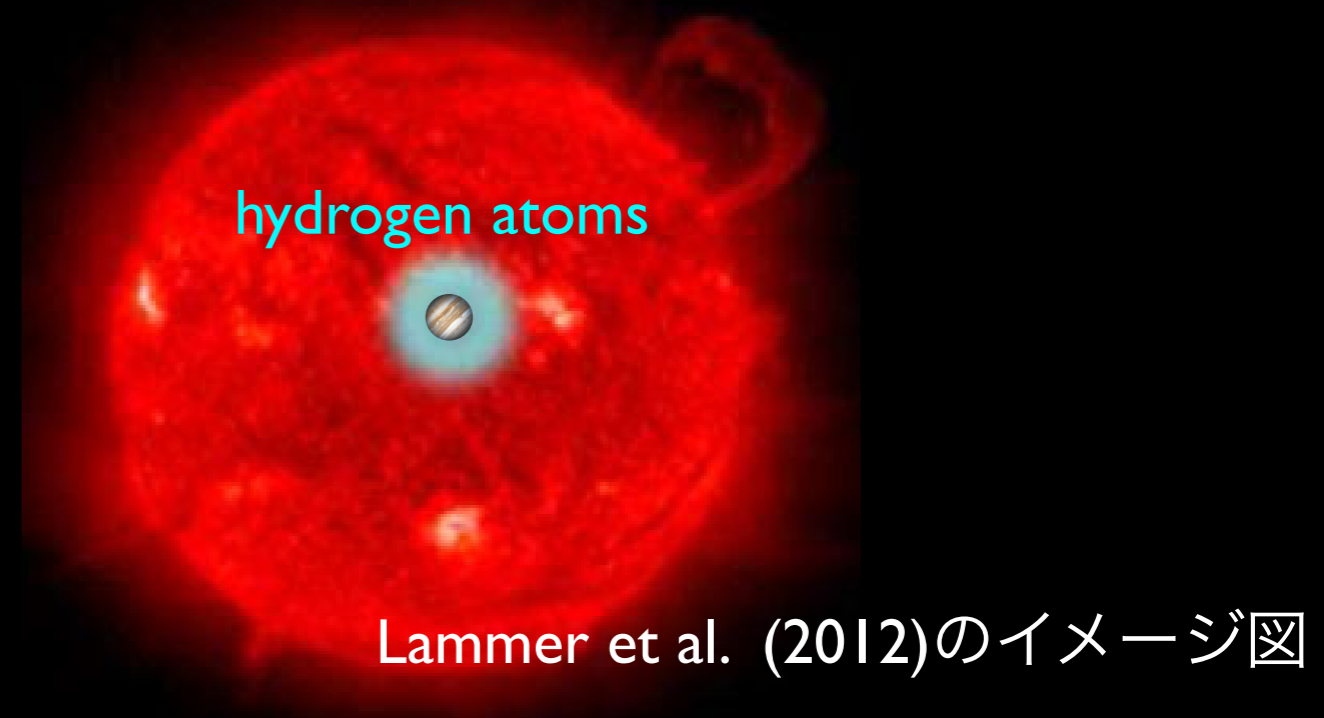
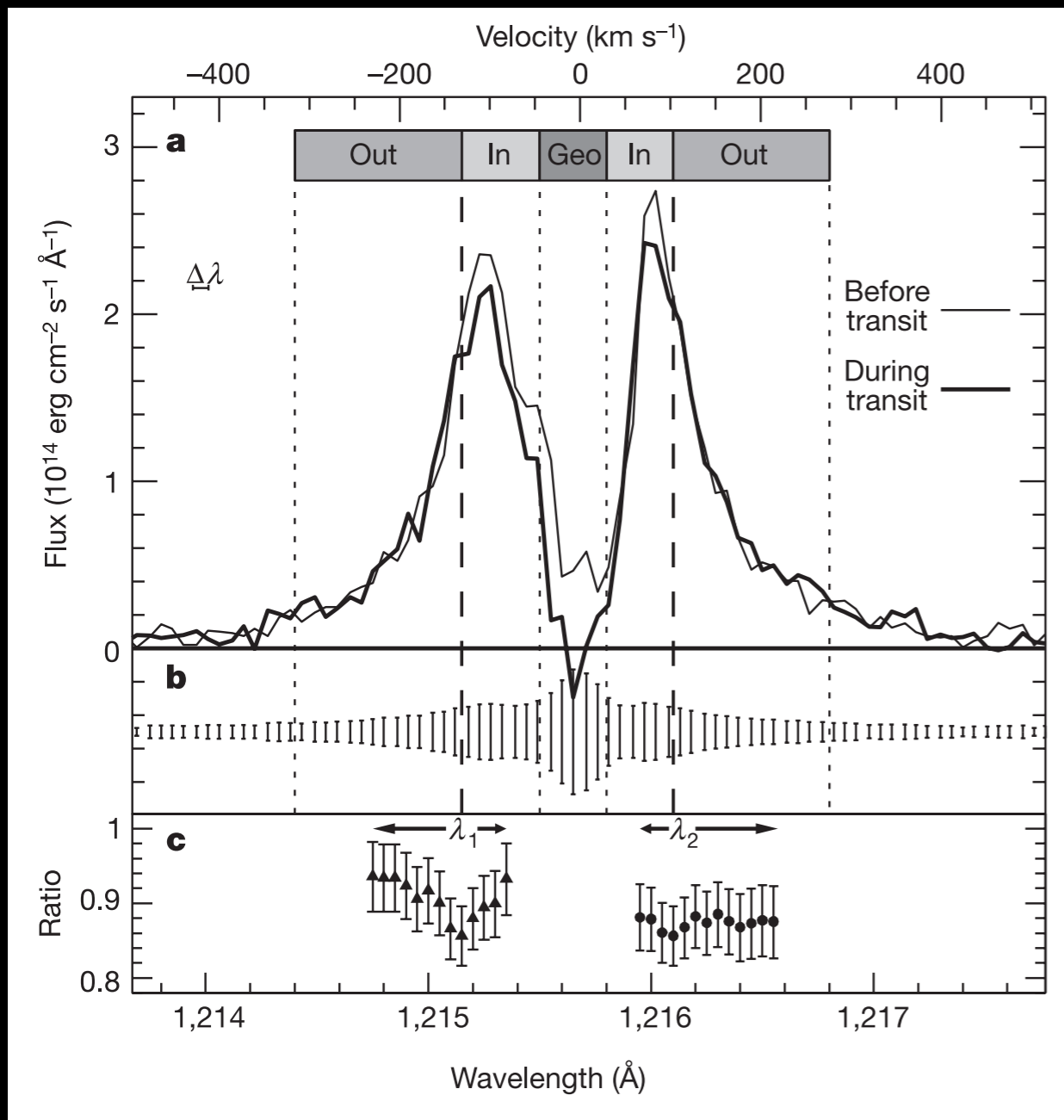


系外惑星の大気散逸と惑星組成・分布への影響

黒川 宏之 (名大理)

共同研究者：中本泰史 (東工大理工), Lisa Kaltenegger (MPIA, CfA)

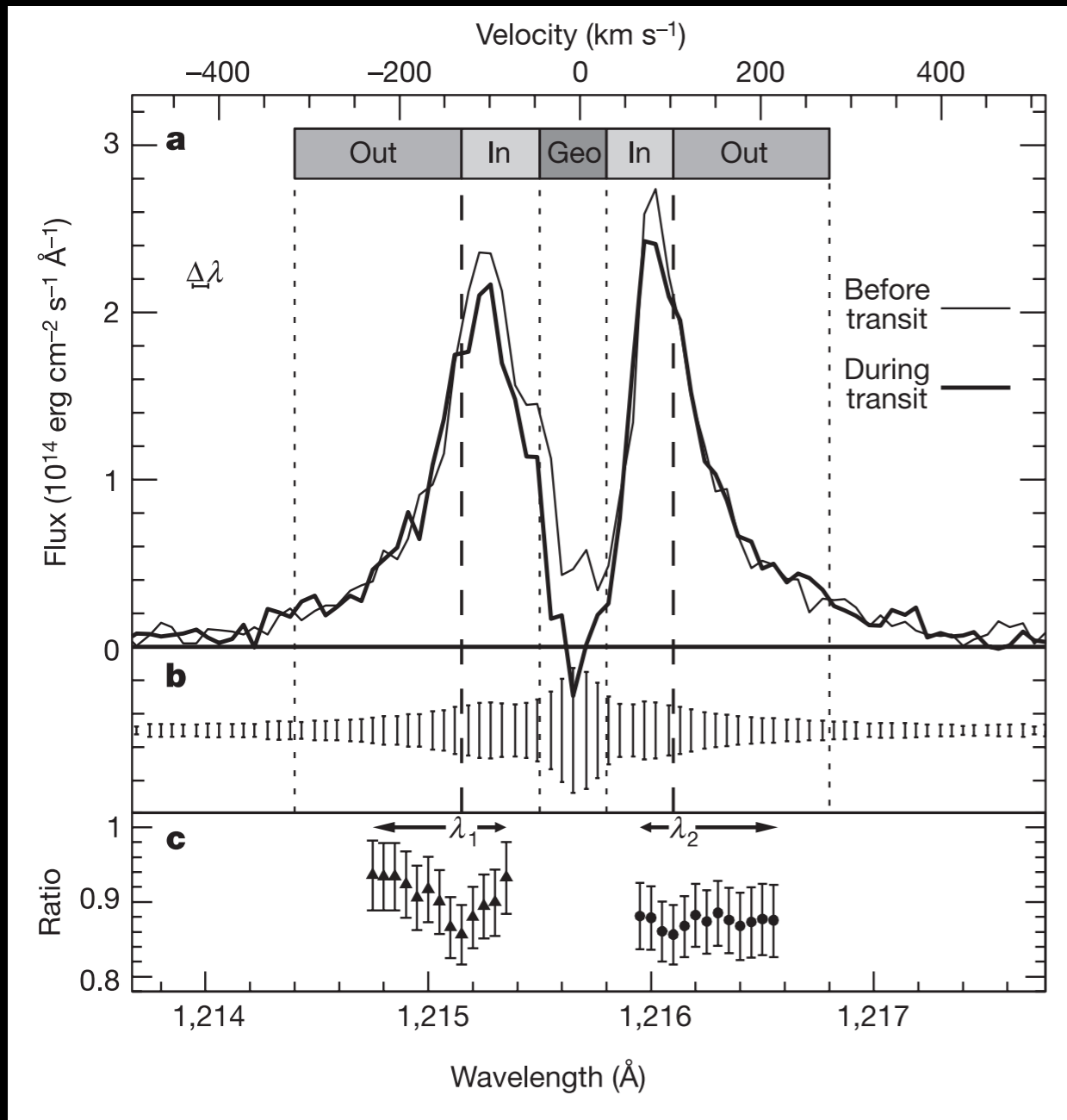
Lyman- α transit of HD209458b (Vidal-Madjar et al., 2003)



