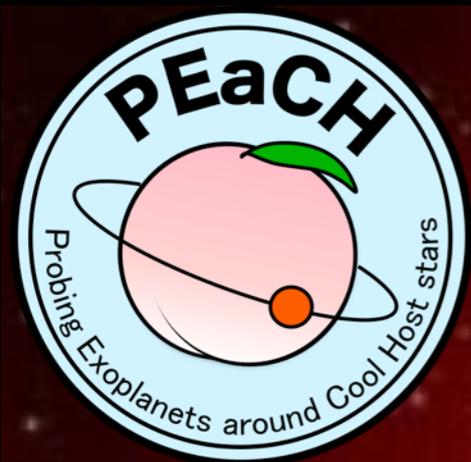


太陽系外巨大惑星(大気)の今とこれから

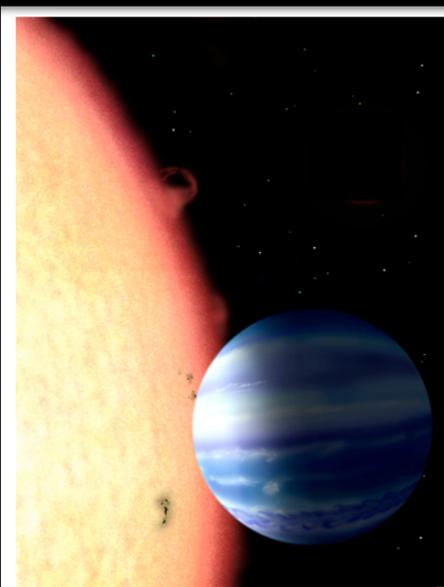


堀 安範

国立天文台 理論研究部

Part I Hot Jupiters

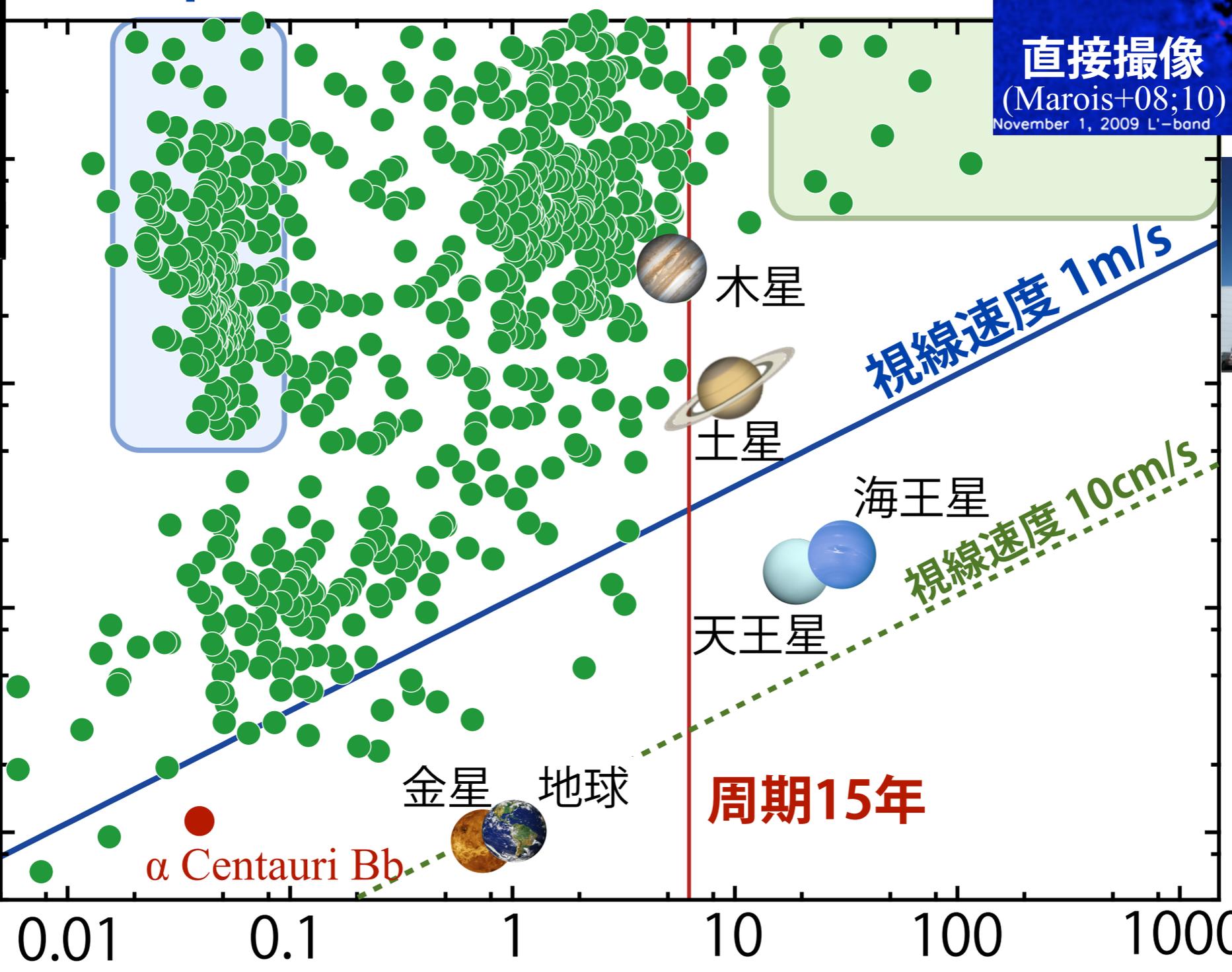
太陽系近傍の系外惑星の軌道分布



hot Jupiter

惑星質量 (M_{\oplus})

100
10
1



直接撮像
(Marois+08;10)
November 1, 2009 L'-band



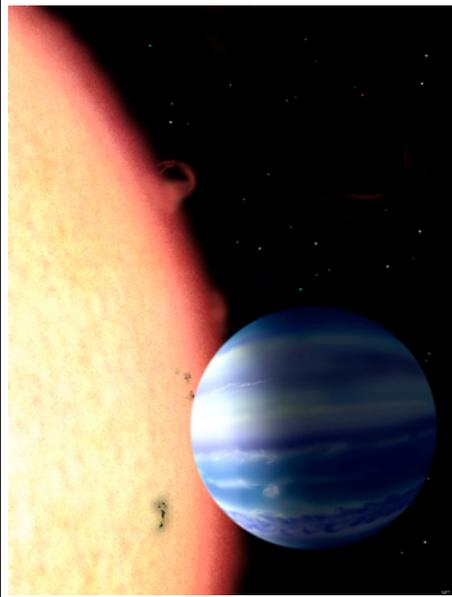
軌道長半径 (AU)

