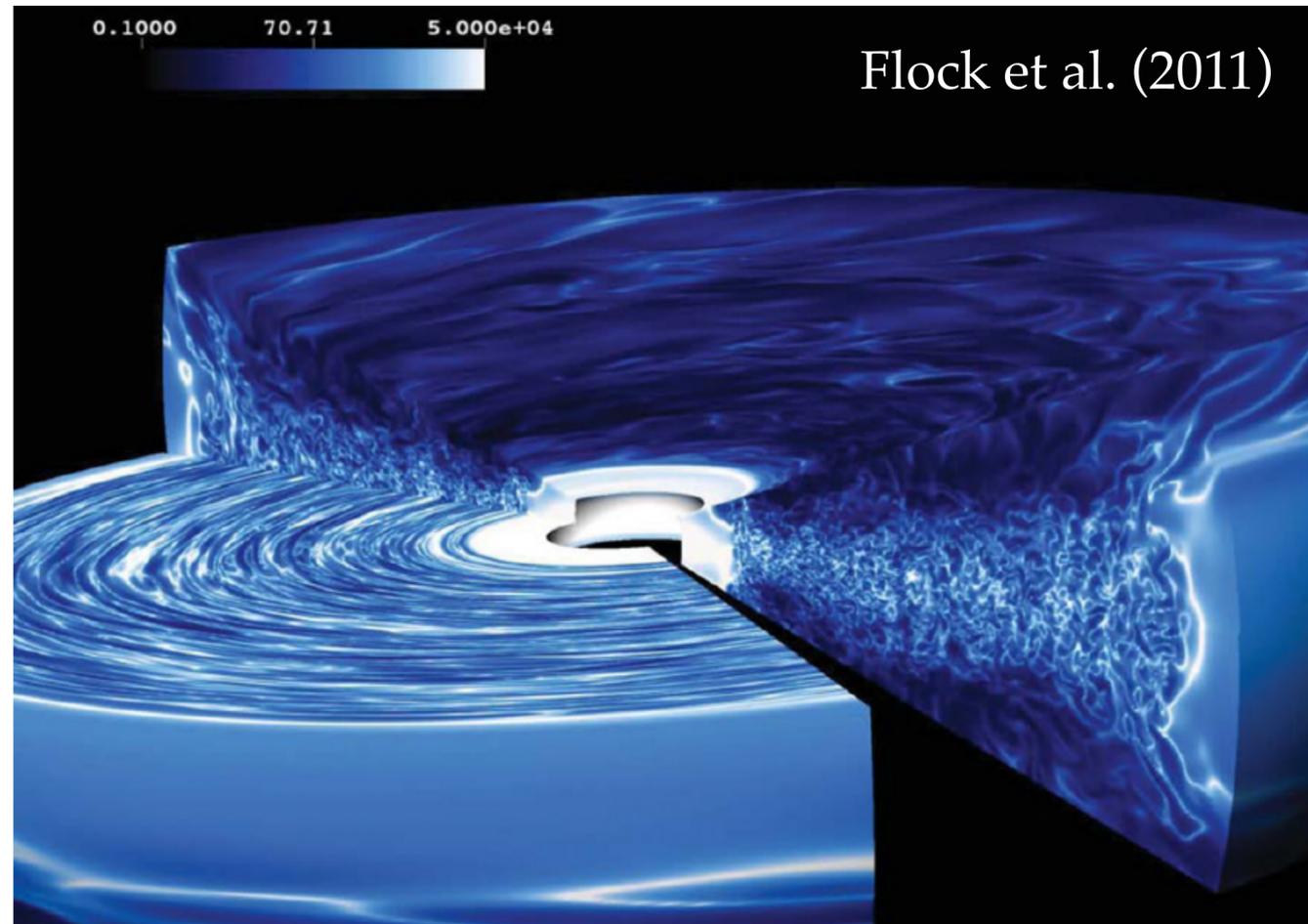
円盤のガス降着に伴う加熱

- 通例、一様粘性円盤を仮定して評価 (e.g. Oka et al. 2011; Bitsch et al. 2015)
- 本当は、**どの高度で降着(発熱)が起こるか**に気をつけなければならない

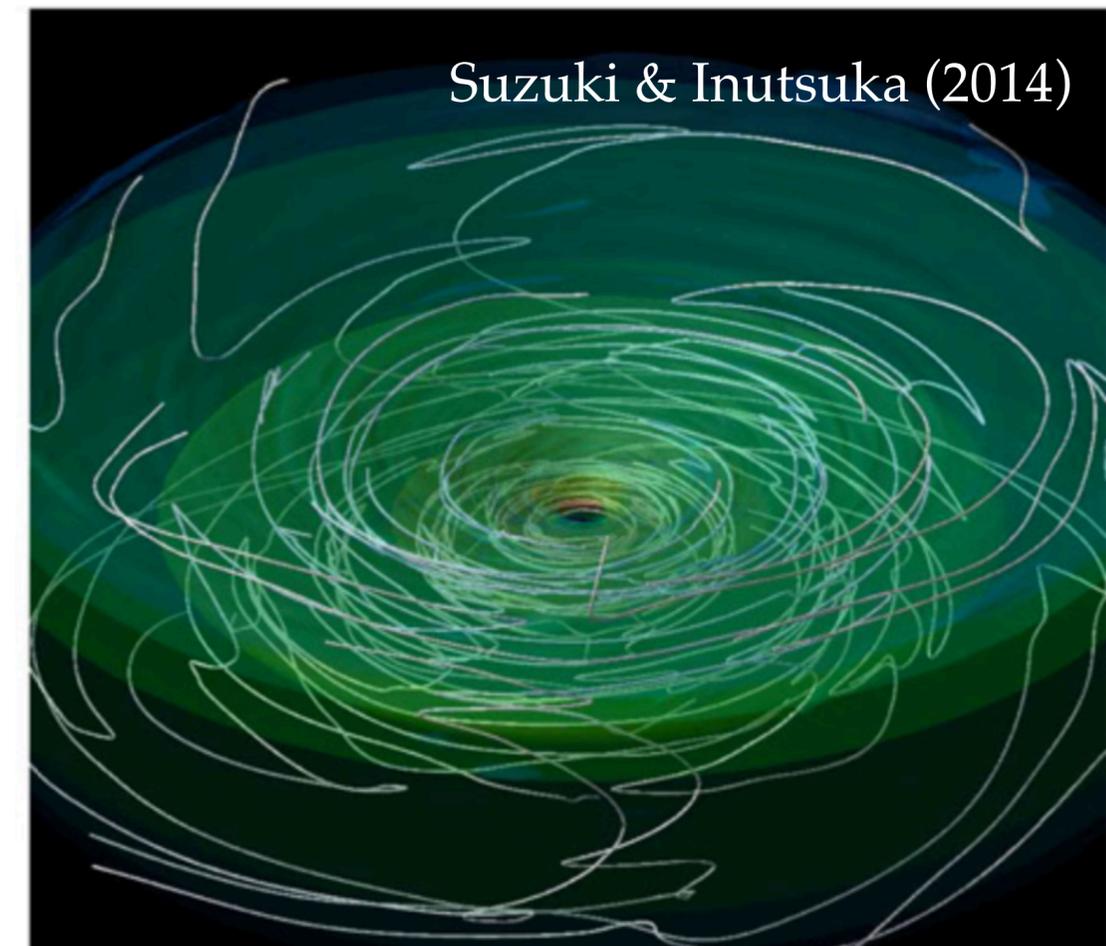
現実の原始惑星系円盤の降着：現状の理解

- おそらく磁場と円盤の相互作用 (MHD) が最も重要

磁気乱流による角運動量の輸送
(e.g., Balbus & Hawley 1991)



磁気駆動風による角運動量の持ち去り
(e.g., Blandford & Payne 1982)

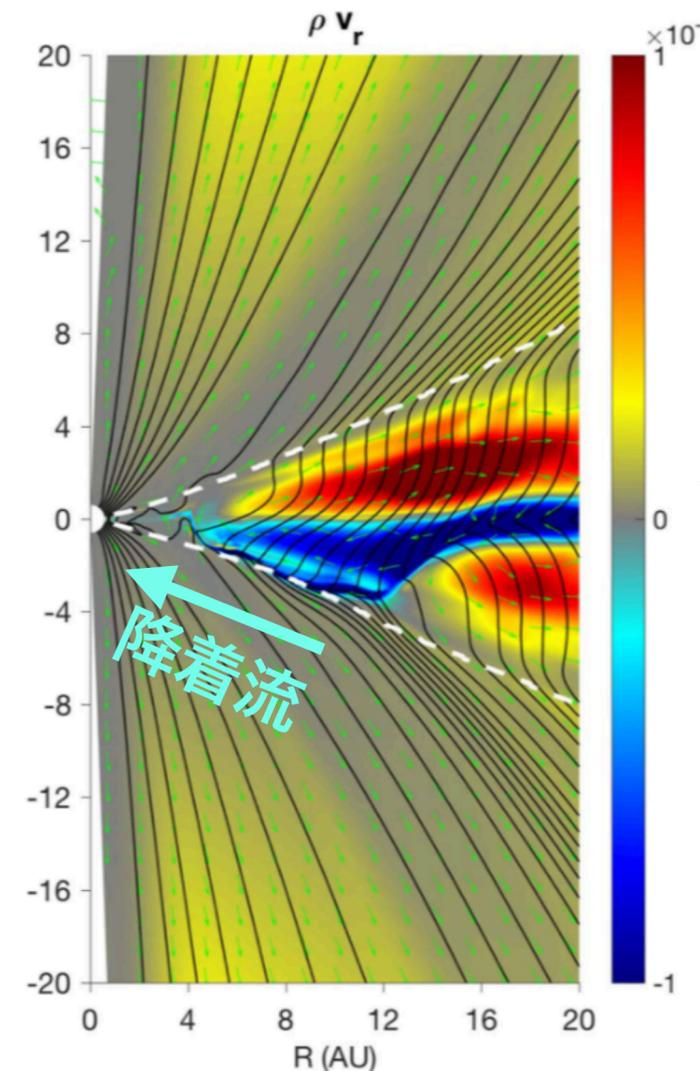
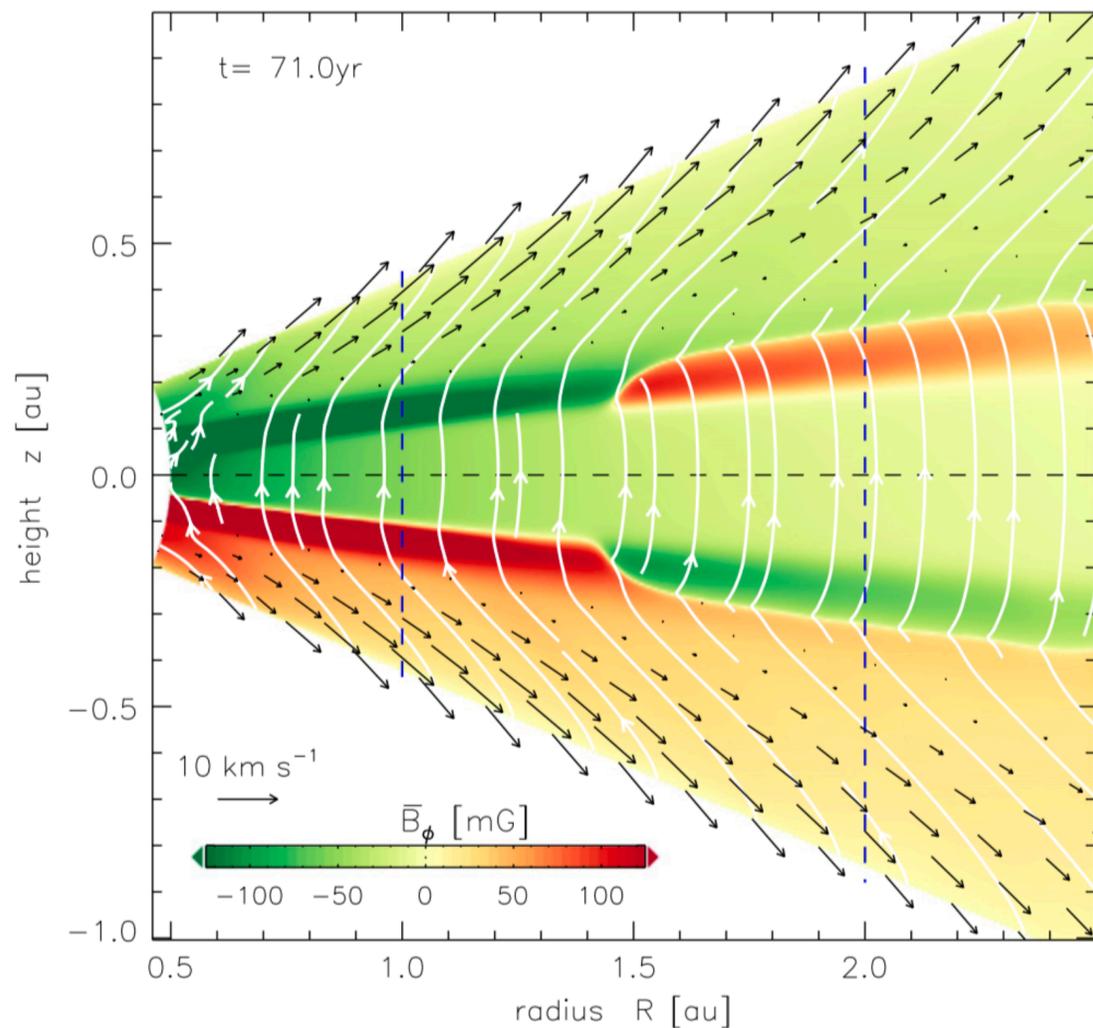