中心星の近傍系外惑星から大規模な大気散逸
- メカニズムは？
- 惑星組成への影響は？

大気散逸の観測

Lyman- α transit of HD209458b (Vidal-Madjar et al., 2003)



Lyman- α 吸収の深さ 15% = 4.3 木星半径

(cf. 可視光吸収 1.5%)

→ ヒル半径 3.6 木星半径を超えて水素が流出

(Vidal-Madjar et al., 2003)

HD 189733b (Lecavelier et al., 2010) ,

55 Cnc b (Ehrenreich et al., 2012) で同様の検出

→ 系外惑星の大気散逸は普遍的

C, O輝線でも~10%の吸収 (Vidal-Madjar et al., 2004)

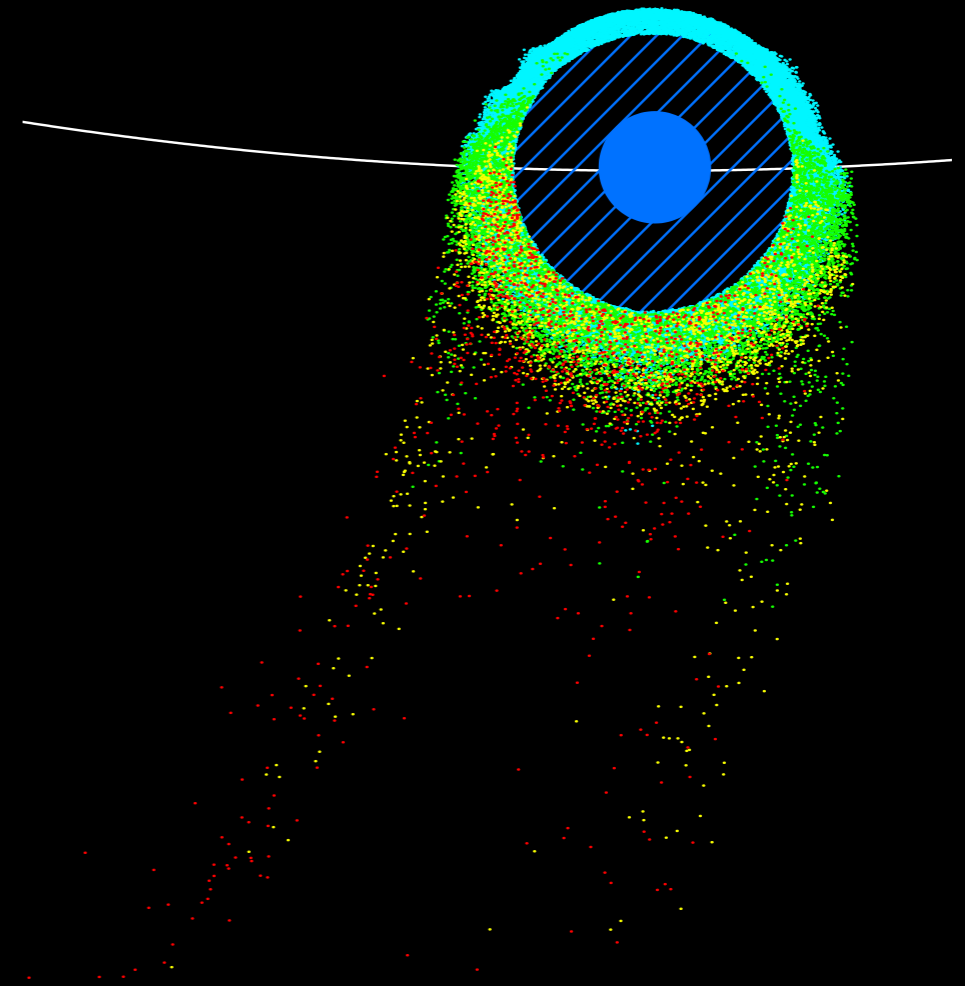
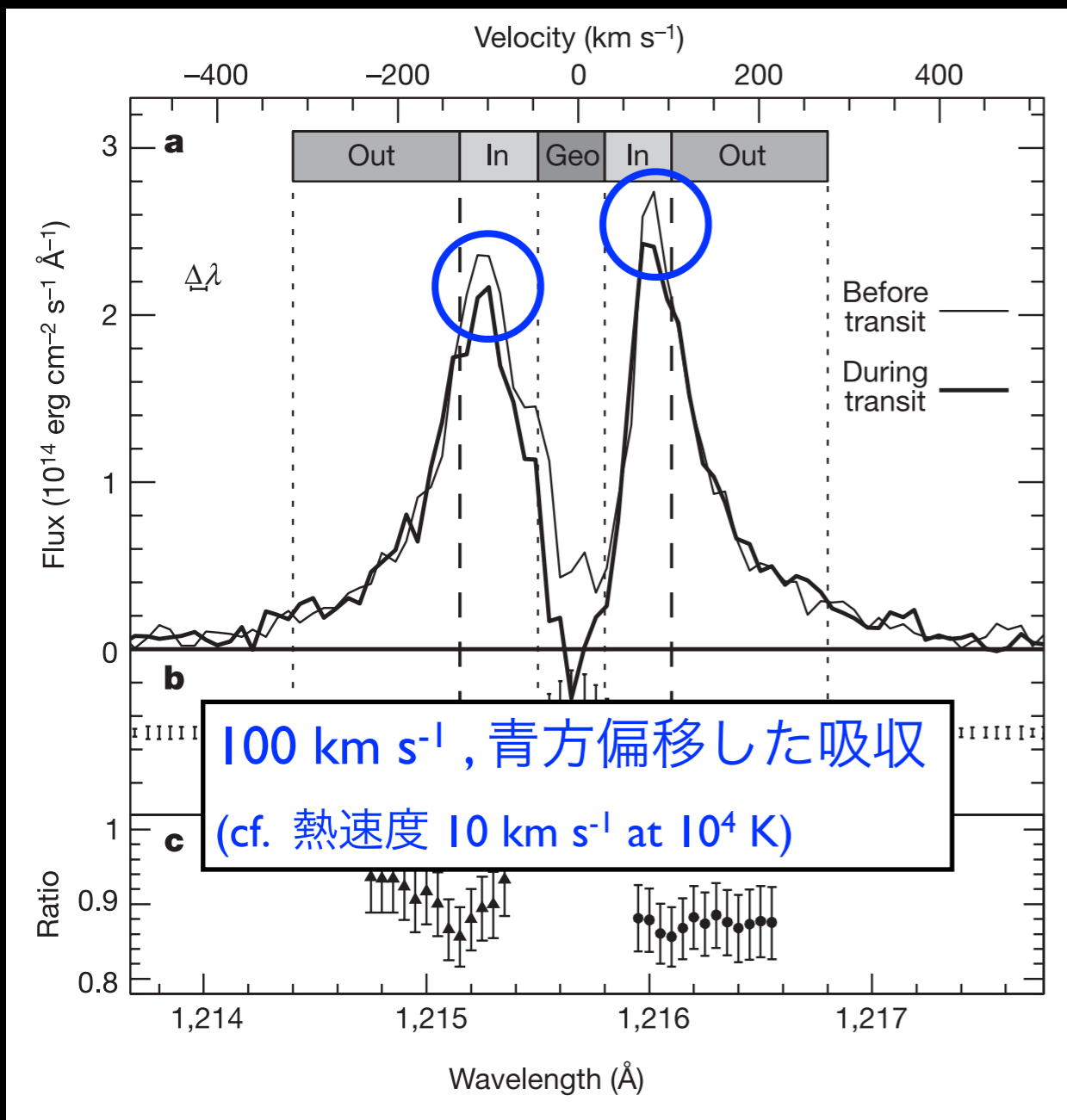
→ 大規模な流体的散逸

大気散逸メカニズム

EUV加熱による大気散逸 + 輻射圧加速 (+ 恒星風電荷交換)

(Vidal-Madjar et al., 2003; Holmström et al., 2008; Ekenbäck et al., 2010; Bourrier & Lecavelier des Etangs, 2013)

Lyman- α transit of HD209458b (Vidal-Madjar et al., 2003)