周期15年

視線速度 1m/s

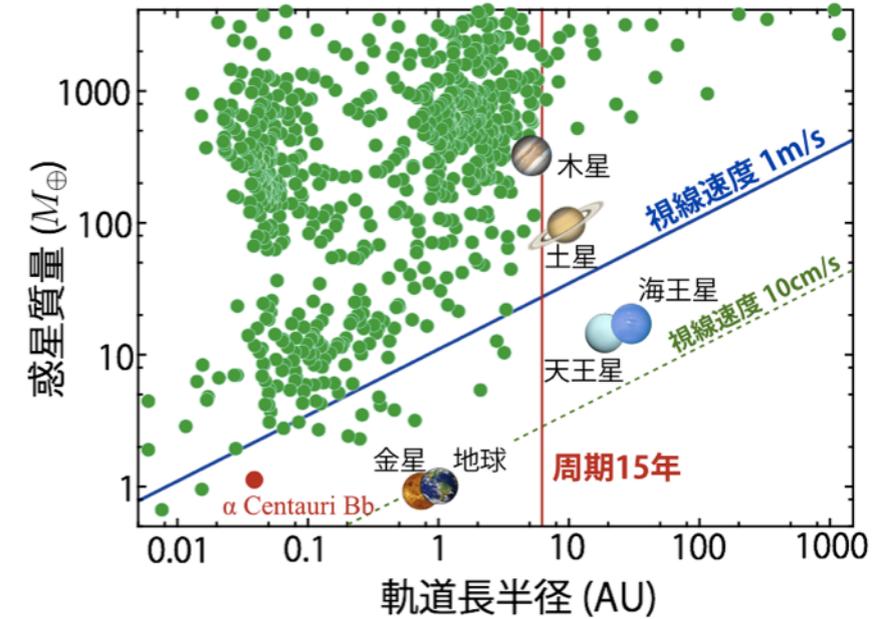
視線速度 10cm/s

太陽系近傍の系外巨大ガス惑星



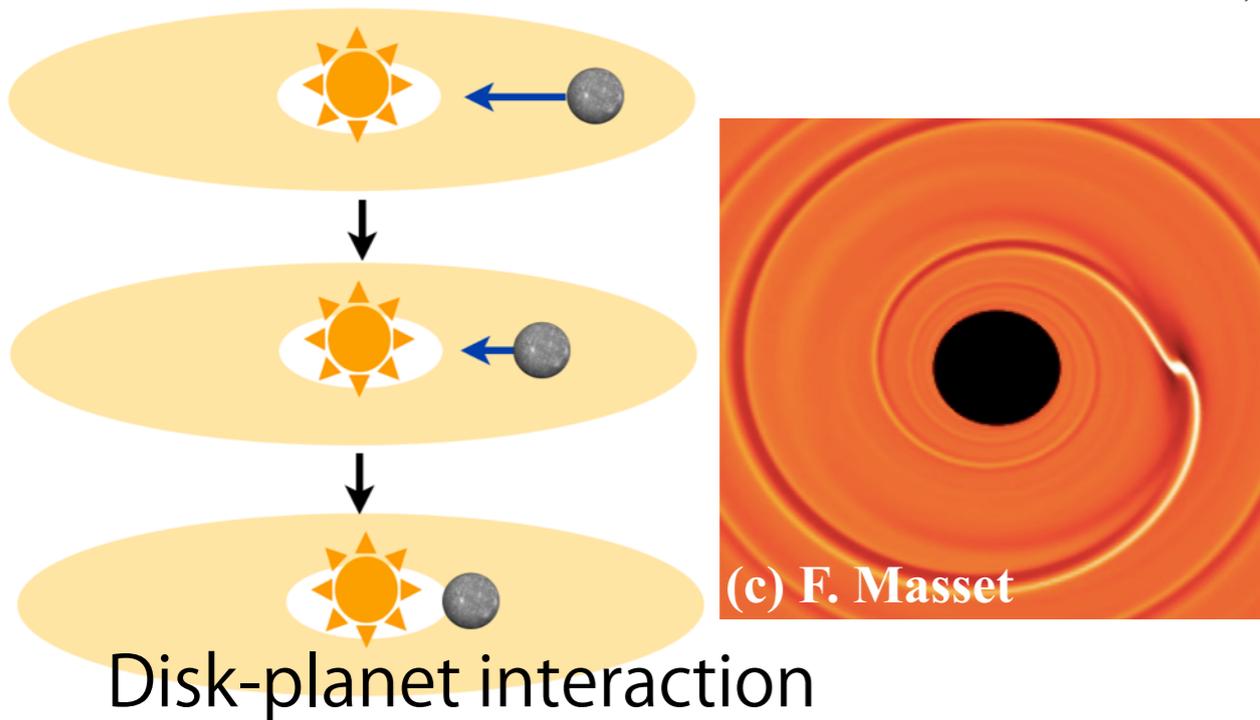
中心星近傍の**ガス惑星** ($\leq 0.1\text{AU}$)
 AFGKM型星周りでの**存在頻度**：数%