- ただし、円盤の大部分は弱電離なので、**非理想MHD効果(電気抵抗)** が本質的

原始惑星系円盤の磁気駆動降着：近年の進展

- 密度に応じた非理想効果 (オーム抵抗, ホール効果, 両極性拡散) と円盤空間構造を考慮したMHD計算が登場 (Bai 2013, 2015, 2017; Lesur et al. 2014; Gressel et al. 2015, ...)
- 現状の理解：1–10 au付近での降着は **円盤表面** (比較的高電離度) で起こる

オーム抵抗
+ 両極性拡散
(Gressel et al. 2015)

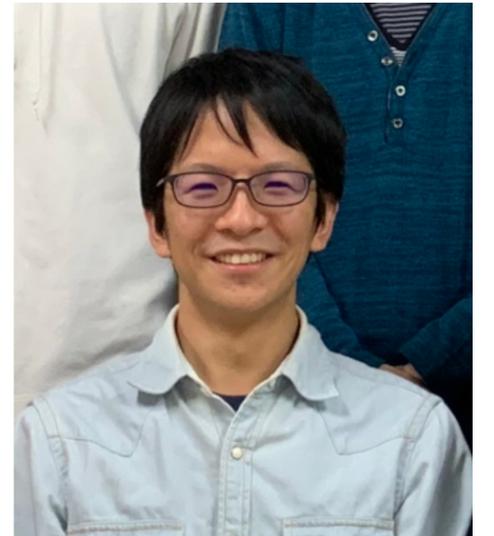


オーム抵抗 + ホール効果
+ 両極性拡散 (Bai 2017)

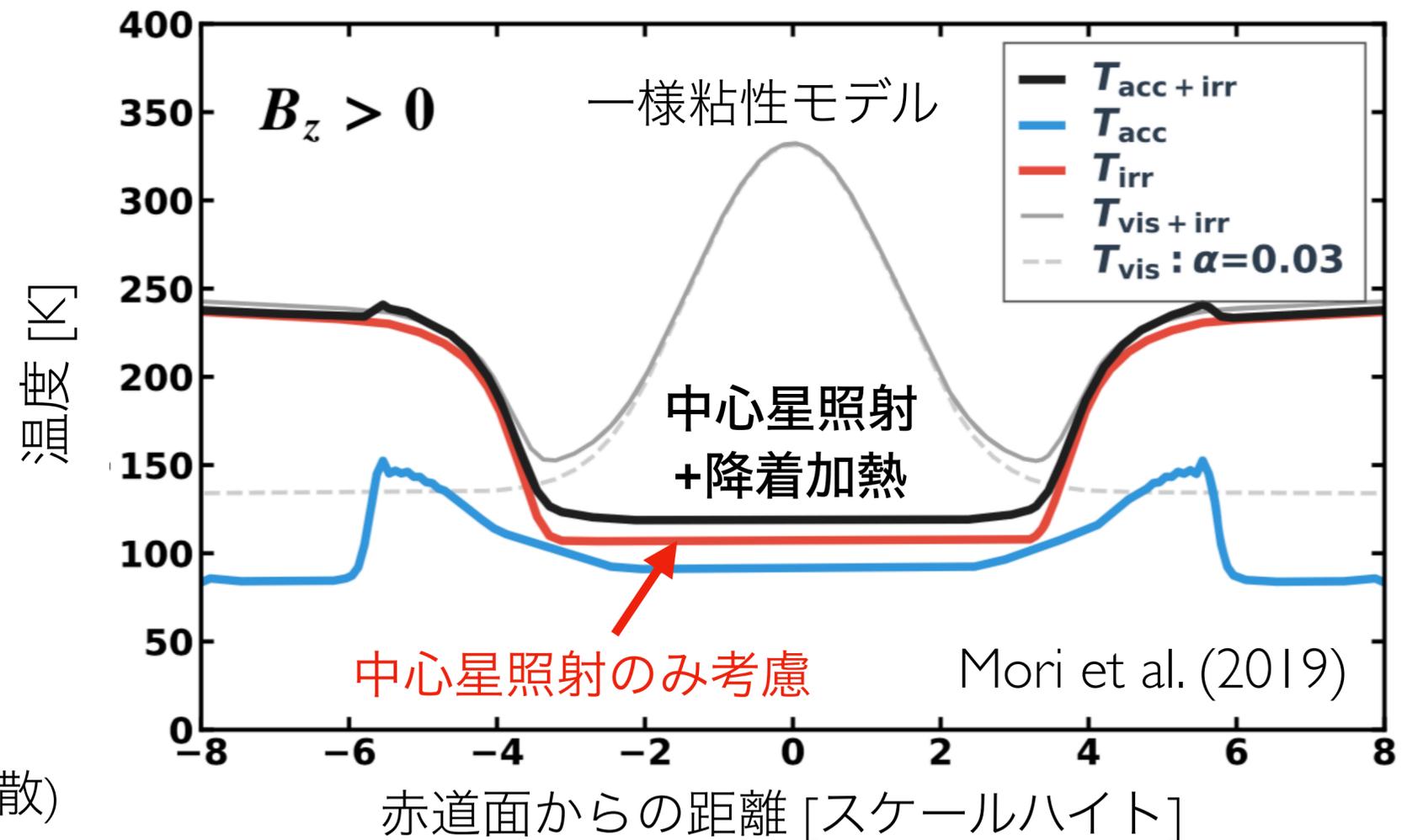
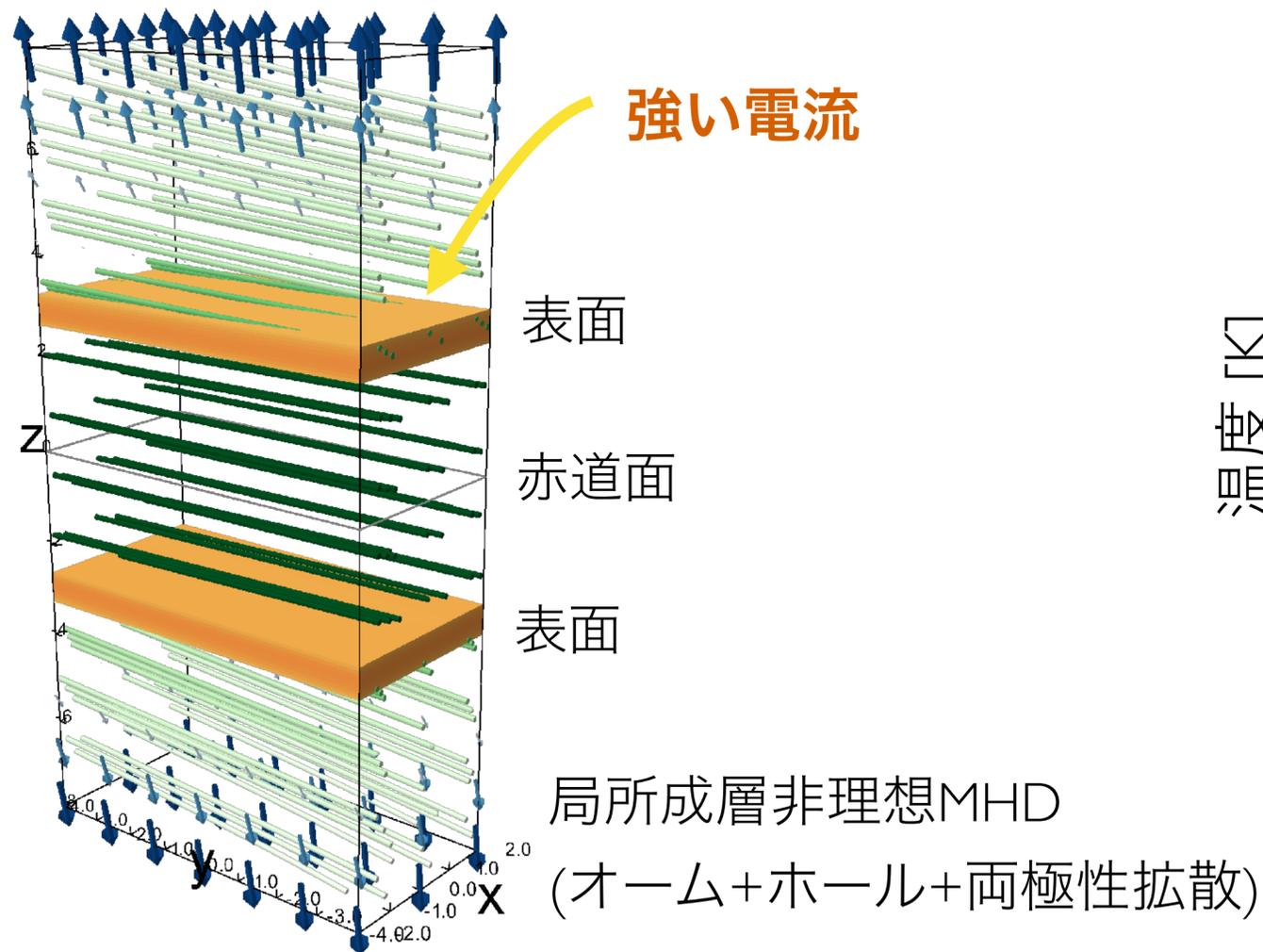
表面降着では円盤内部は温まらない