Bourrier & Lecavelier des Etangs (2013)より

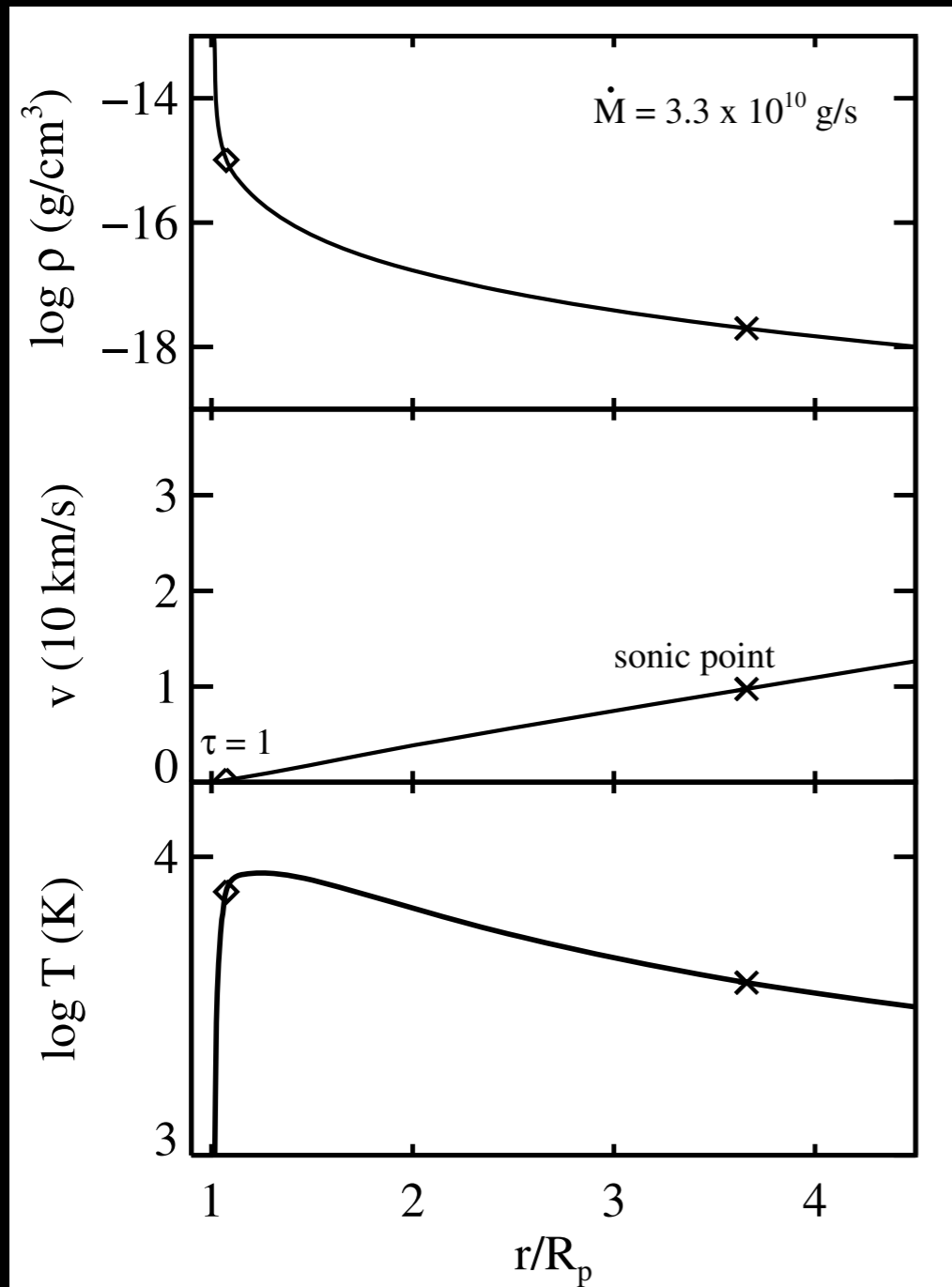
$10^9\text{-}11 \text{ g s}^{-1}$ の大気散逸 (EUV駆動?)
+ 輻射圧, 電荷交換による加速 が観測と整合的

EUV加熱による熱的大気散逸

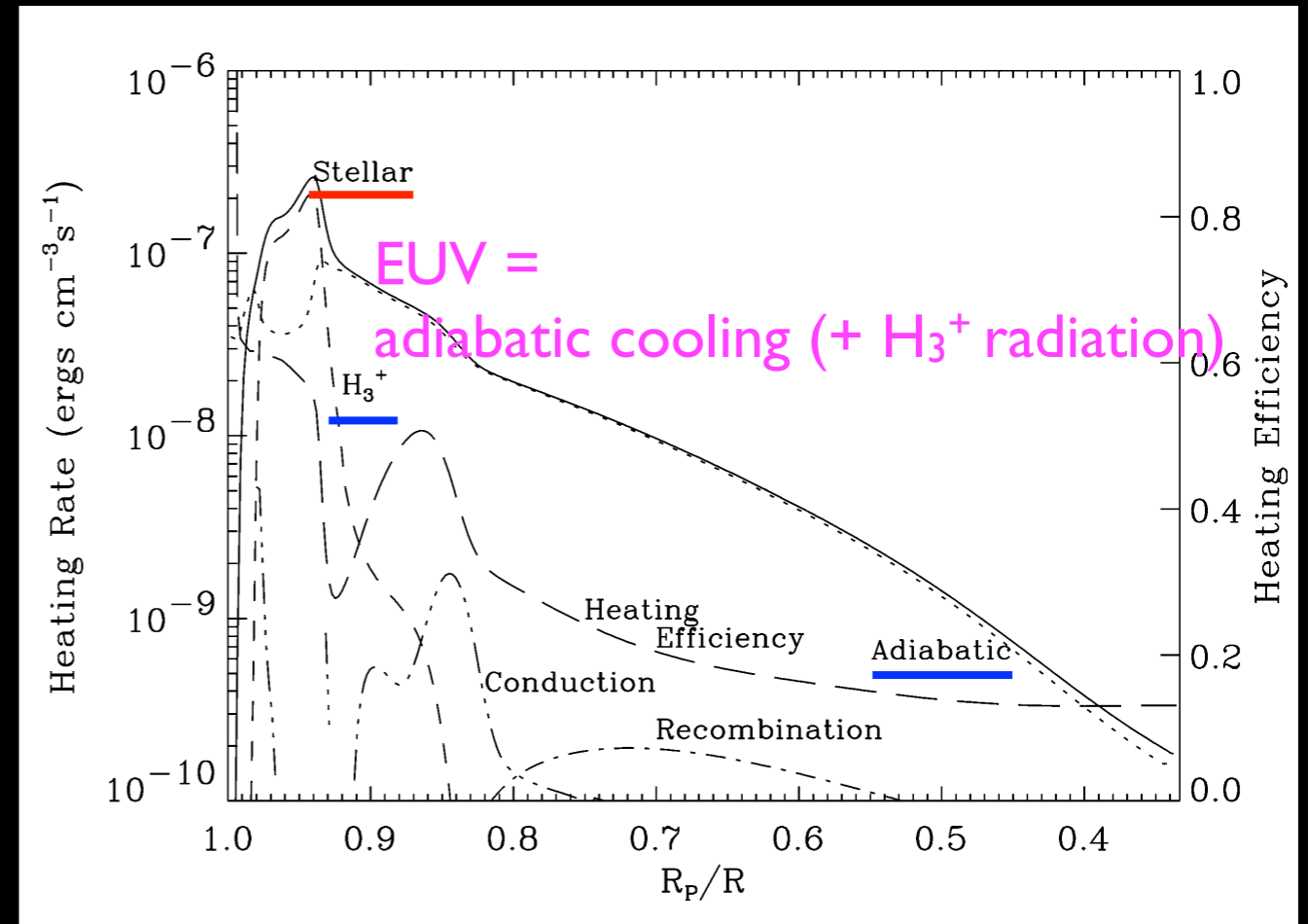
EUV加熱で $10^{9-11} \text{ g s}^{-1}$ の大気散逸率は実現可能

(Lammer et al., 2003; Yelle, 2004, 2006; Tian et al., 2005; García Muñoz, 2007, Murray-Clay et al., 2009; Guo 2011, 2013)

大気散逸構造 (Murray-Clay et al., 2009)



上層大気のエネルギー収支 (Yelle, 2004)



恒星EUVが大気を加熱し、
エネルギー律速の流体的散逸が起こる

大気散逸が惑星組成・分布に与える影響

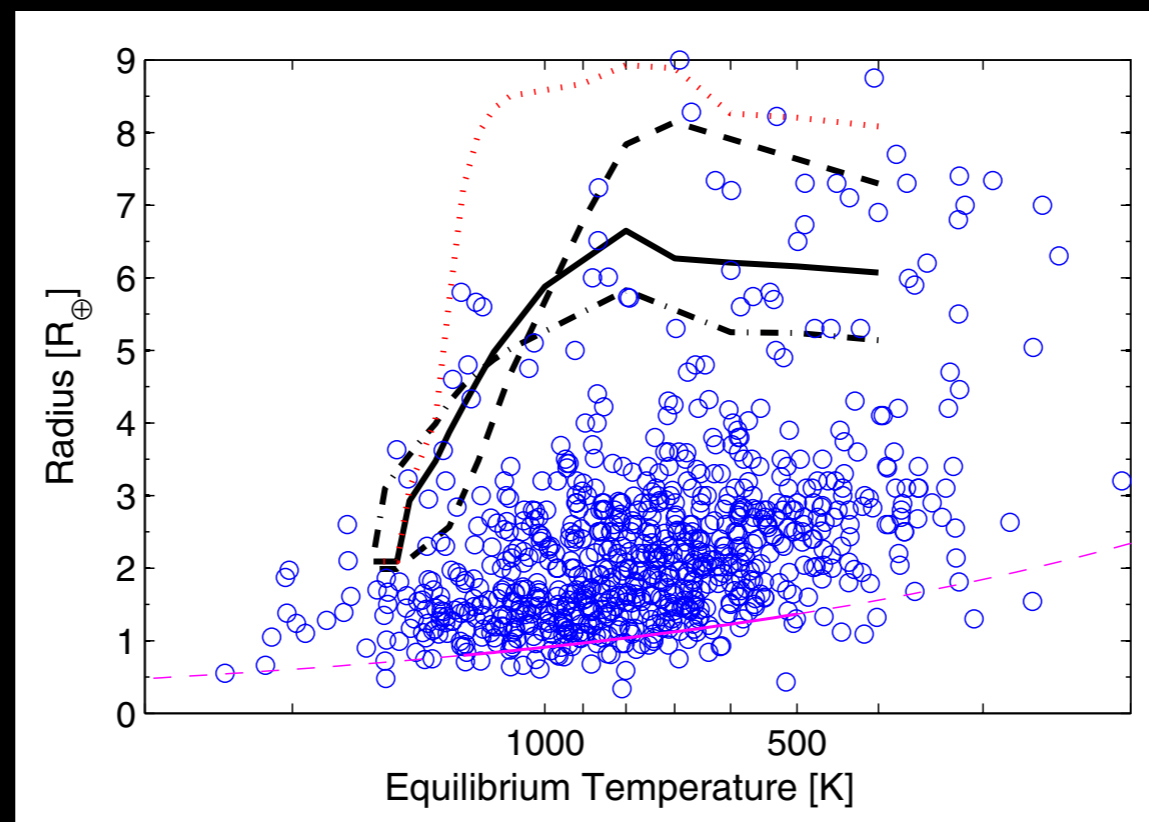
EUVが大気散逸を引き起こす場合、

恒星は初期にEUV光度が1-2桁大きいいため、惑星組成に影響するほどの大気散逸が起こる

(Valencia et al., 2010; Lopez et al., 2012; 黒川 & Kaltenegger, 2013; Owen & Wu, 2013; Lopez & Fortney, 2013; 黒川 & 中本 投稿中 など)

H/He大気の散逸を考慮したsuper Earthの惑星半径と

Kepler惑星候補天体の比較 (Owen & Wu, 2013)