- (a) 周期3日付近にpile-up
 → 潮汐固定の状態
- (b) 0.1-1AUの領域では欠乏



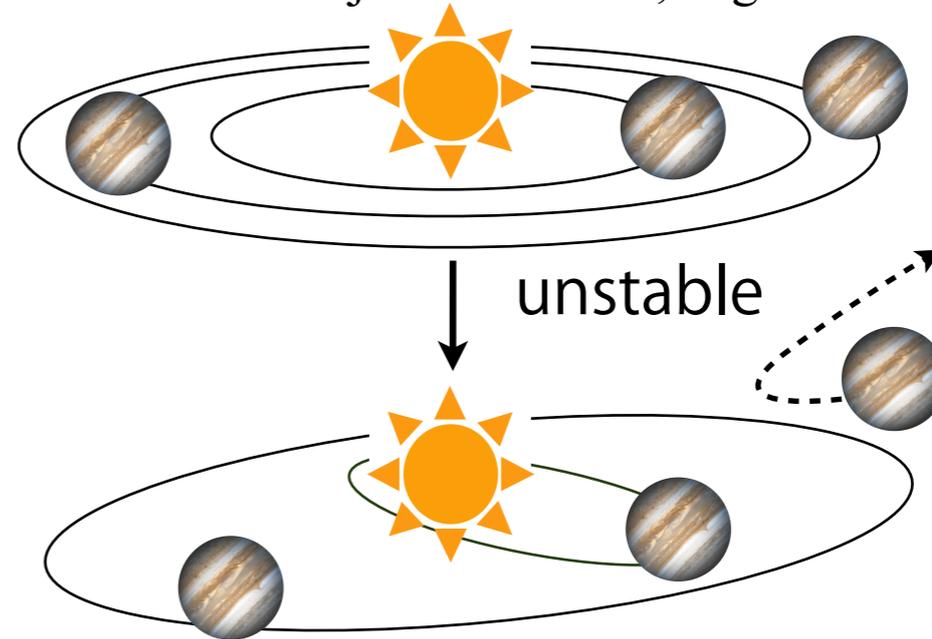
① Type I 型移動

(Goldreich & Tremaine, 1980
 Ward, 1986; Tanaka *et al.* 2002)