- 加熱源 (強い電流) は電離度の比較的高い円盤表面にのみ存在
- **内部温度は、中心星による表面照射だけでほぼ決まってしまう！**

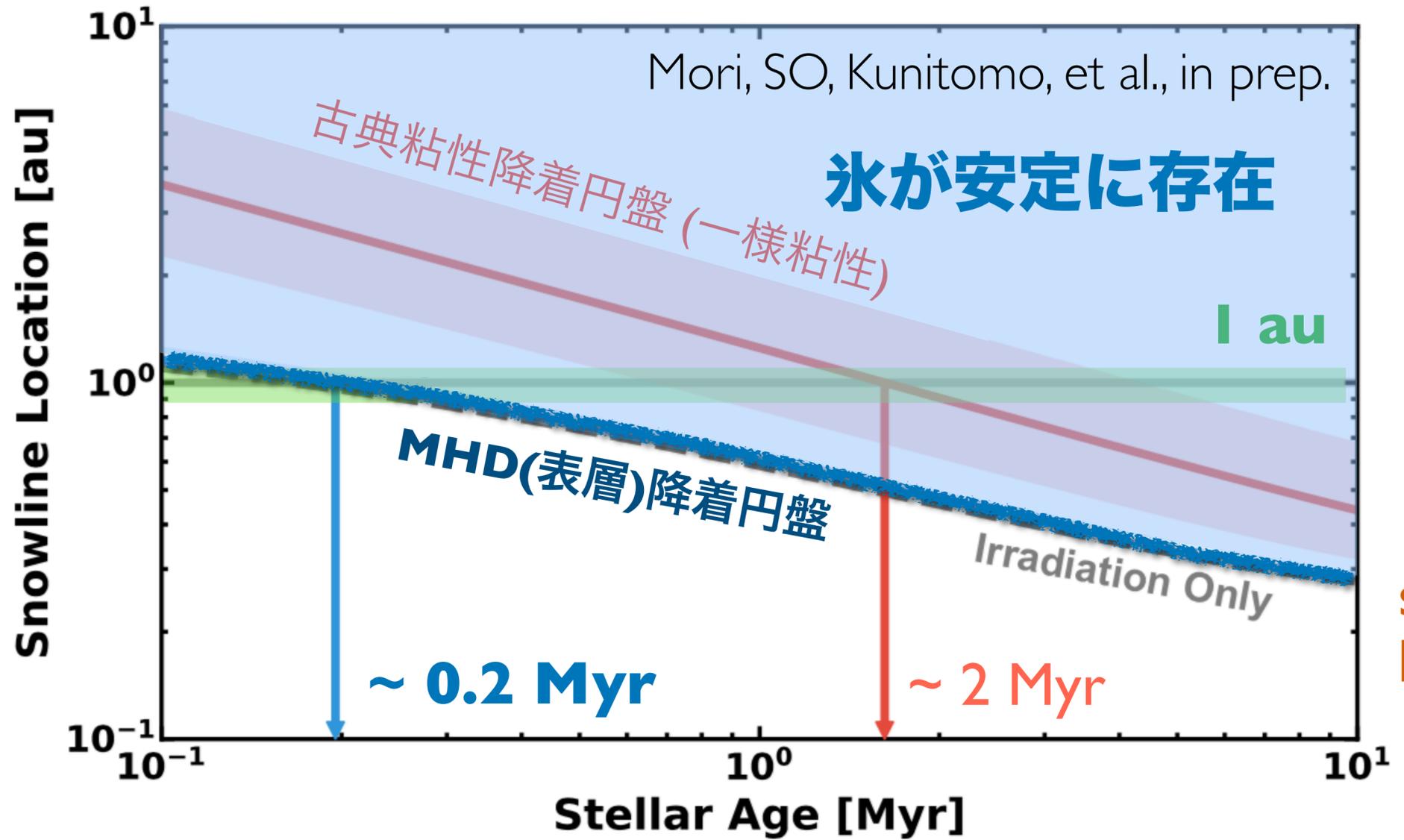
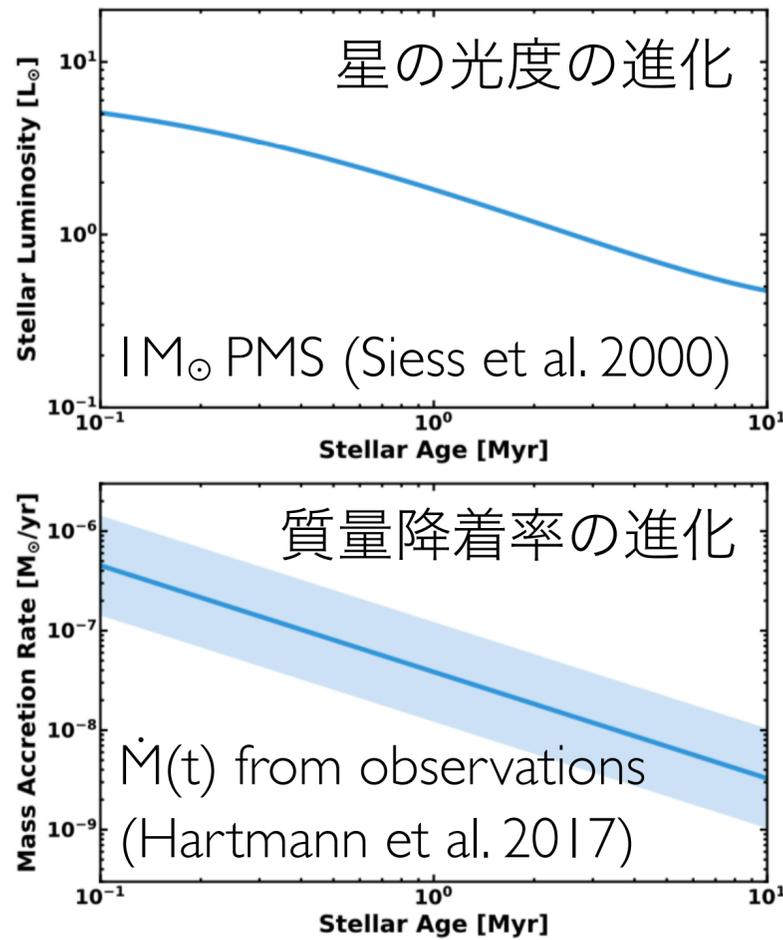
(Hirose & Turner 2011; Mori, Bai, & SO 2019)



森昇志 (2019PhD→東大)