しかし、惑星組成・分布は形成過程とその後の大気散逸の両方の影響を受けている

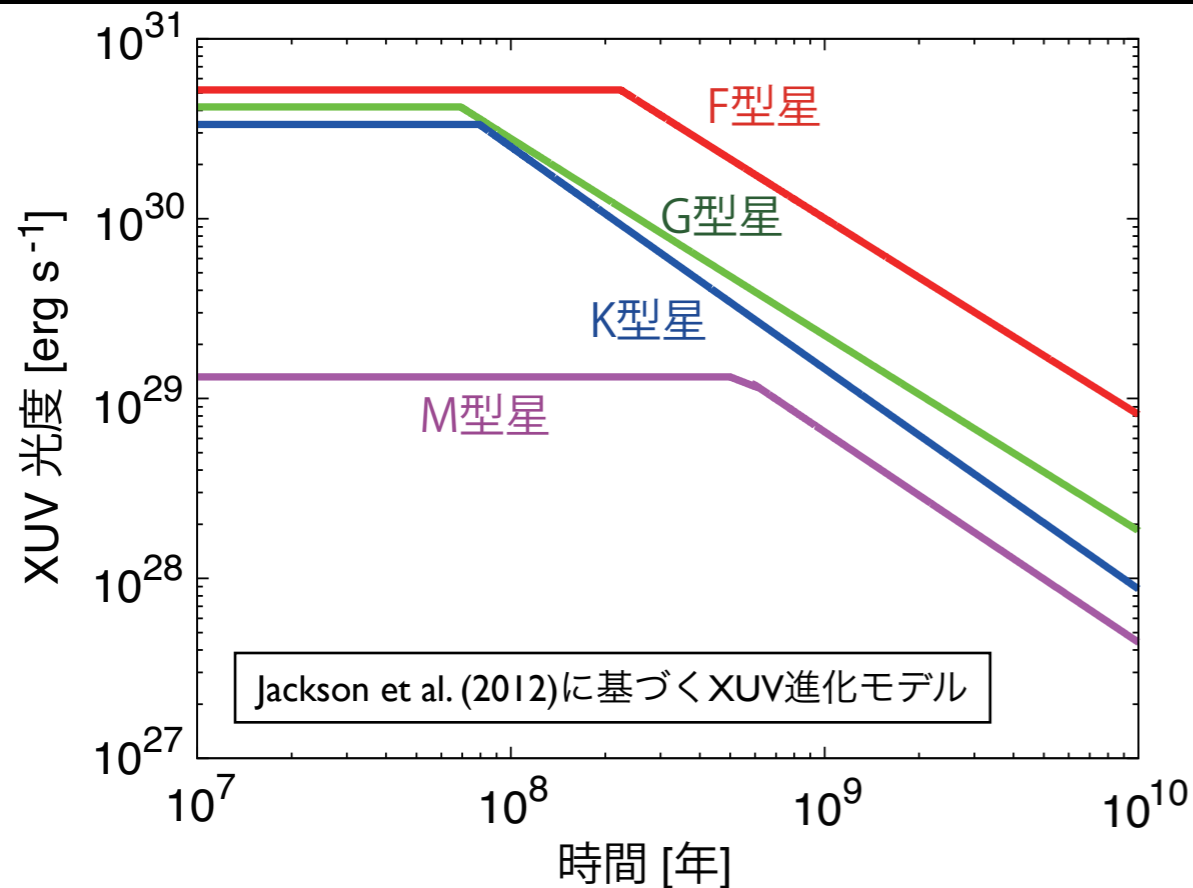
- Super EarthのH/He大気量は円盤温度、円盤散逸時間に依存 (生駒 & 堀, 2012)

- 固体質量に依存 (Mordasini et al., 2012)

どう区別するか？

恒星スペクトル型の違いを考慮した大気散逸進化

XUV光度の時間進化



- 大気散逸に寄与する恒星XUV(X-ray + EUV)光度は恒星スペクトル型によって数桁異なる

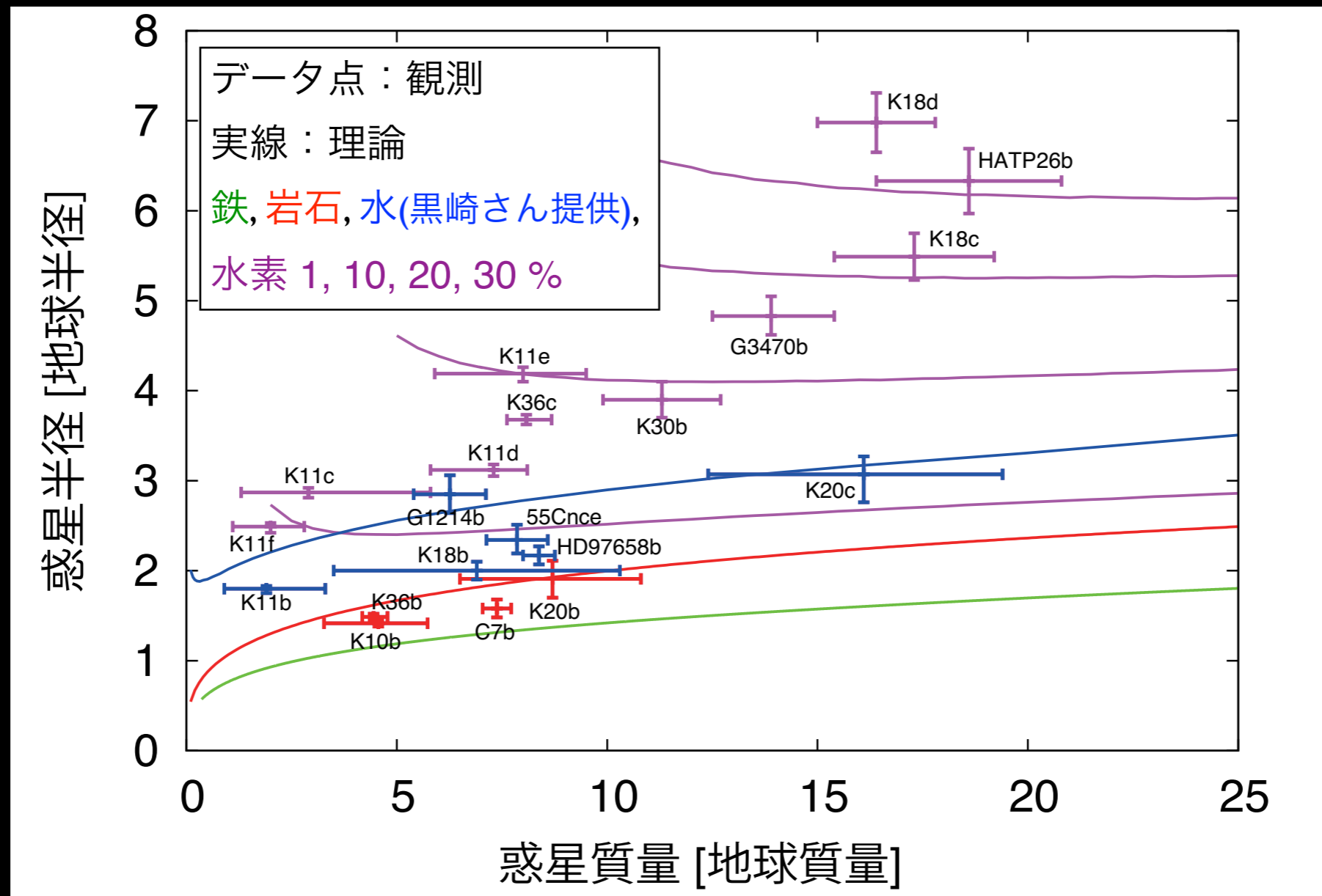
恒星スペクトル型への依存性を調べることで、形成過程と大気散逸進化過程を分離して議論できるはず

研究目的

大気散逸を考慮した惑星組成の時間進化計算を恒星スペクトル型ごとに行い、観測と比較
惑星組成に対する形成過程と大気散逸の影響を分離して議論する (黒川, Kaltenecker, & 中本, 投稿準備中)

Super Earthの組成と分布

Super Earthの質量-半径の観測と様々な組成に対する理論計算の比較



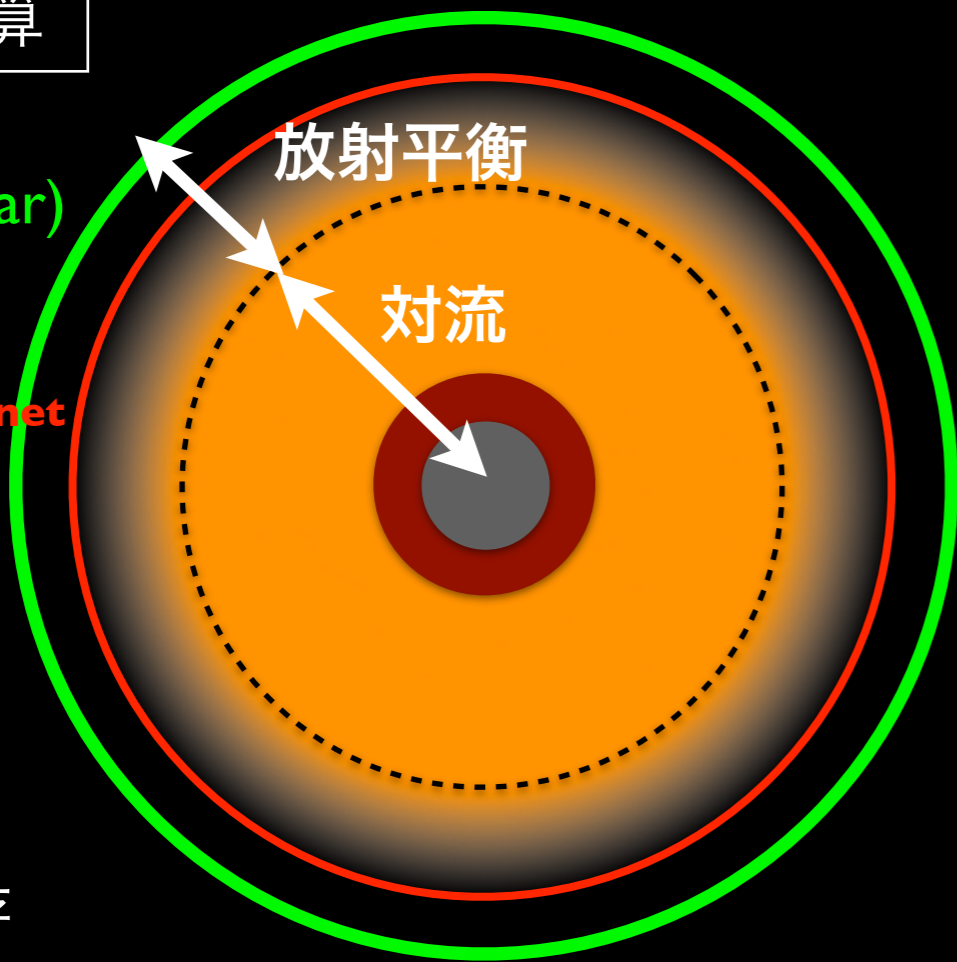
Super Earthの質量・半径から組成を推定し、
軌道半径分布を大気散逸計算の結果と比較