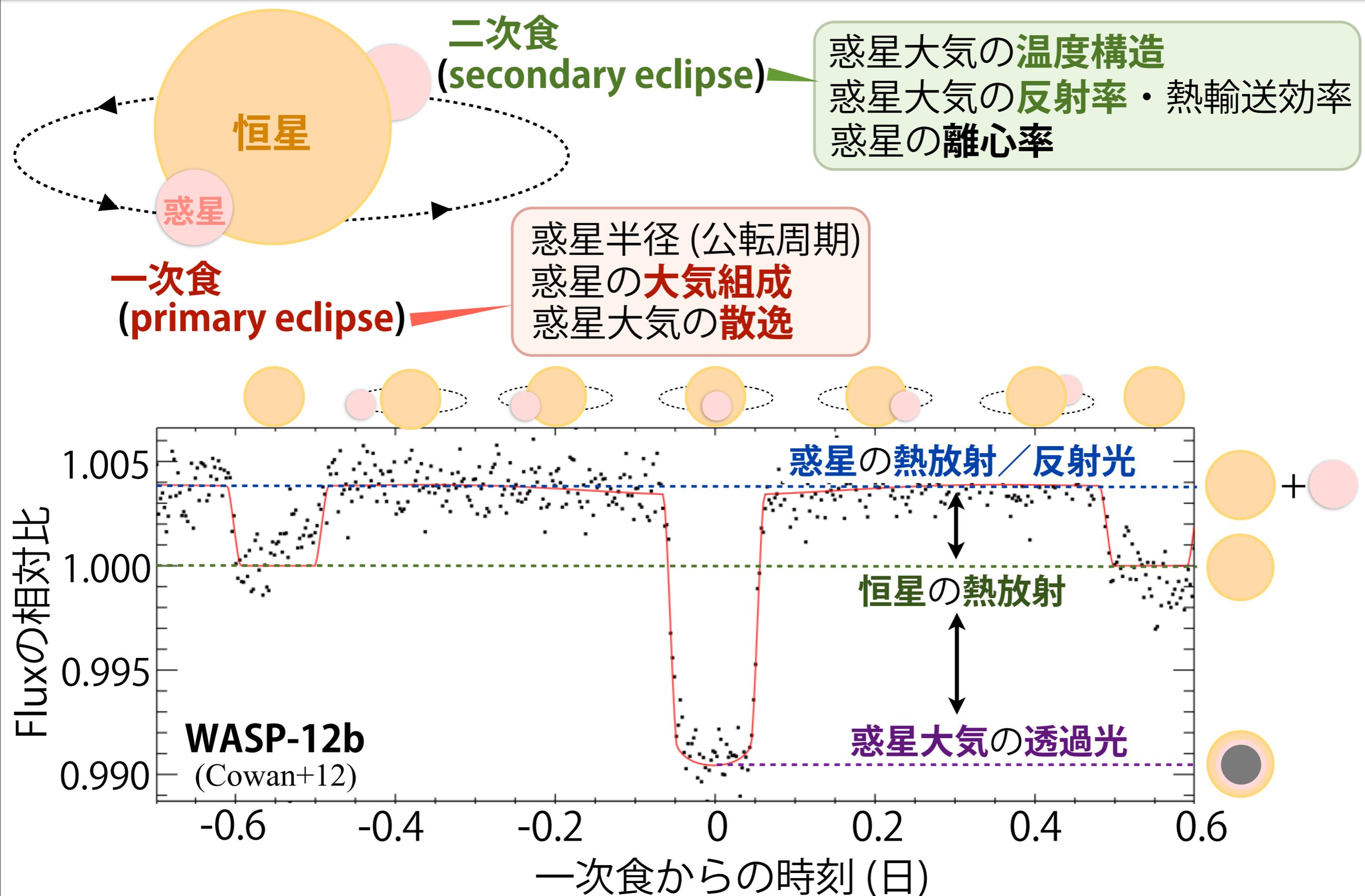


② 惑星同士の重力散乱

(e.g. Rasio & Ford, 1996; Weidenschilling & Marzari, 1996;
 Chatterjee *et al.* 2007; Nagasawa *et al.* 2008)