現状の円盤MHDの理解に基づくスノーラインの進化

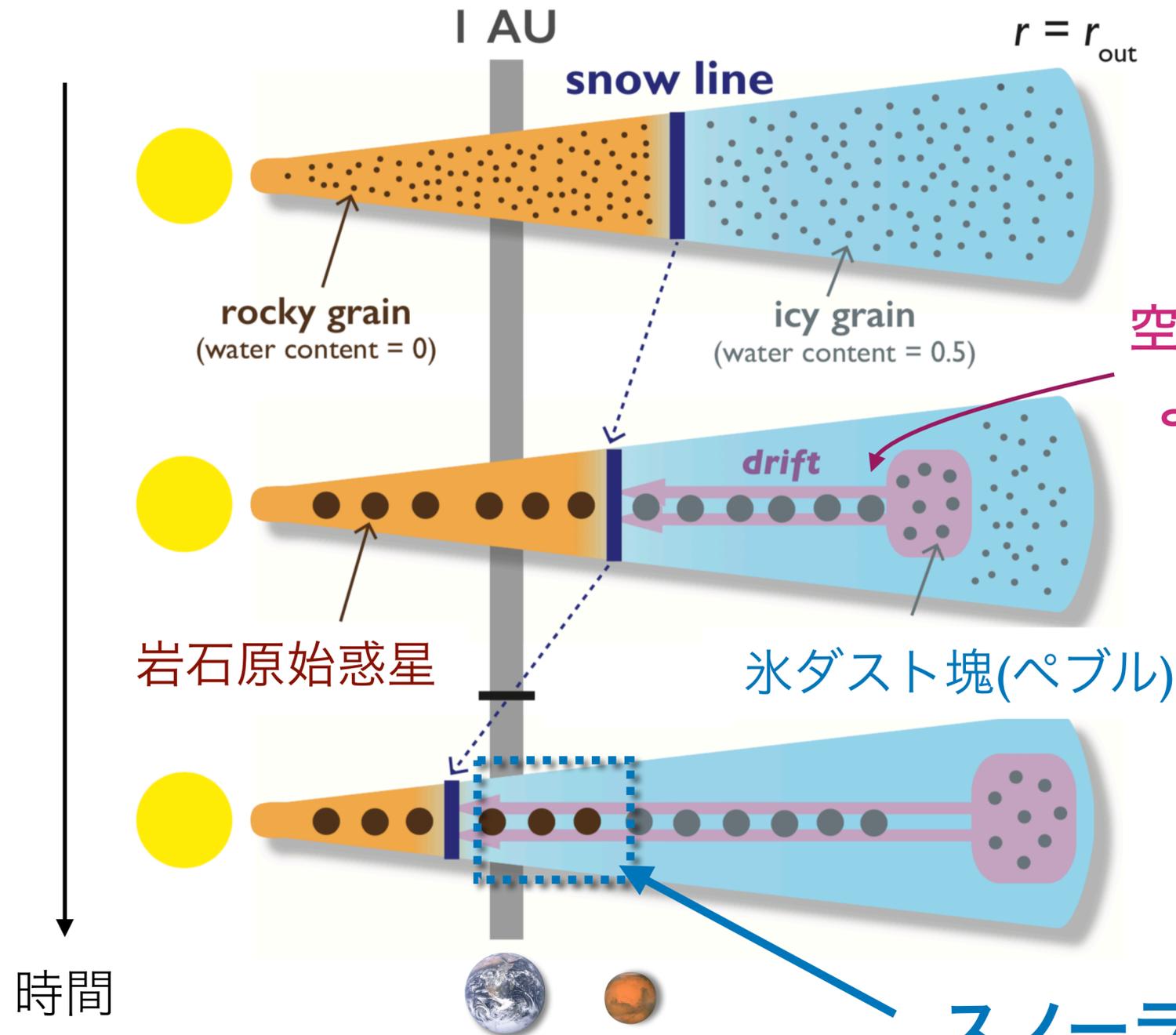


星・円盤形成

円盤散逸

現在の地球軌道は、惑星形成の早い段階でスノーラインの外側に飲み込まれていた？

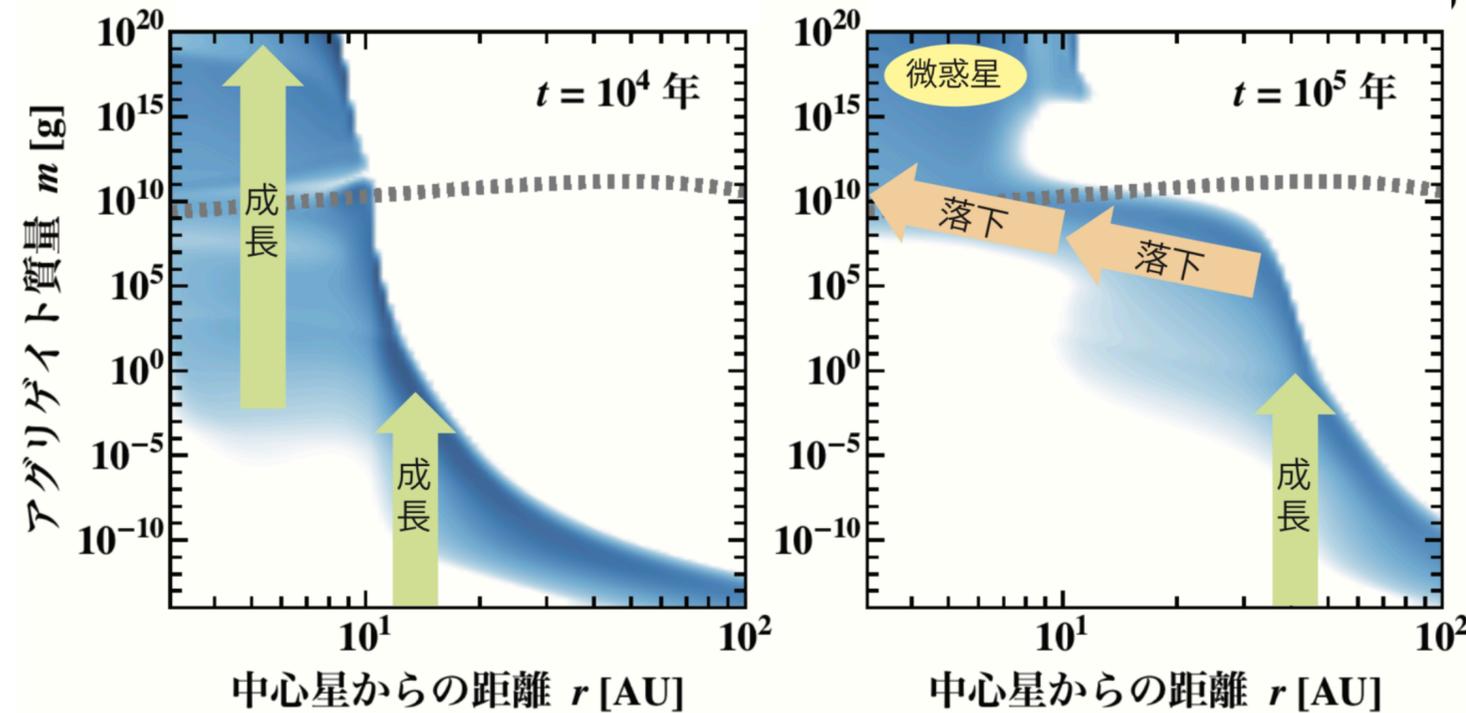
では、岩石惑星がスノーライン通過前に形成されればOKなのか？



Sato, SO, & Ida (2016)

スノーライン通過後に
岩石惑星に氷が降ってくる！

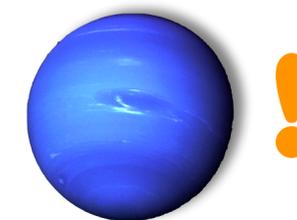
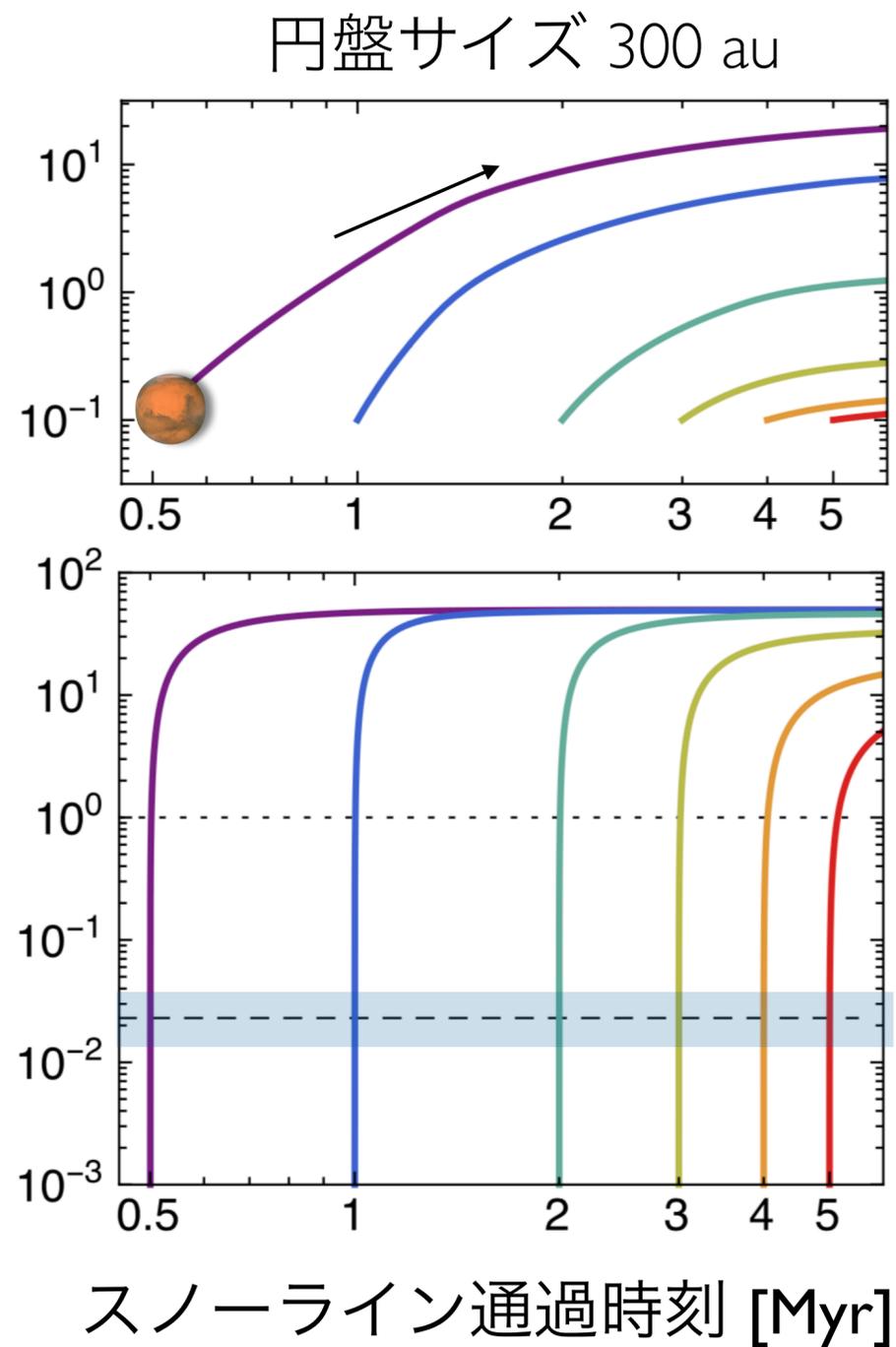
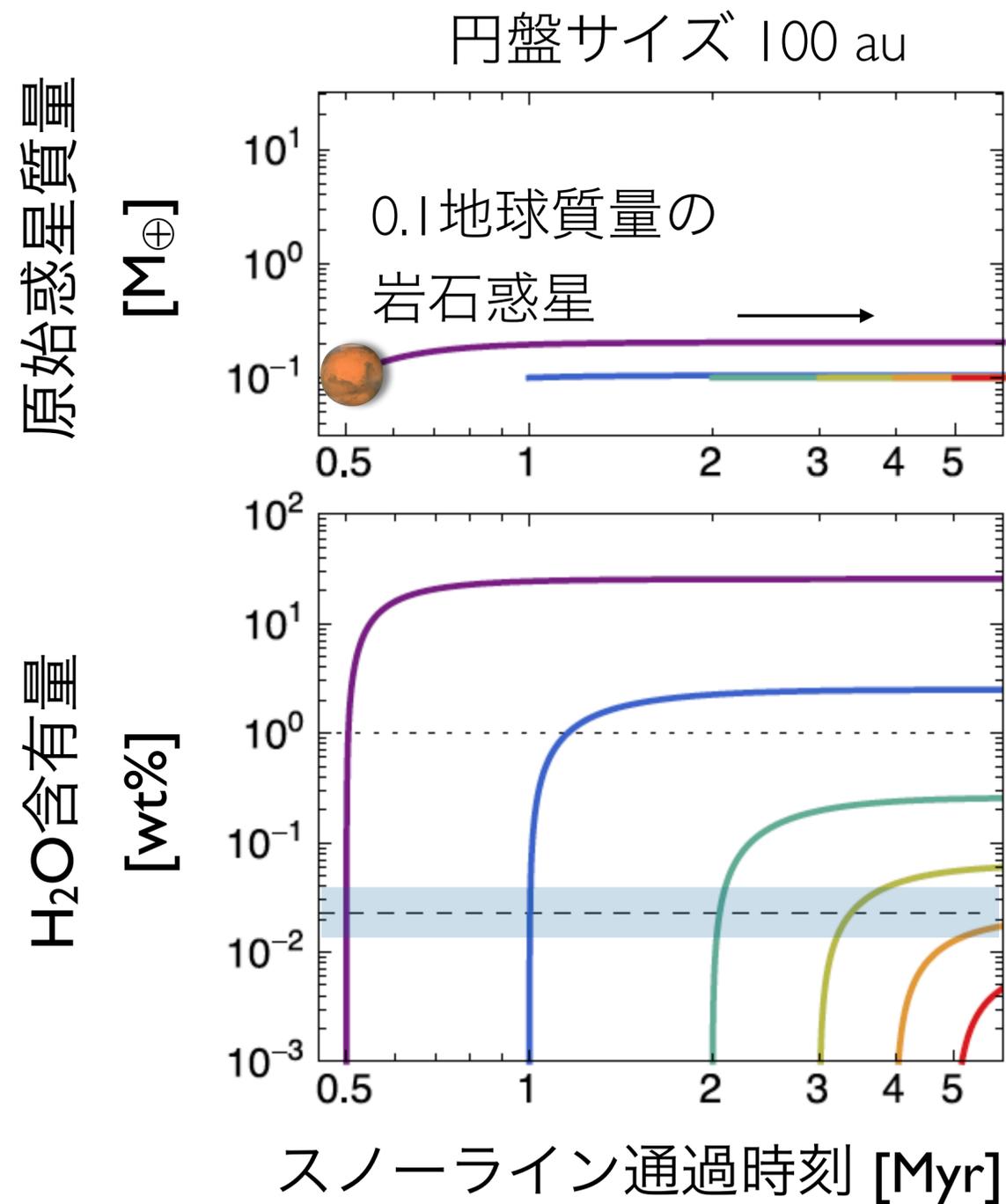
例: 原始惑星系円盤の
高空隙率氷ダストの成長と落下