モデル

構造計算

R_{XUV}
($p=1\text{ nbar}$)

R_{planet}



質量保存

静水圧平衡

放射平衡 (灰色近似) or 対流 (断熱温度勾配)

状態方程式

水素大気 - Saumon et al. (1995)

固体コア - Wagner et al. (2011)

大気不透明度

水素大気 - Freedman et al. (2008)

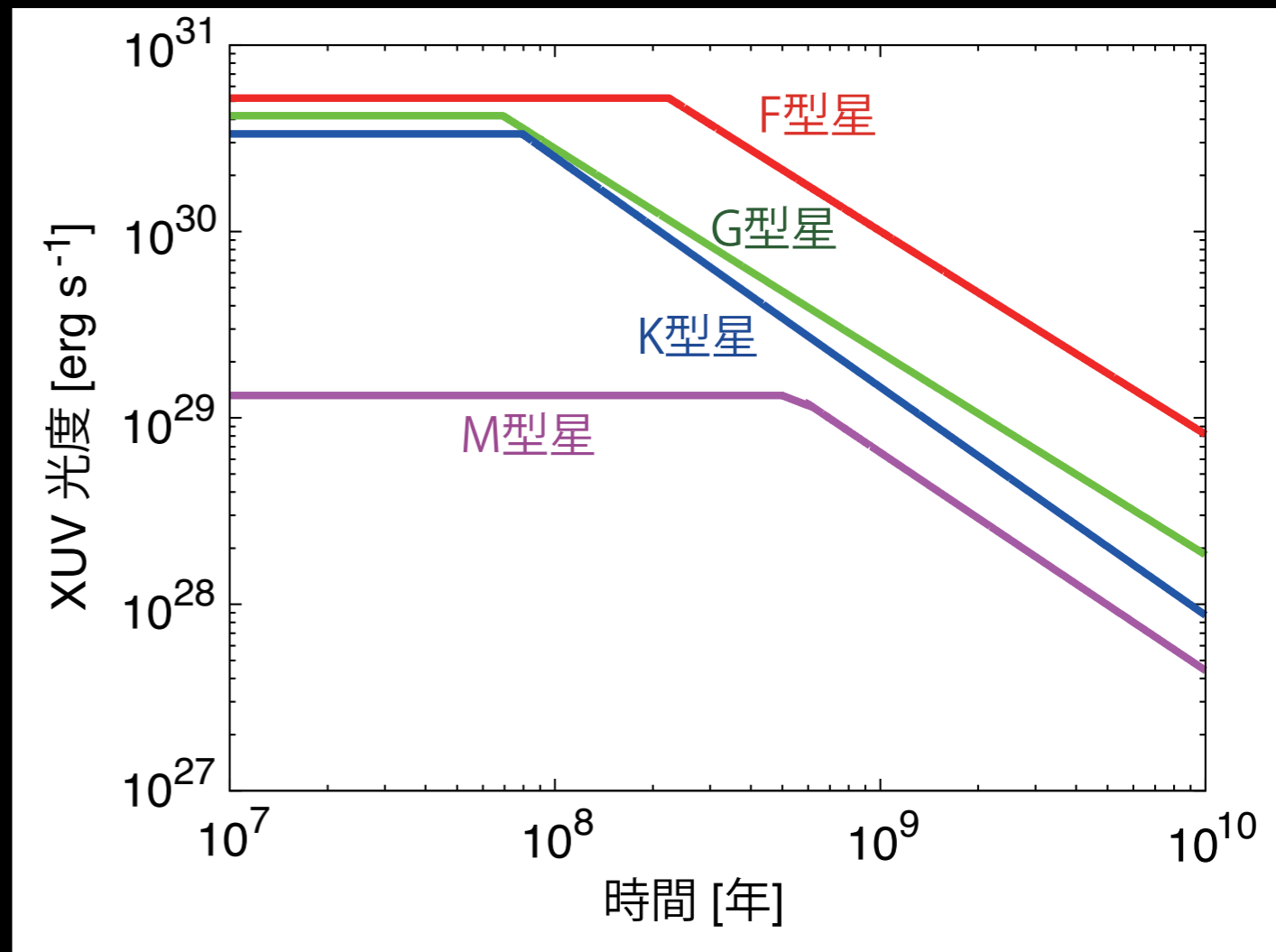
進化計算

熱進化 + 大気散逸 (エネルギー一律速)

$$\frac{dM_p}{dt} = \frac{\eta \pi F_{XUV} R_{XUV}^3}{GM_p K_{\text{tide}}} \quad (\text{e.g., Lopez et al., 2012})$$

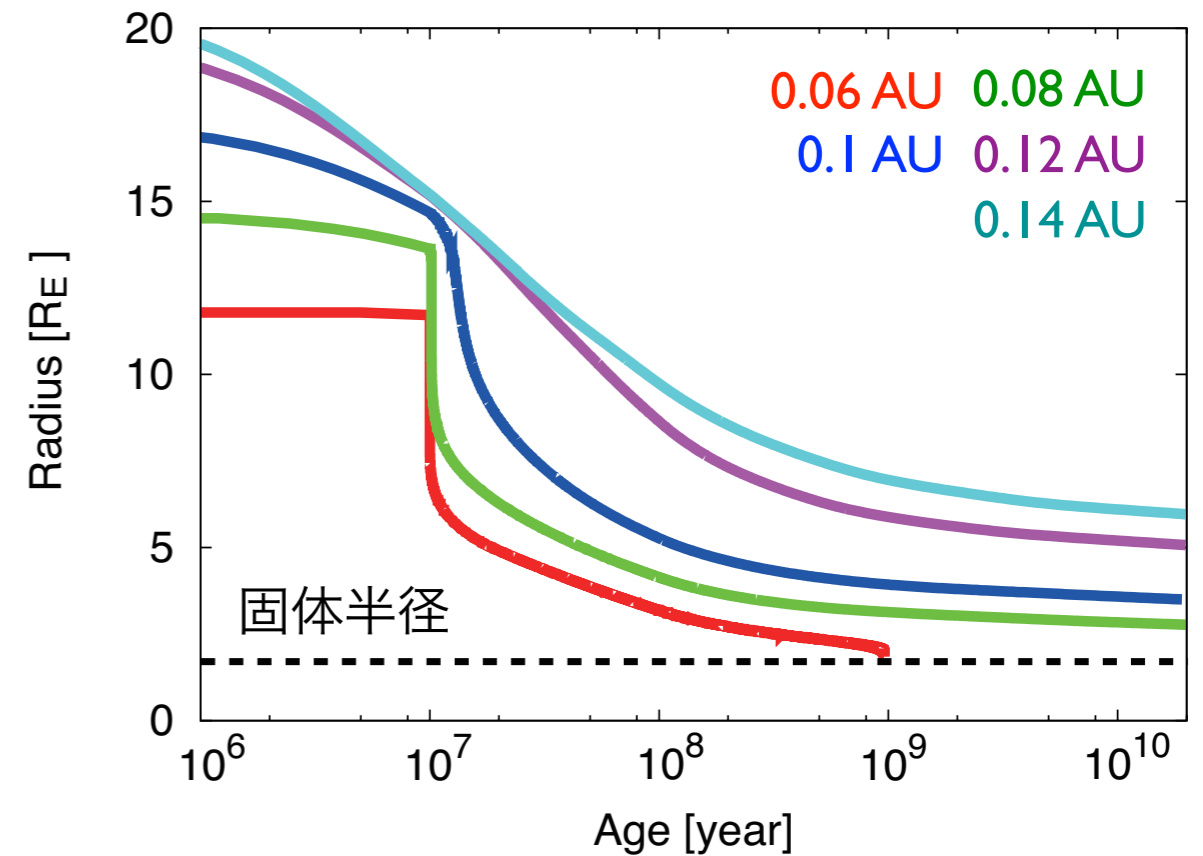
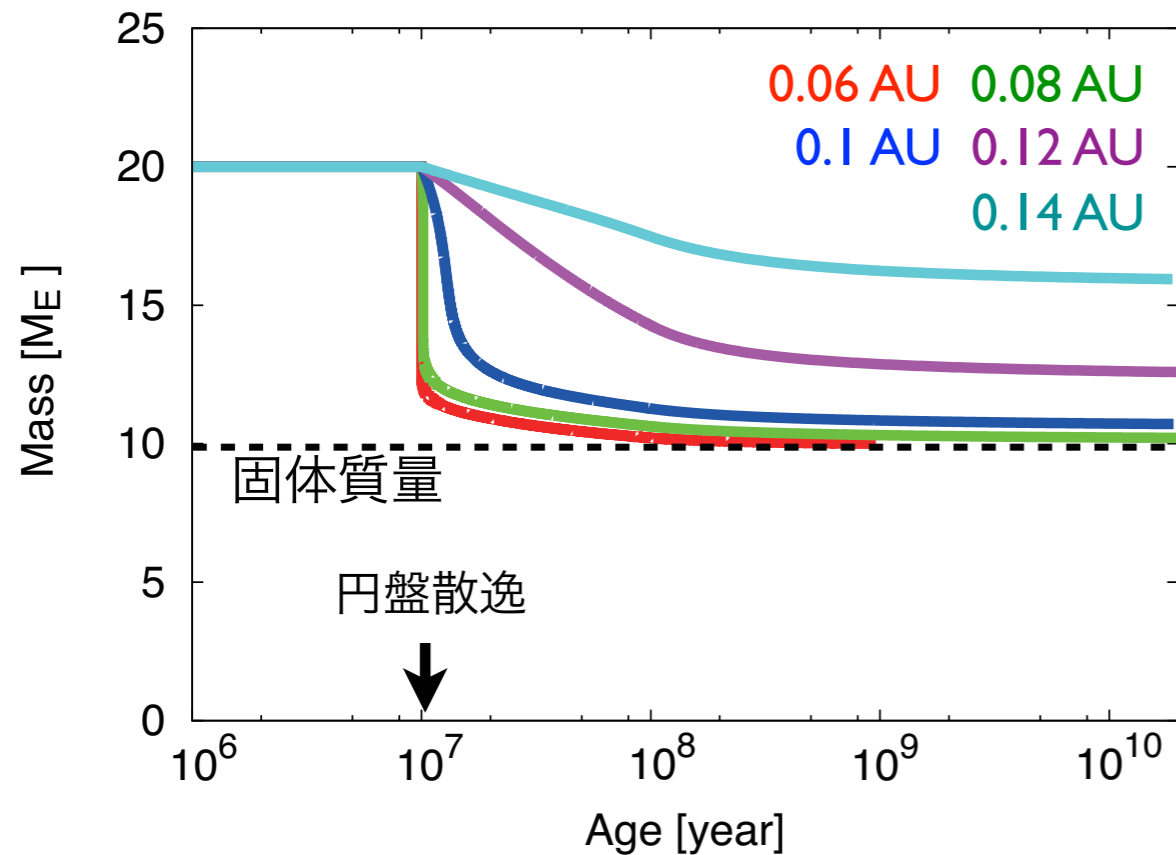
XUV光度の時間進化