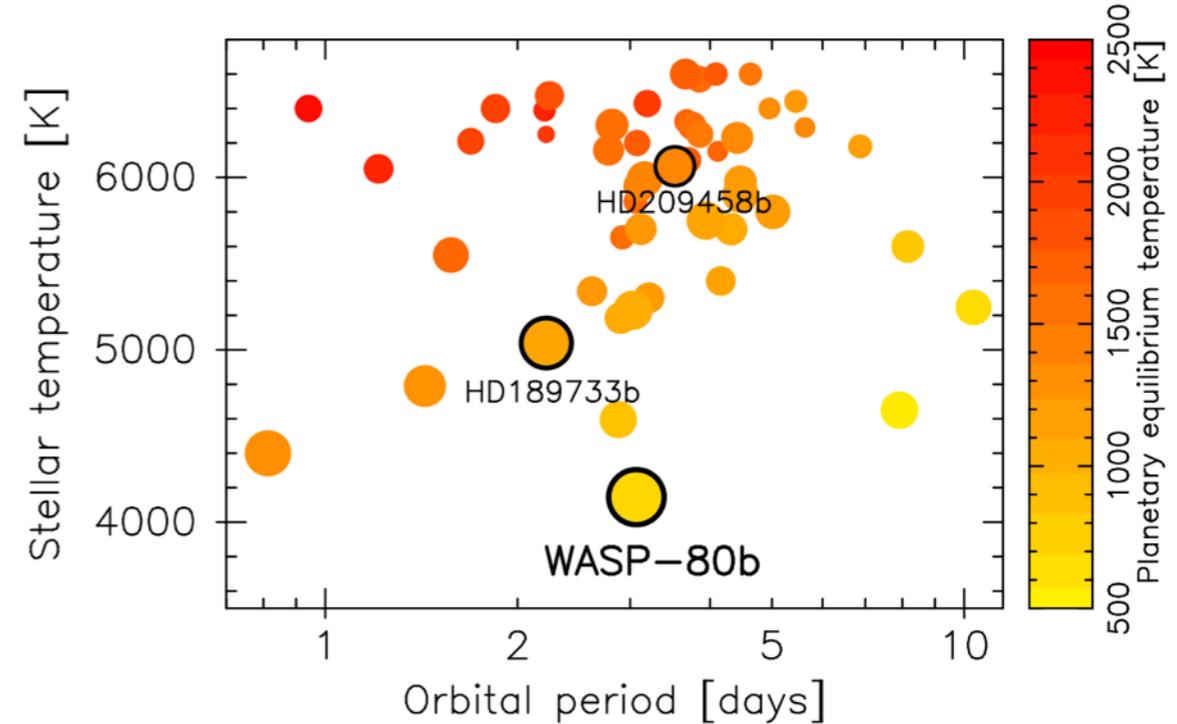
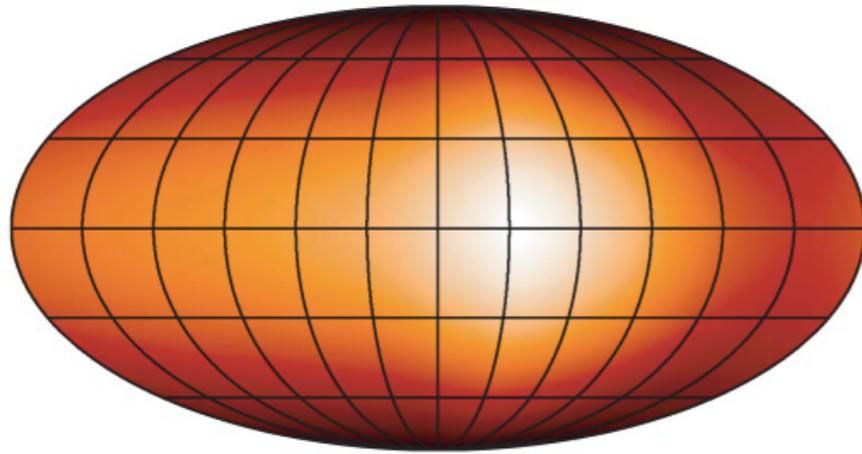