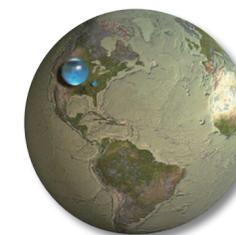
Okuzumi et al. (2012)

スノーラインが早期に通過すると、岩石惑星が氷(水)惑星化する

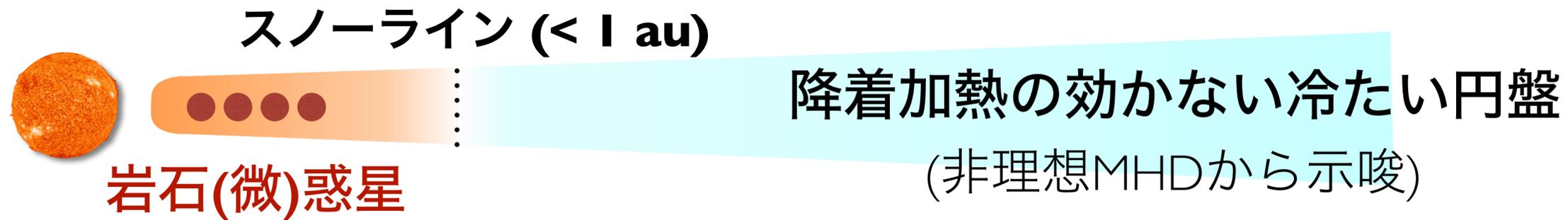
氷地球軌道の岩石惑星による氷ダスト塊(ペブル)の捕獲 (Sato, SO, & Ida 2016)



← 地球の海水量
(0.02wt%)



円盤・ダスト進化理論の示唆：地球は短周期(微)惑星だったのでは？



- 熱電離領域の外縁 ($T \sim 800$ K) で形成？ (Kretke+09; Ueda, Flock, & SO 19; Flock+19)
- スノーラインのすぐ内側で形成？ (Saito & Sirono 09; Ida & Guillot 16)



(微)惑星の外側への移動？

磁気駆動風による円盤内側の面密度の低下？
(Ogihara et al. 2018)

小規模



大規模



Super-Earth系？



太陽系？

問題: 地球と火星の
同位体組成の違いを説明
できるかは不明

Tang & Dauphas (2014);
Dauphas et al. (2014);

スノーラインと惑星形成：理論天文学としての課題

◆ 原始惑星系円盤の降着・熱構造：

- 円盤降着の駆動源は磁場だけなのか？ (e.g., 対流過安定; see Lyra & Umurhan 2018)
- ダストの進化と共に円盤温度・スノーラインも進化するのではないか？
(ダスト進化と円盤輻射輸送を同時に取り扱える理論枠組みが必要！; Okuzumi et al., in prep.)

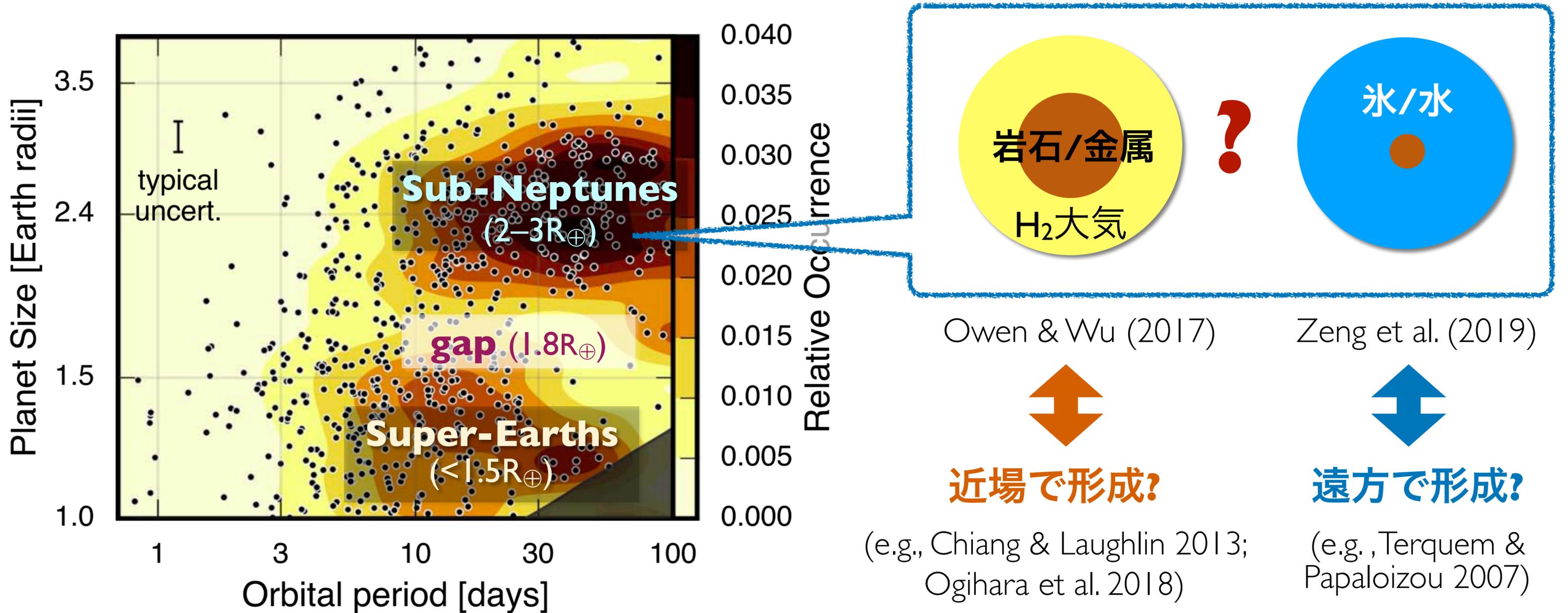
◆ 近接領域での岩石(微)惑星形成：

- ダストの落下を止め、微惑星形成を駆動した円盤構造は何か (熱電離領域)？
- 系外惑星系の統計、太陽系地球型惑星の性質を説明できるか？

◆ 観測的テストの整備：

- スノーライン付近の円盤加熱・ダスト進化を、将来の円盤観測から探れないか？
(next generation VeryLarge Array でスノーラインを観る; Okuzumi, Momose, & Kataoka, in prep.)