Jackson et al. (2012)に基づくXUV進化モデル



Super Earthの進化計算の例

固体質量 $10M_{\text{Earth}}$, 大気質量 $10M_{\text{Earth}}$ の質量進化(左)と半径進化(右)



軌道半径が大きいほど水素大気保持可能

→ 受け取るXUV放射量が小さいため

水素大気を保持できる閾値となる軌道半径が存在

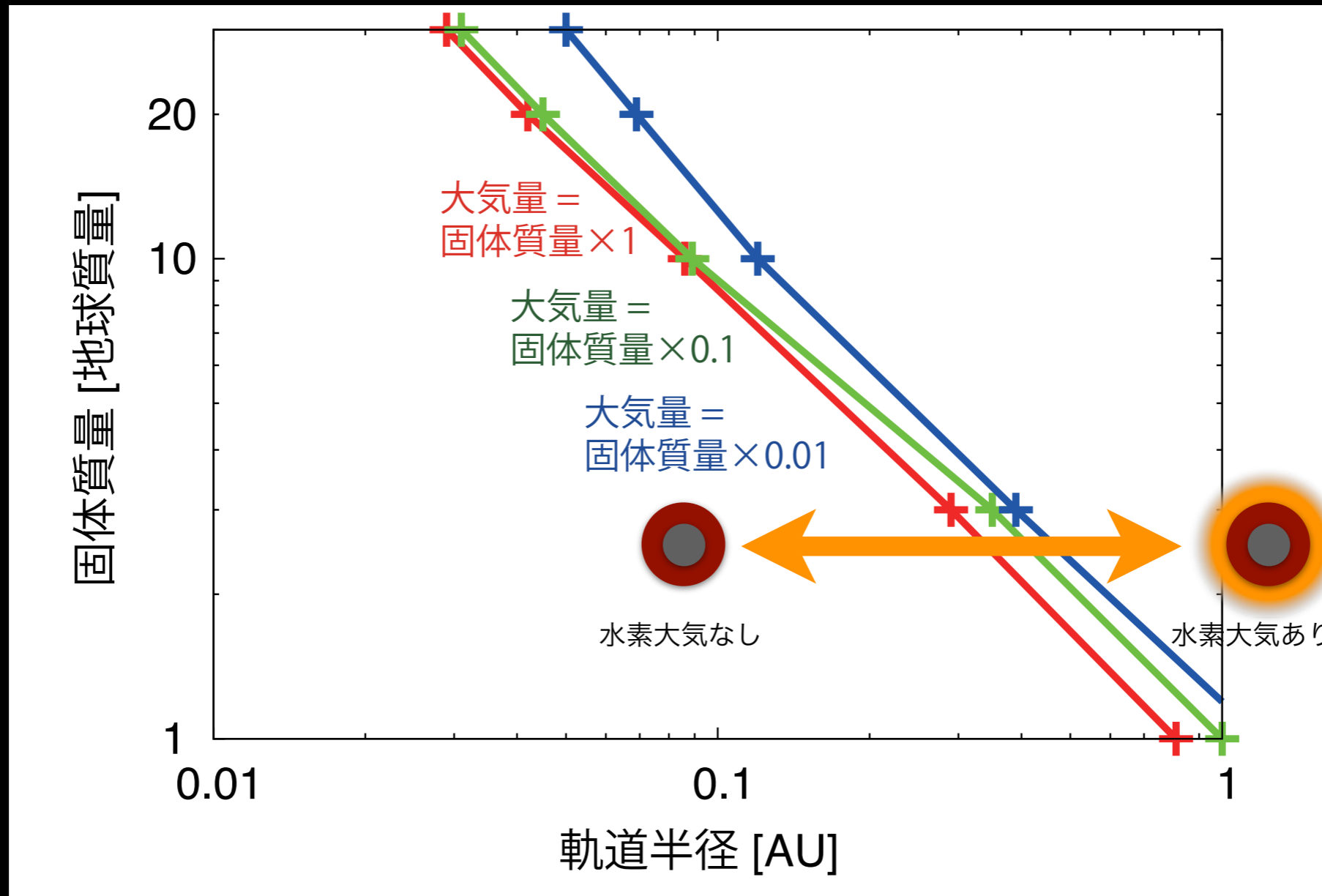
初期 $\sim 10^8$ 年に大部分の散逸が終わる

→ 中心星XUV光度のsaturation phase $\sim 10^8$ 年などに起因

観測される典型的な年齢 $\sim 10^9$ - 10^{10} 年においては年齢に依存せず議論可能

水素大気を保持できる/できない条件 (G型星)