Transit観測から見る惑星の姿



Secondary Eclipseからhot Jupiterの大気構造

多バンド測光観測(主に、**赤外波長域**)
→ 惑星からの**熱放射**

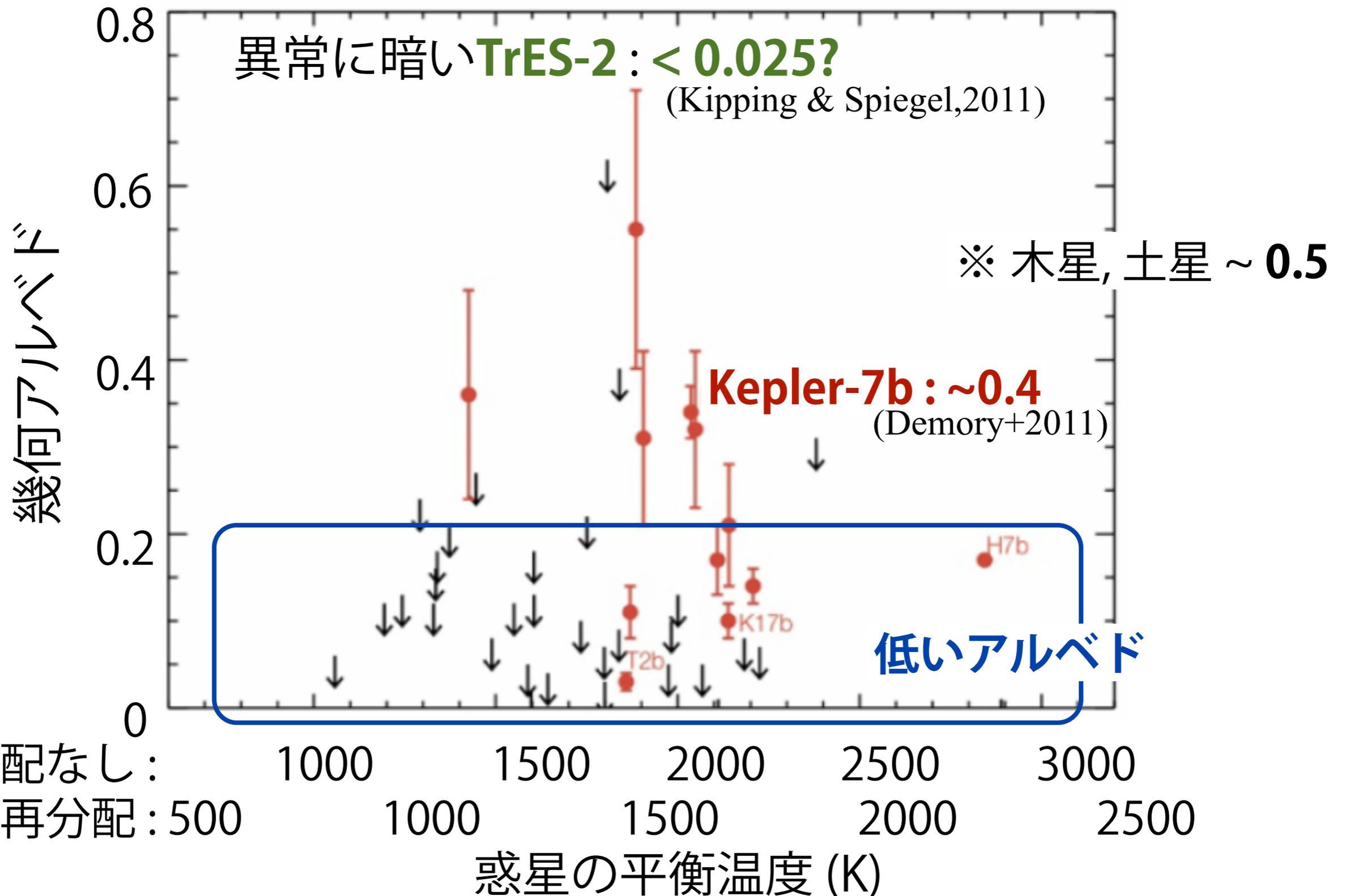


- **平衡温度**(~1000-2000K)
- **Bond アルベド**(< 0.3と低い?)
- 温度の**逆転層**の有無 (温度分布)
- 昼側→夜側への**熱の再分配**：非効率?(~10%, 30%, 60%?)
- 全球の温度マップ
- **H₂O**など**分子種**の存在, 混合比率

(例) WASP-12b, WASP-33b, WASP-19b(?), WASP-18b, HAT-P-1b, CoRoT-1b,2b
HAT-P-7b, HD189733b, WASP-4b, TrES-2, TrES-3, WASP-3b, HAT-P-11b,
OGLE-TR-113b, KELT-1b, Kepler-17b, HD209458b 他