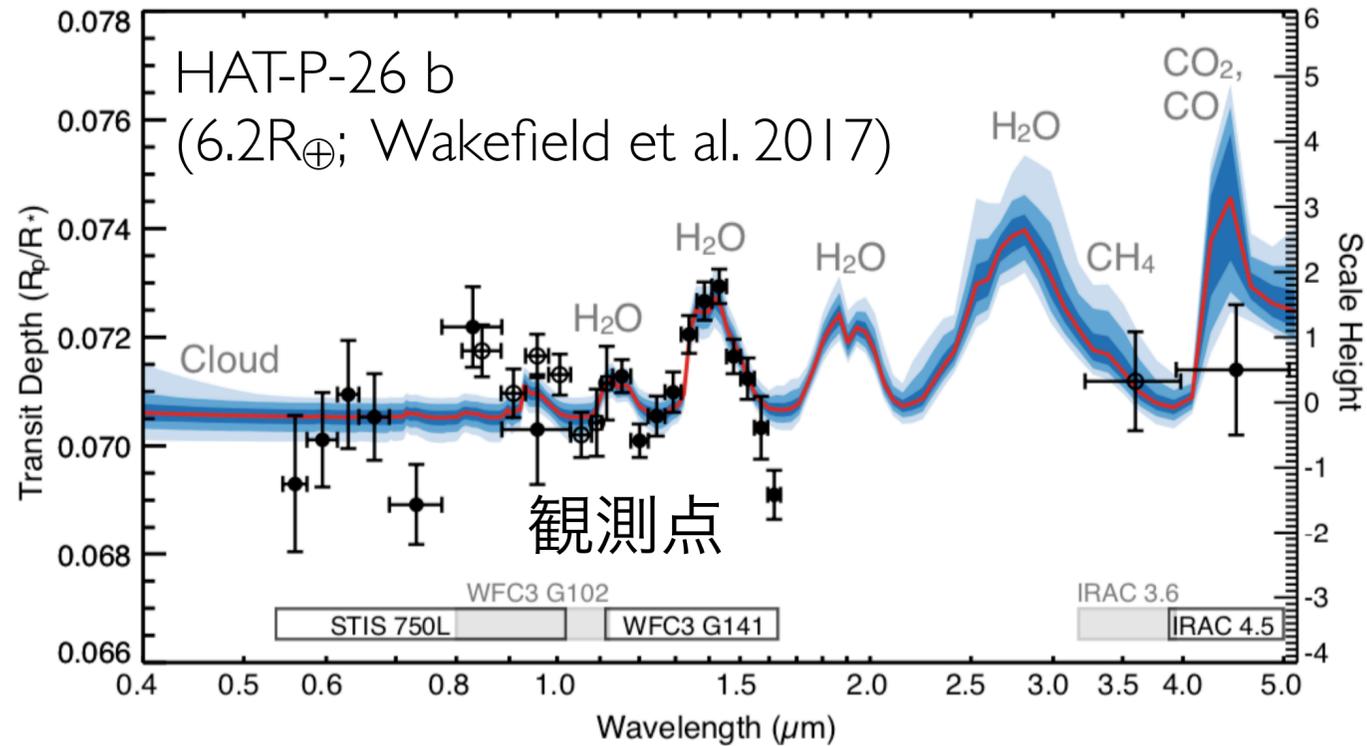
Sub-Neptunesの謎：何でできているのか、どこから来たのか



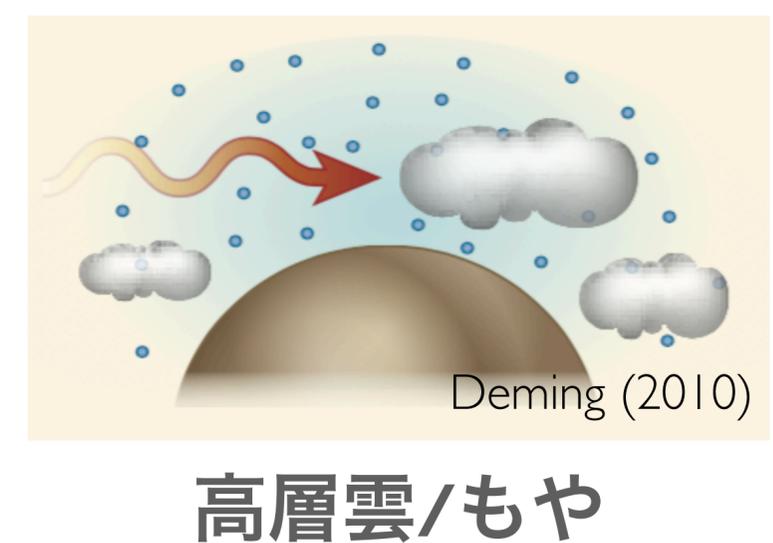
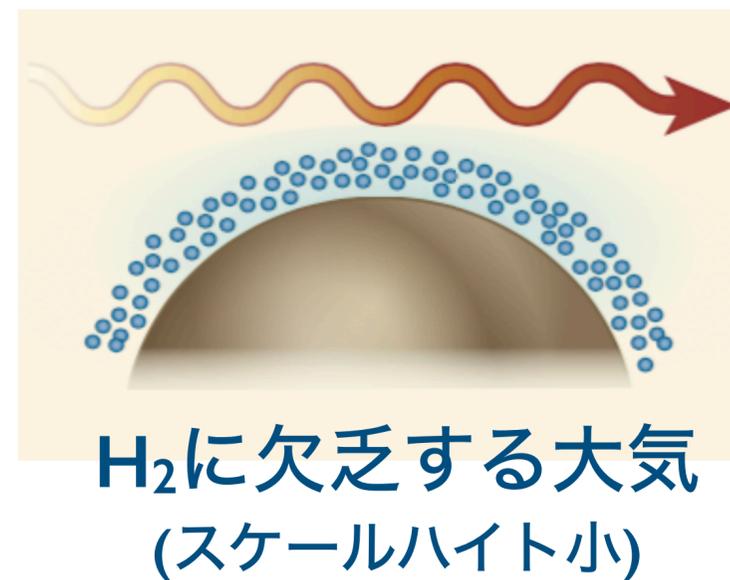
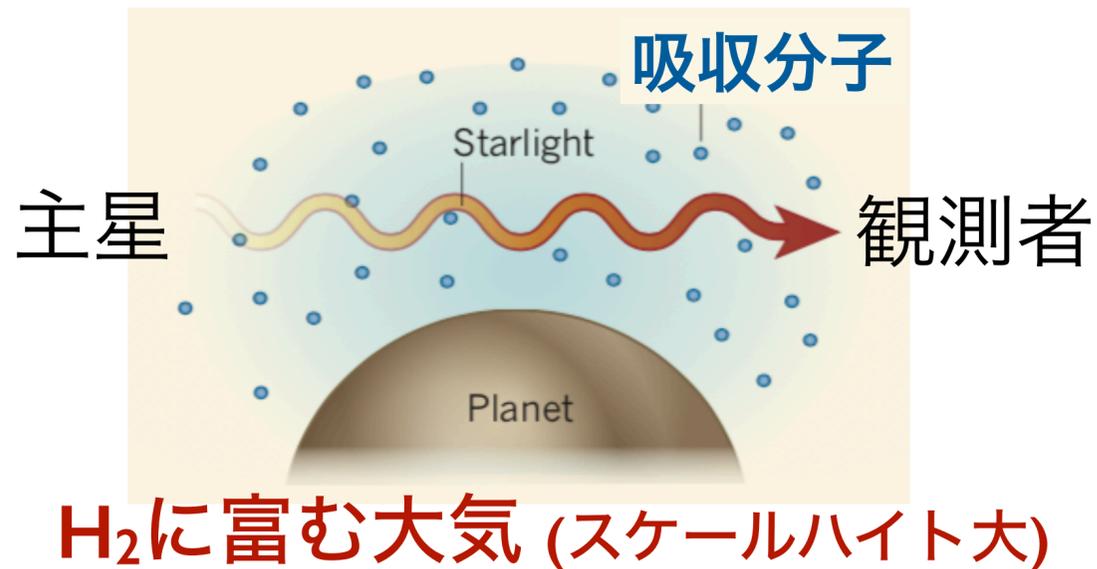
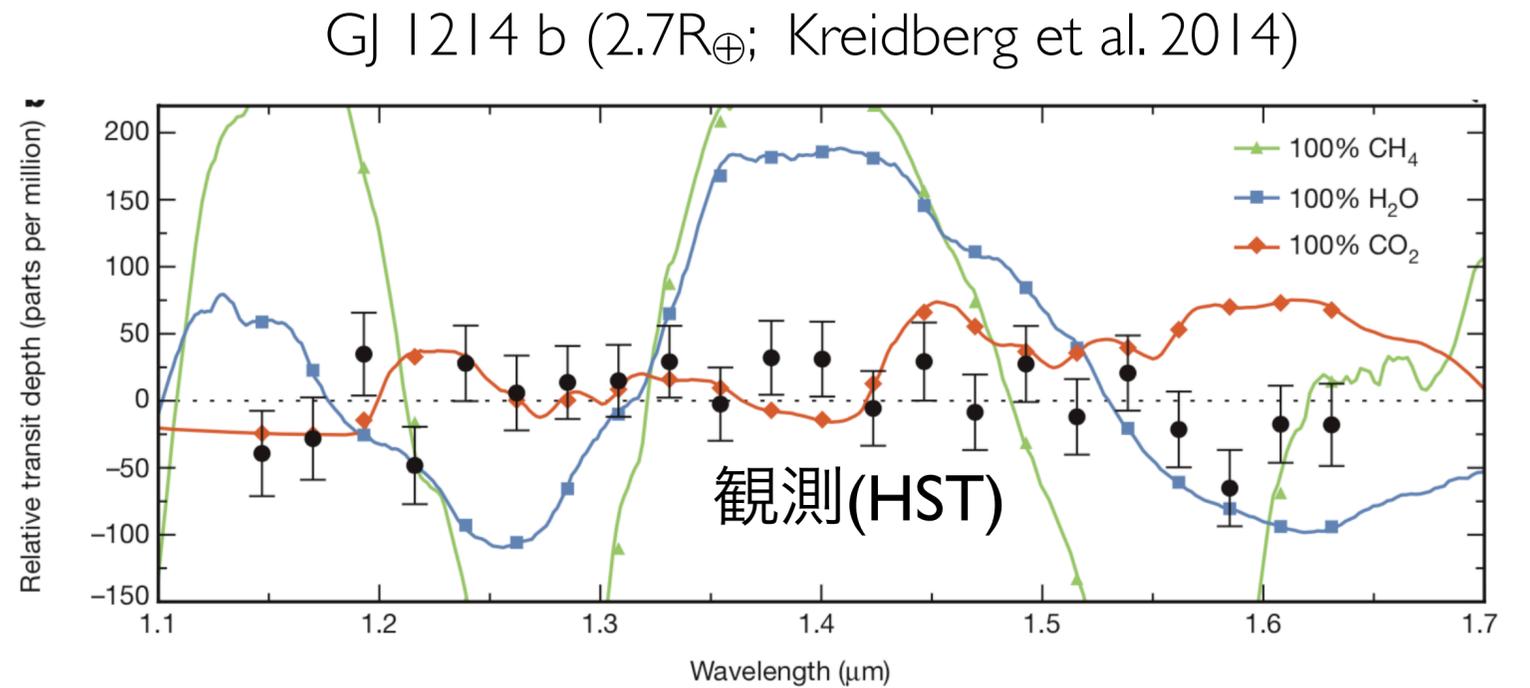
大気の組成を知ることによって内部組成を知ることができないか？

近接惑星の大気透過光の分光観測

大気分子の吸収が顕著な例



大気分子の吸収が見られない例

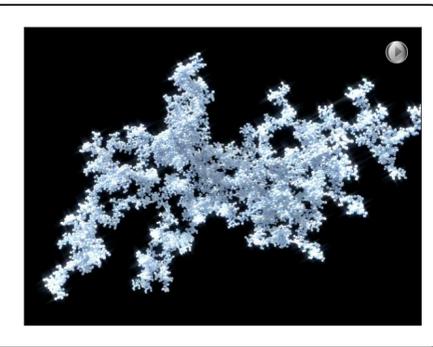
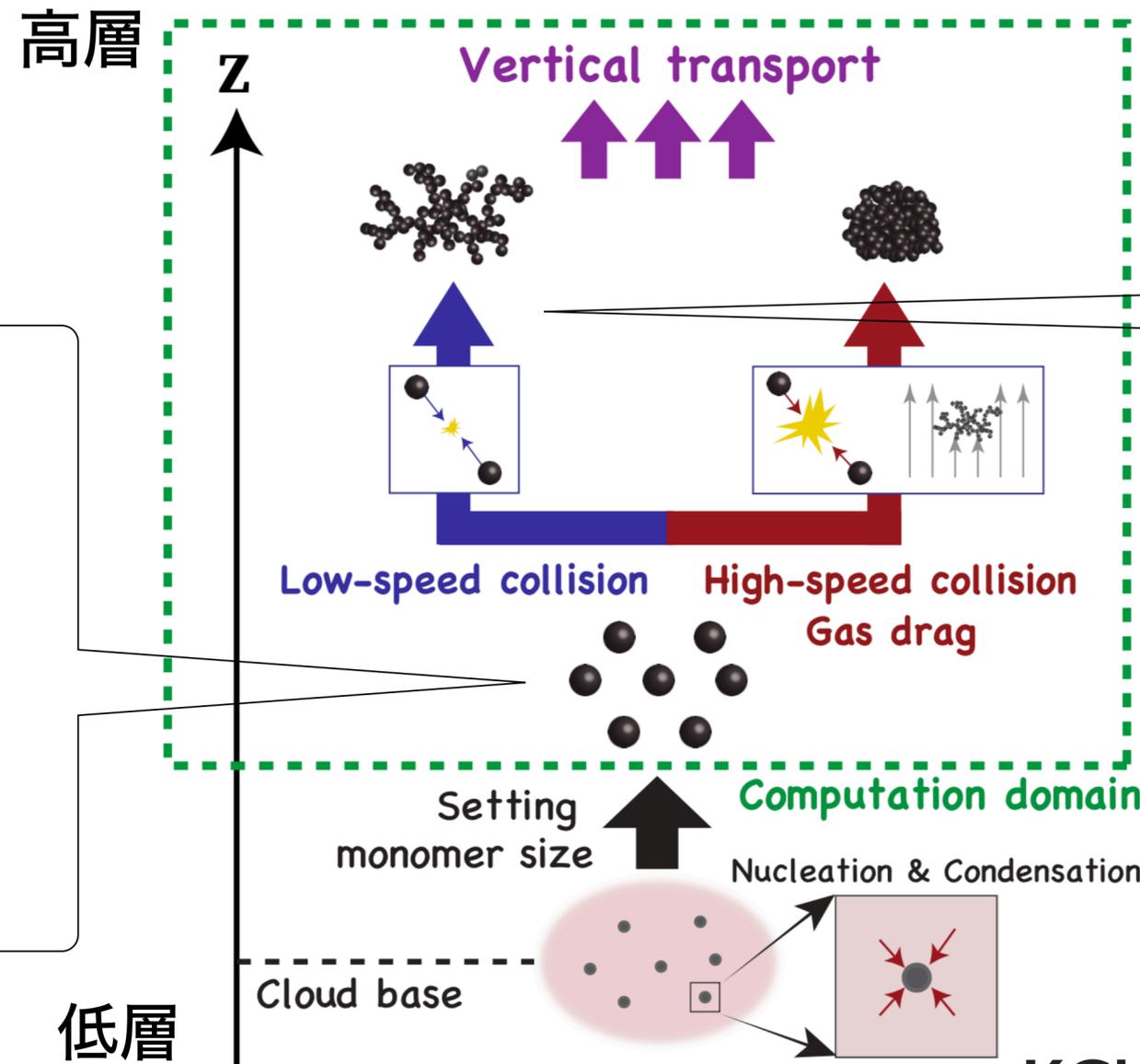
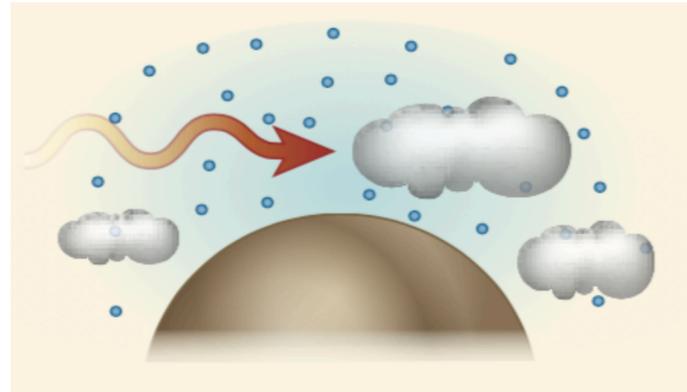