100億年間で水素大気を失う軌道半径



- 固体質量への依存性大きい

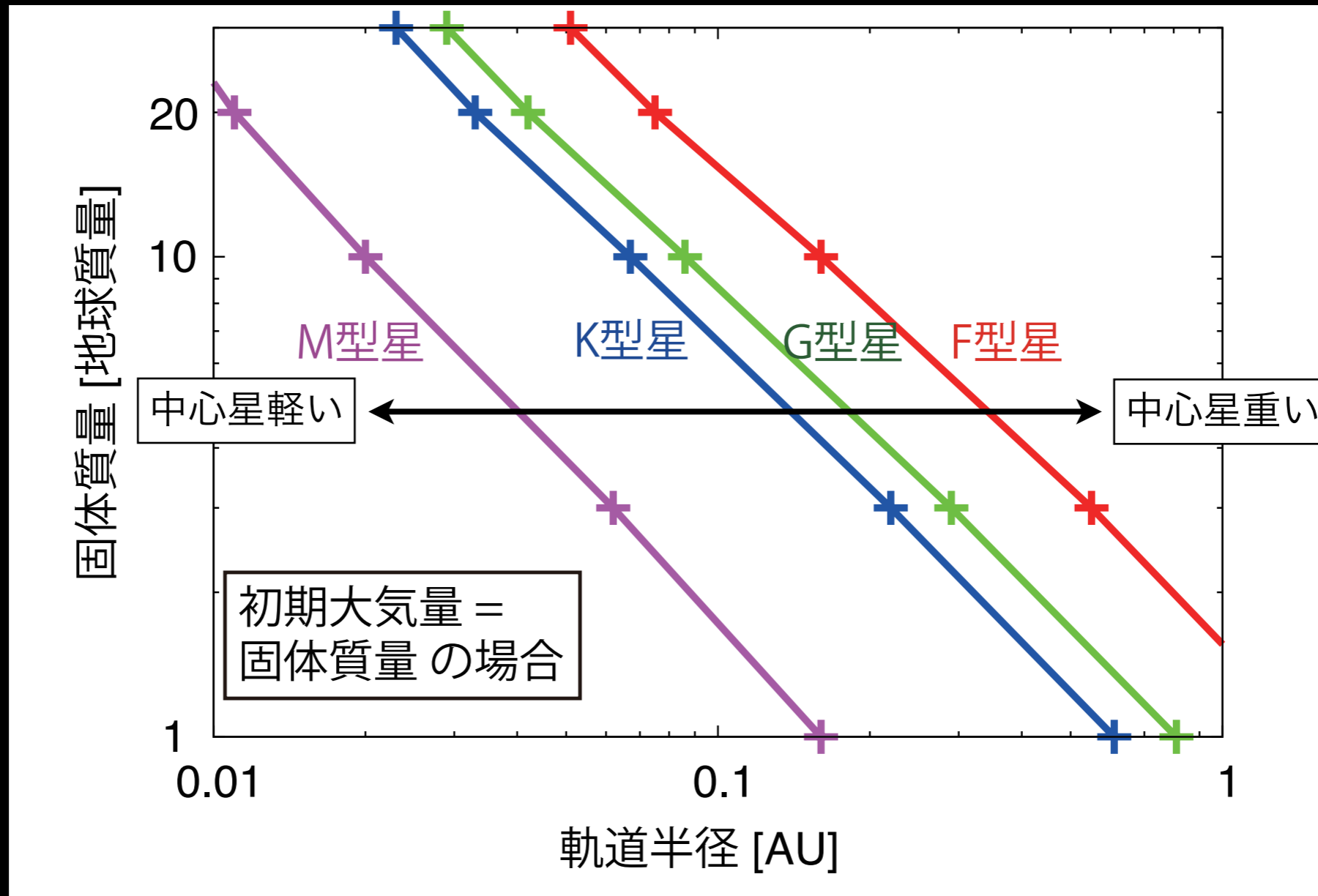
水素大気を失う軌道半径 \propto 固体質量⁻¹

- 初期大気質量への依存性小さい

大気量が多いと惑星半径大きく大気散逸率大きい

中心星スペクトル型への依存性

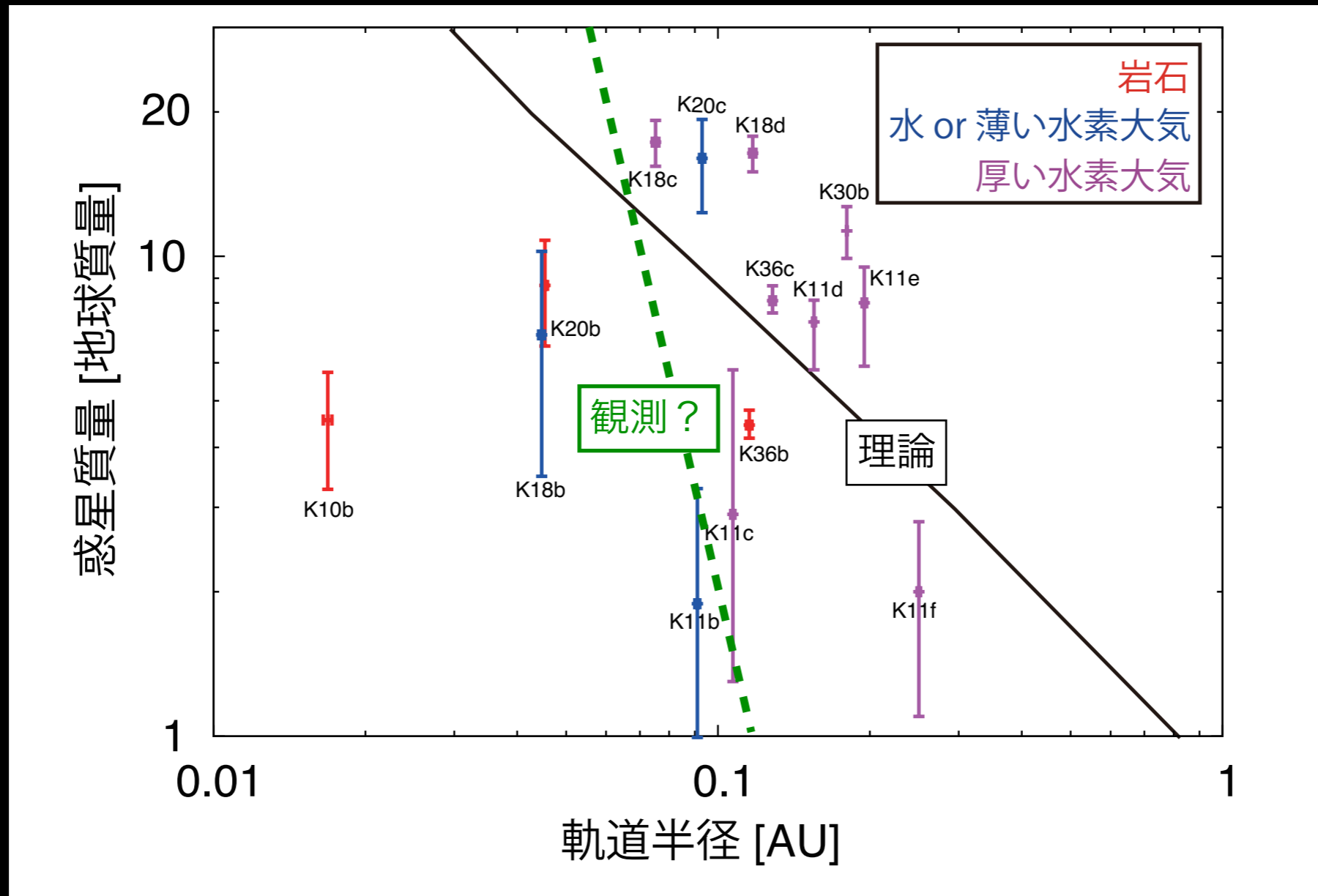
100億年間で水素大気を失う軌道半径



- 軽い中心星ほど **super Earth** は水素大気保持
主にXUV光度の違いに起因
- 固体質量への依存性はスペクトル型によらず同じ
水素大気を失う軌道半径 \propto 固体質量⁻¹