系外惑星の高層鉱物雲形成モデル

Ohno & SO (2018, 2018); Ohno, SO, & Tazaki (2019)



大野和正
(2020PhD? →UCSC)



高空隙率ダストアグリゲイト

- 形成: Suyama+08; Okuzumi+09; Kataoka+13
- 光学特性: Tazaki & Tanaka 16

KCl, ZnS 粒子 (凝縮温度 ~ 800 K)

雲粒子の成長と運動

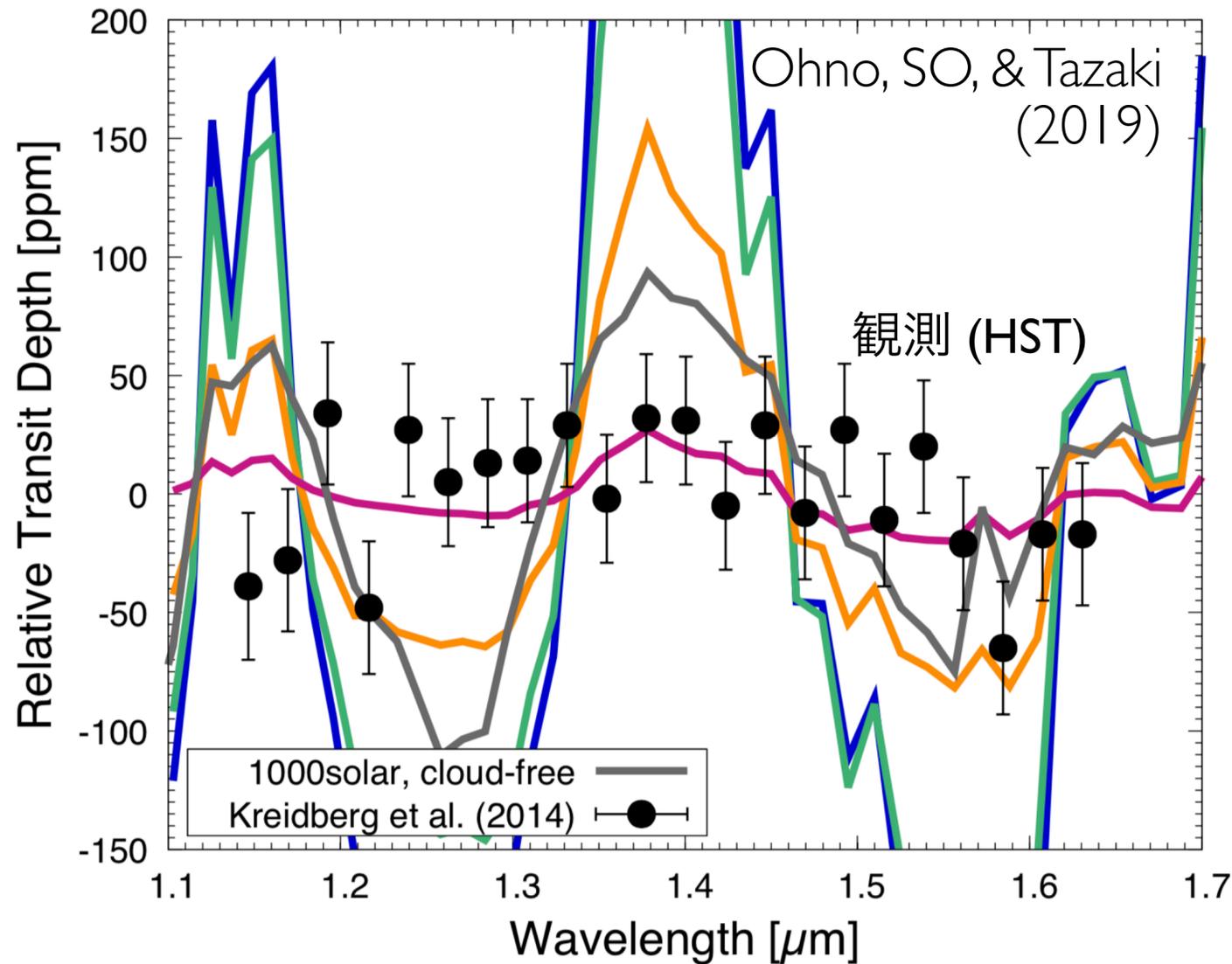
- 衝突合体
- 拡散(巻き上げ)・沈殿

- ➡ 粒子成長物のサイズ・空間密度の鉛直分布を計算
- ➡ 透過光スペクトルを生成

光化学ヘイズ(もや)については Kawashima & Ikoma (2018); Kawashima et al. (2019)

高層雲を持つ系外惑星の組成推定の試み

例: Sub-Neptune GJ1214 b の大気透過光スペクトル (雲モデル vs 観測)



1Z_☉

10Z_☉

100Z_☉

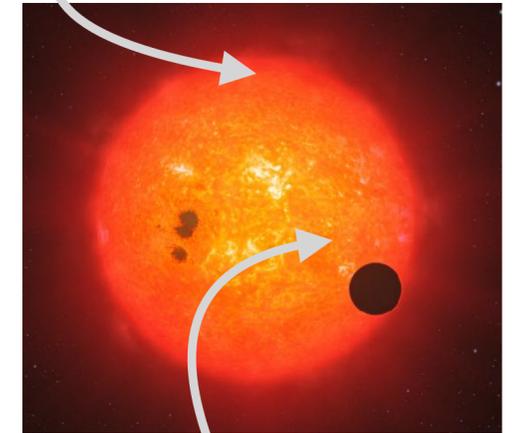
1000Z_☉ ✓

大気重元素量
(モデルパラメータ)



大気+固体コアの構造計算から、この惑星が
大気質量 ≦ 30%, 氷含有量 ≦ 60% であることを
予言 (Ohno 2019, PhD Thesis)

GJ 1214
0.15M_☉, M5



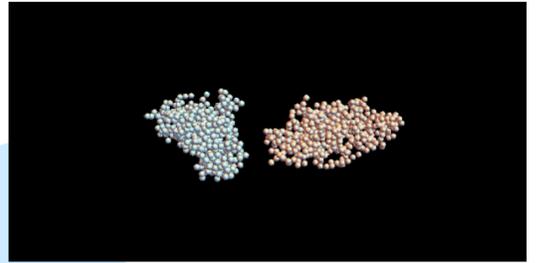
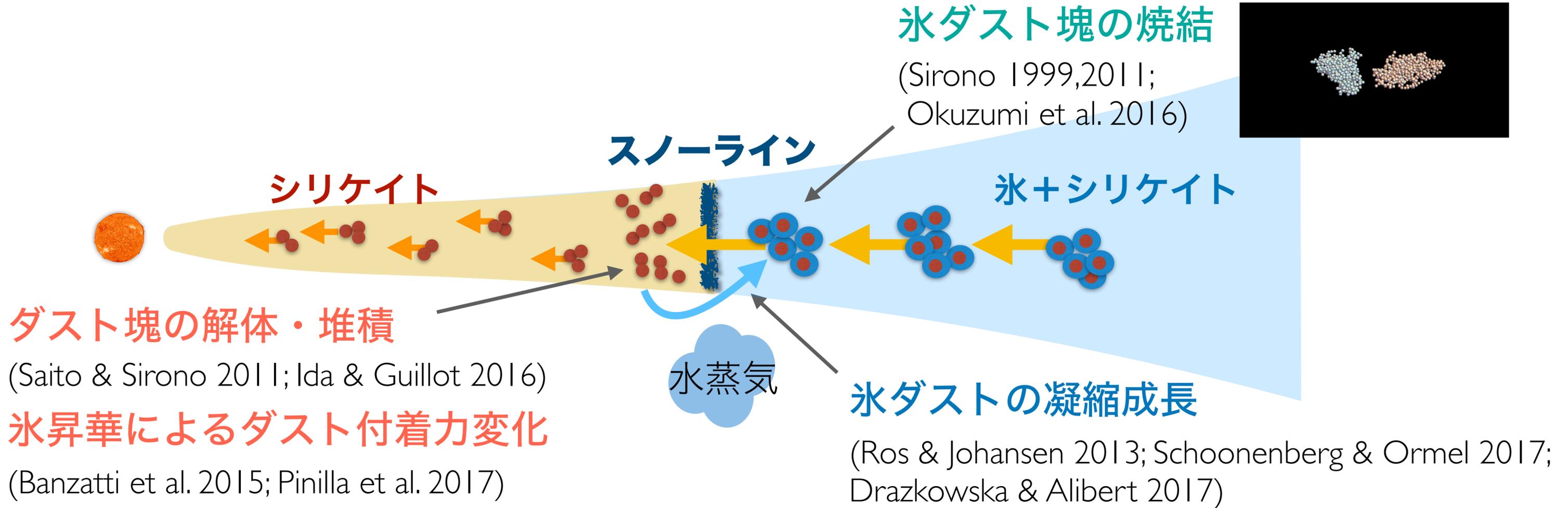
GJ 1214 b
a = 0.01 au
R = 2.7R_⊕
M = 6.5M_⊕
T_{eq} = 530 K

JWSTでさらに広い波長でスペクトル観測 → 近接(sub-)Neptunesの組成の決着へ

まとめ

- 地球やSuper-Earthsなどの岩石惑星の形成過程・形成領域の解明には、スノーラインの進化に関する理解が重要である。
- 磁気駆動降着は円盤を加熱しにくい！
スノーラインが早期に地球軌道より内側へ移動する可能性あり
- 早期に移動するスノーラインは岩石惑星を氷惑星化する。
岩石惑星はみな現在の地球軌道より十分内側で形成された？
- 赤道面でのガス降着を駆動する機構の洗い出し、円盤温度構造とダストの共進化、そしてこれらの観測的検証のための理論的整備が必要

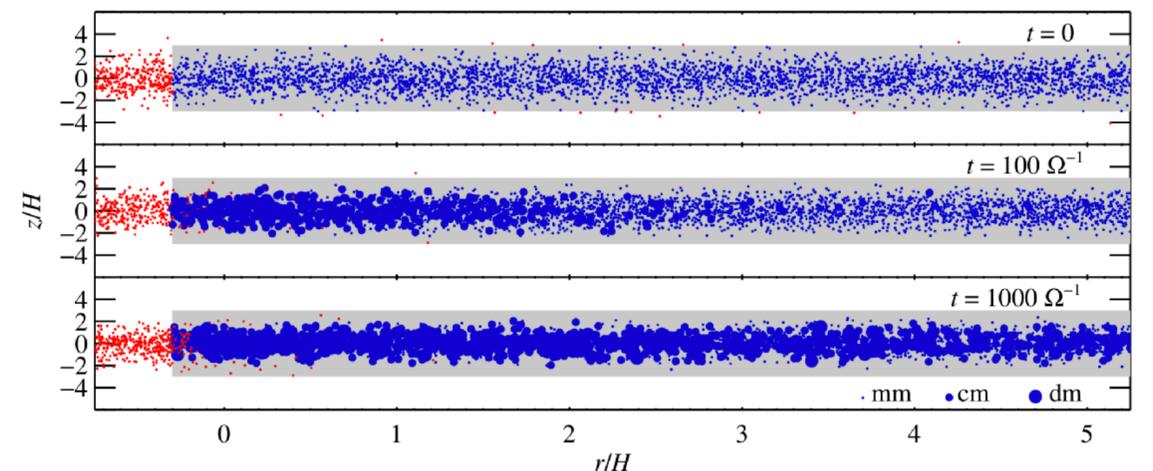
最近の話題: スノーライン付近でのダスト進化・微惑星形成



局所的なダスト密度上昇

→ **ダストの重力/流体不安定** → 微惑星形成?

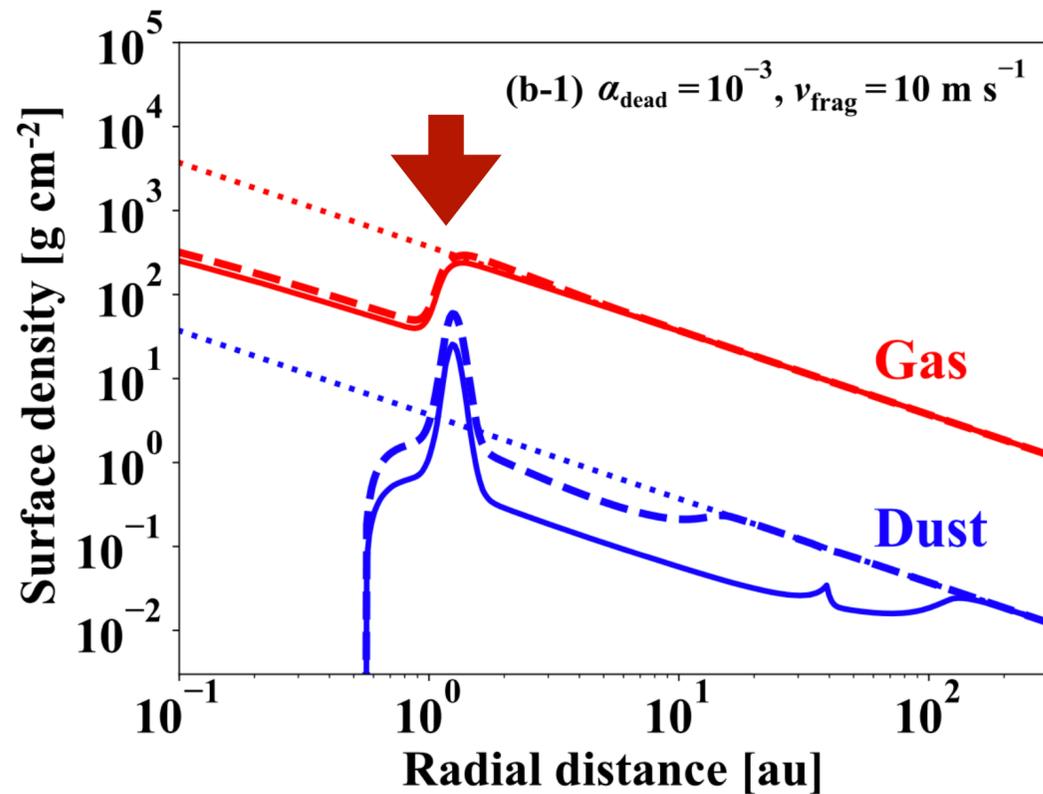
(Saito & Sirono 2011; Ida & Guillot 2016; Banzatti et al. 2015;
Drazkowska & Alibert 2017; Sirono 2011; Ros & Johansen 2013;
Schoonenberg & Ormel 2017)



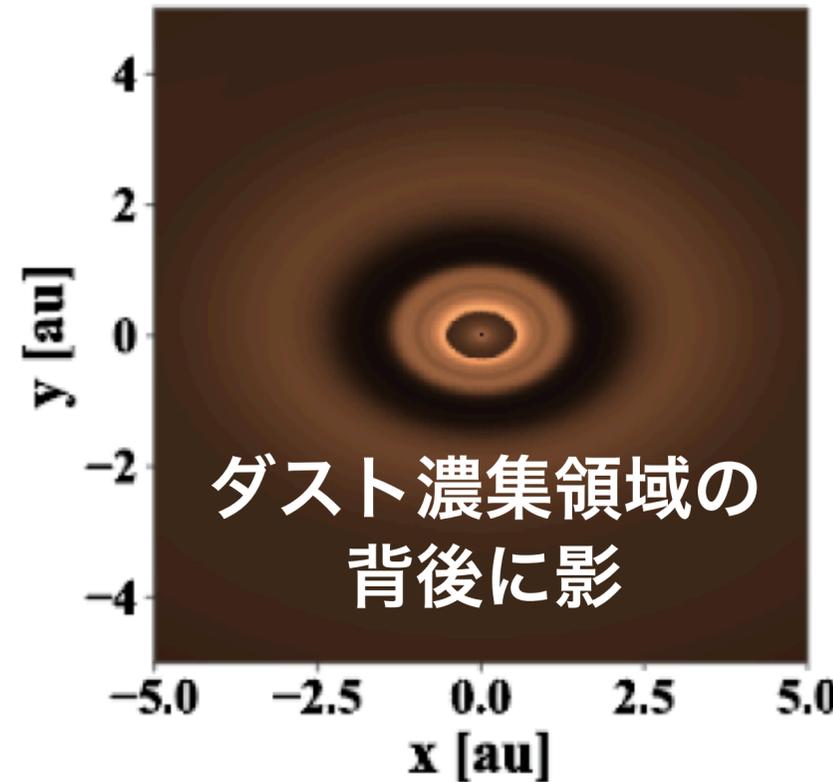
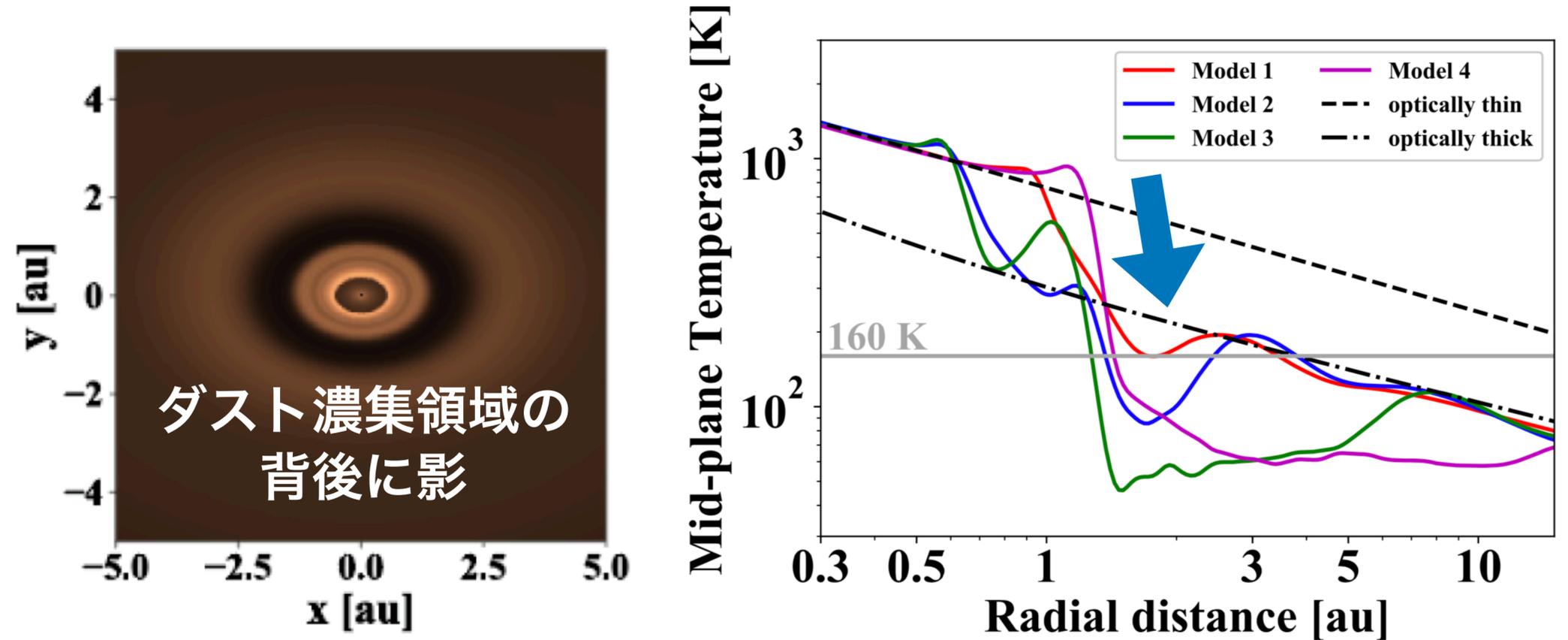
ダストが進化するとスノーラインも移動する

Ueda, Flock, & SO (2019)

ダスト成長・移動計算



モンテカルロ輻射輸送計算



圧力バンプにおけるダストの濃集

(e.g., Kretke & Lin 2007)

影領域では赤道面温度が大幅に低下
(ここでスノーラインができることも)

ダストとスノーラインの共進化の理解は今後の課題の1つ