観測との比較：G型星

大気散逸で水素大気を失う軌道半径とSuper Earthの組成との比較

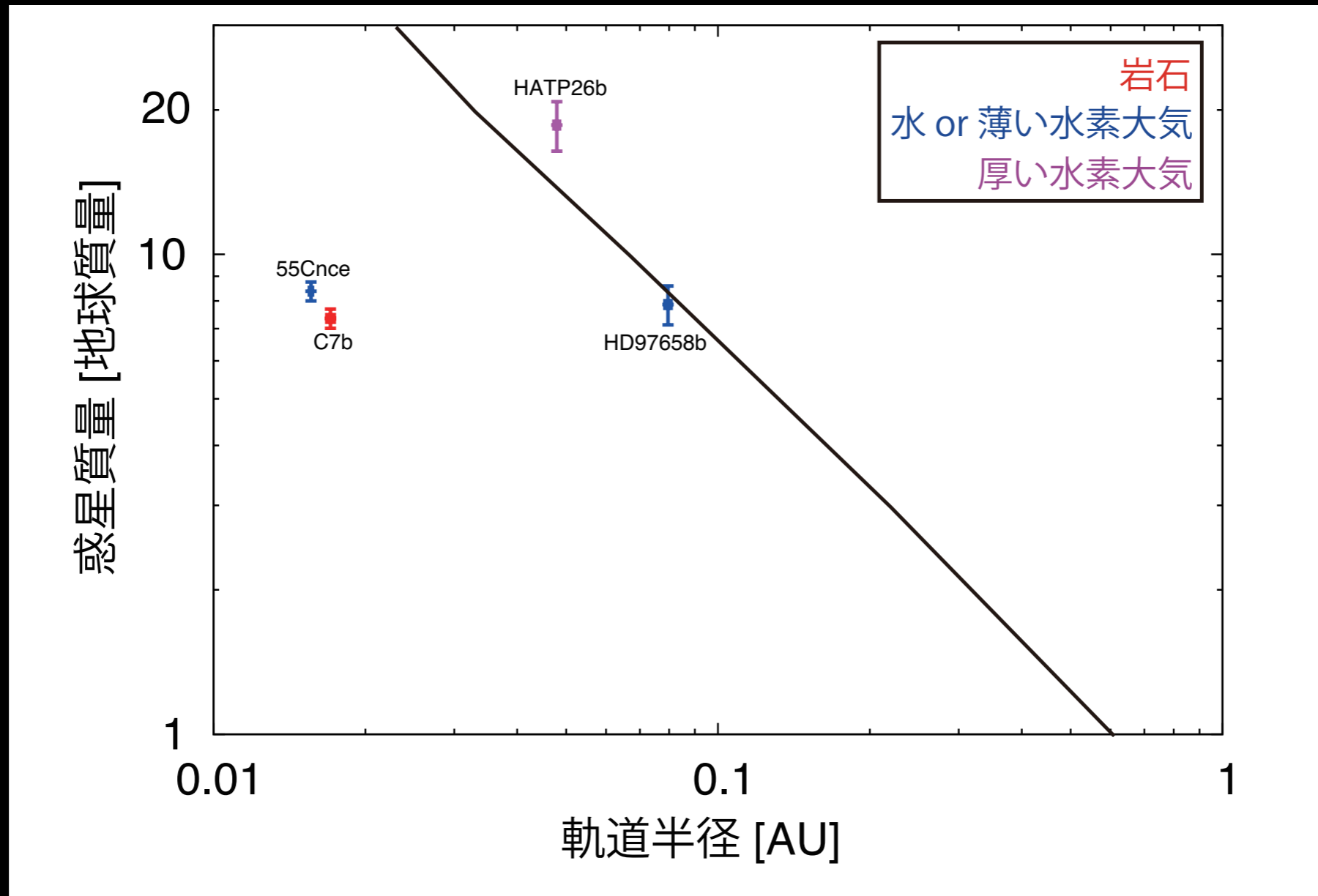


観測の示す惑星質量依存性は理論の予測より小さい？

ただしKepler-11c,fを除けば整合的

観測との比較：K型星

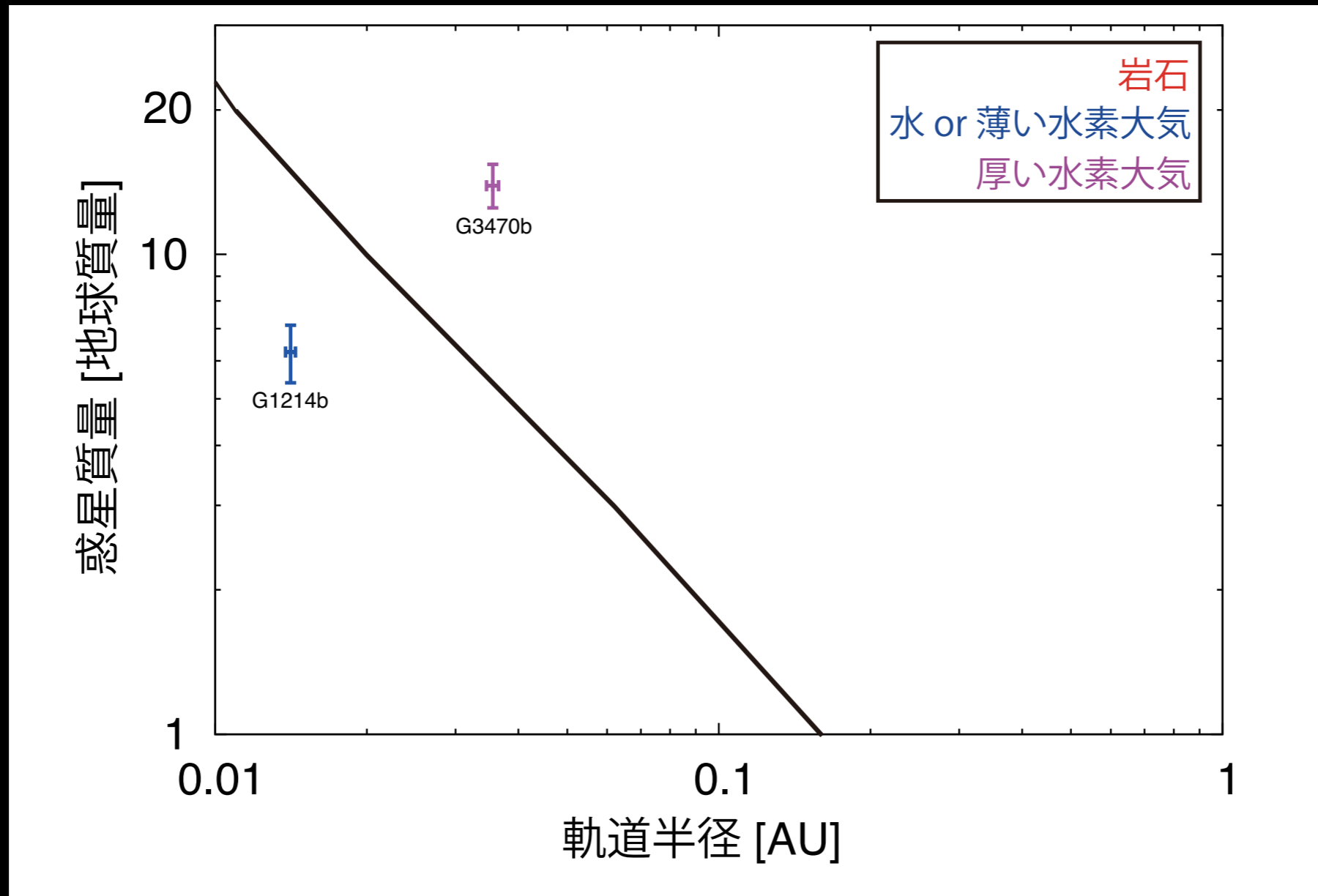
大気散逸で水素大気を失う軌道半径とSuper Earthの組成との比較



観測数は少ないが理論と観測は整合的

観測との比較：M型星

大気散逸で水素大気を失う軌道半径とSuper Earthの組成との比較



観測数は少ないが理論と観測は整合的

まとめと議論

理論：

- ・ 質量依存性大：軌道半径 \propto 質量 $^{-1}$
- ・ 中心星が軽いほど小さい軌道半径でも水素大気保持

観測との比較：

理論の予測より質量依存性小さい？ (G型星)

散逸律速メカニズムの遷移を考慮すると

質量依存性は大きくはなるが小さくするのは難しい

ただしKepler-11c,fを除けば

すべてのスペクトル型について整合的

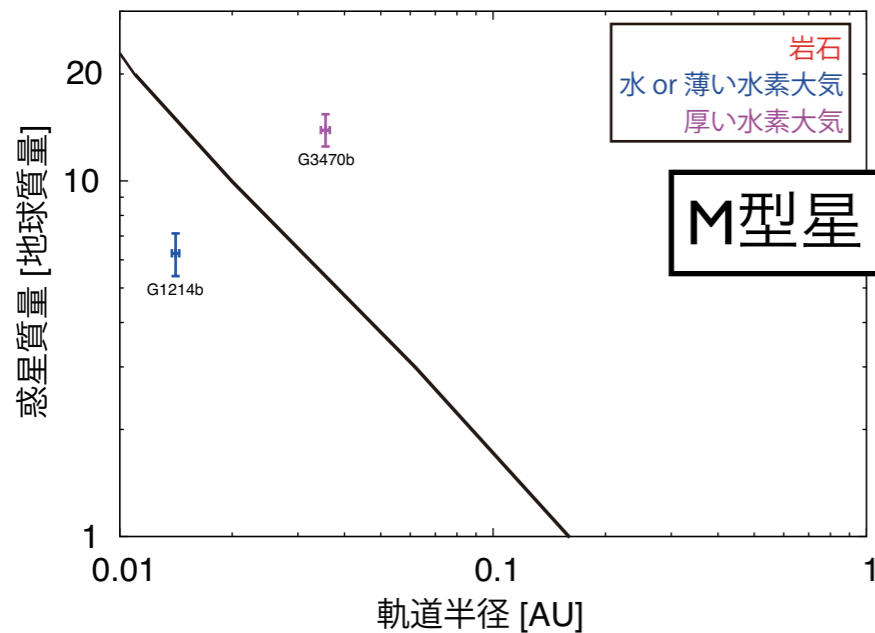
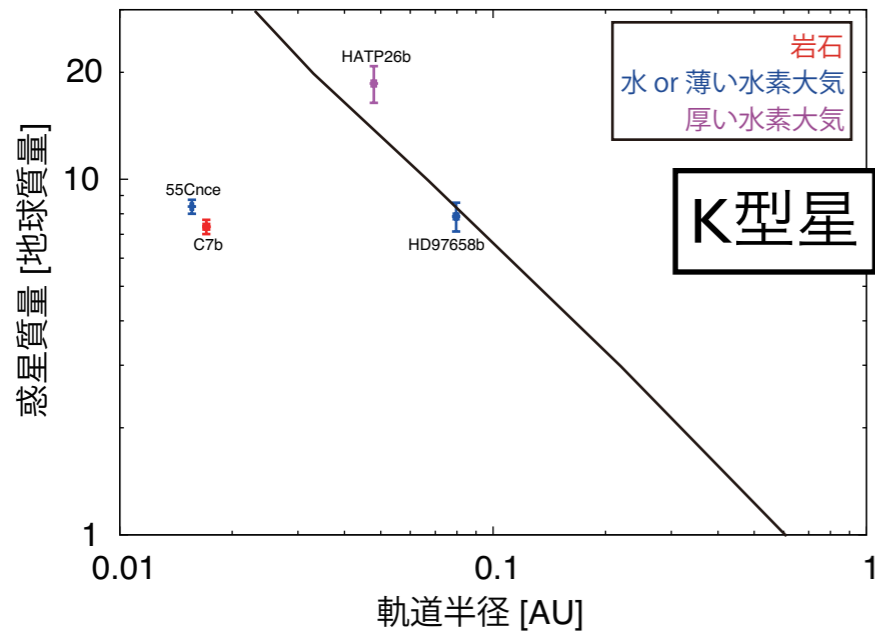
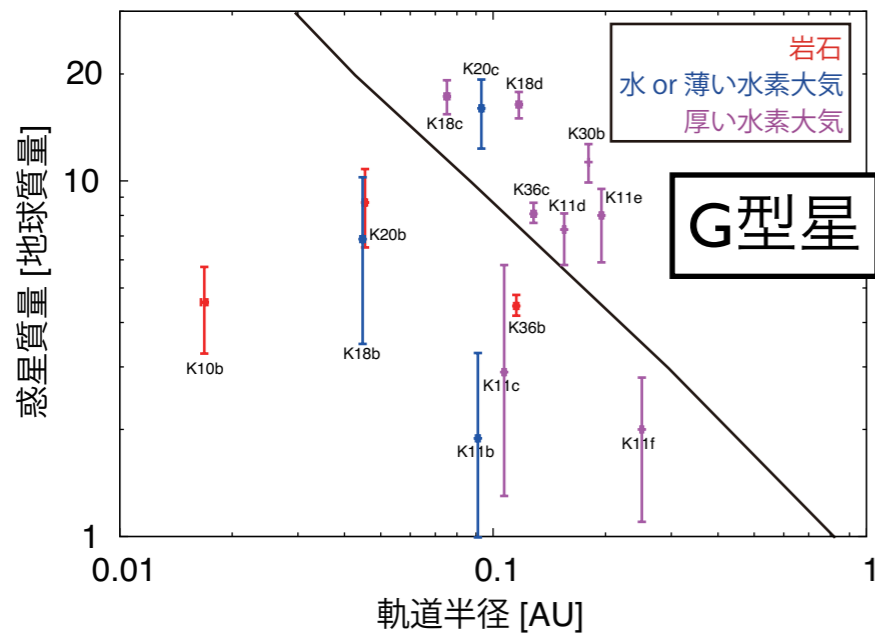
可能性1- 大気散逸計算は絶対値として過大評価であり、

現在の分布は形成過程を反映

可能性2- Kepler-11は例外的にXUV活動度が小さく、

現在の分布は大気散逸を反映

(XUV光度は同じスペクトル型でも一桁程度の多様性あり)



惑星形成論への示唆

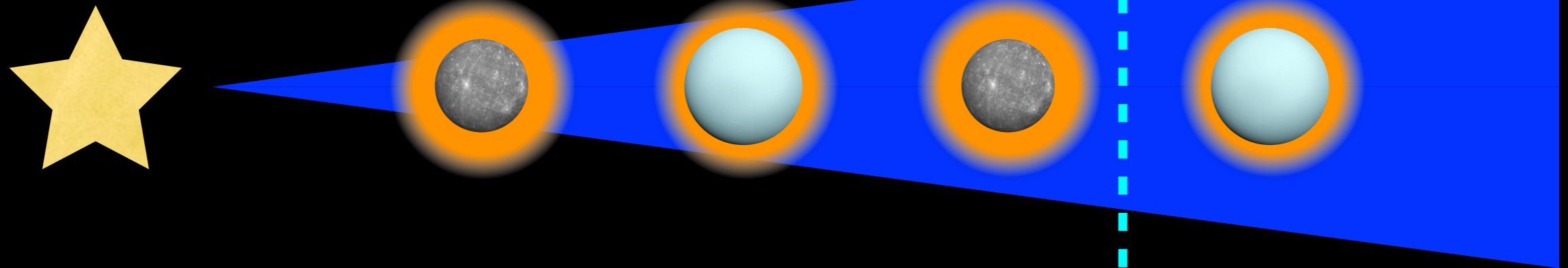
閾値となる軌道半径の内側(=スノーライン内側)に氷super Earth存在

→ migrationを経験

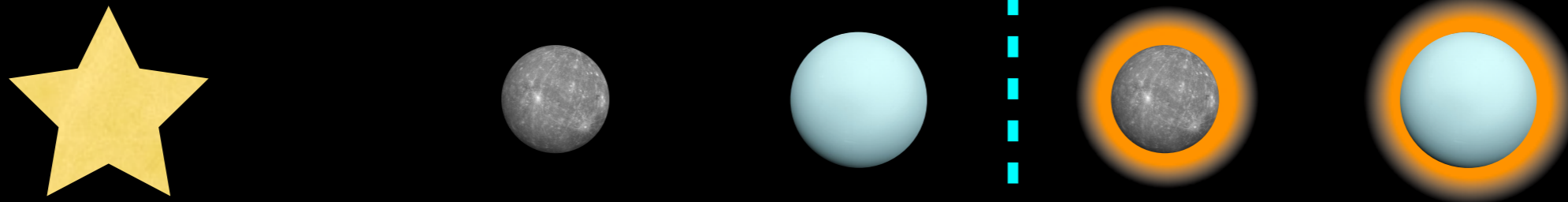
閾値となる軌道半径の外側でH/He大気量にばらつき

→ 形成過程でばらつきが生じる？

Formation phase: migration + gas capture (diversity of mass)



Evolution phase: atmospheric mass-loss



snow line ~ 1 AU

evaporation line ~ 0.1 AU