hot Jupiterのアルベドは低い？

潮汐固定されたHJの**昼夜コントラスト** = 反射に起因すると仮定



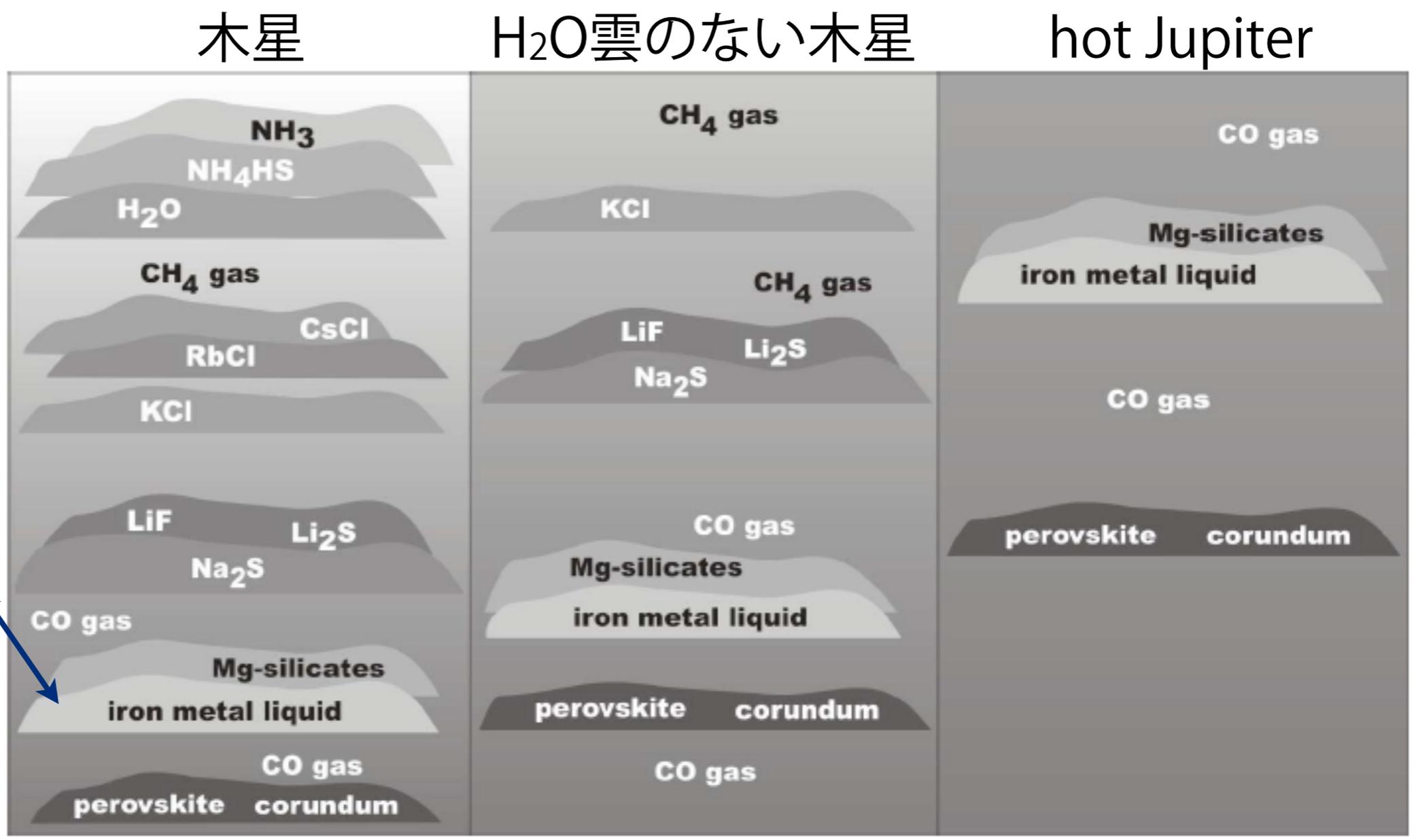
hot Jupiterの雲形成

縞模様
 (白色) 雲
 (有色) リン化合物
 硫黄分子etc.

アルカリ金属
 の凝縮 ~600K

H₂Sの検出

TiO, VO
 の凝縮
 ~2000K



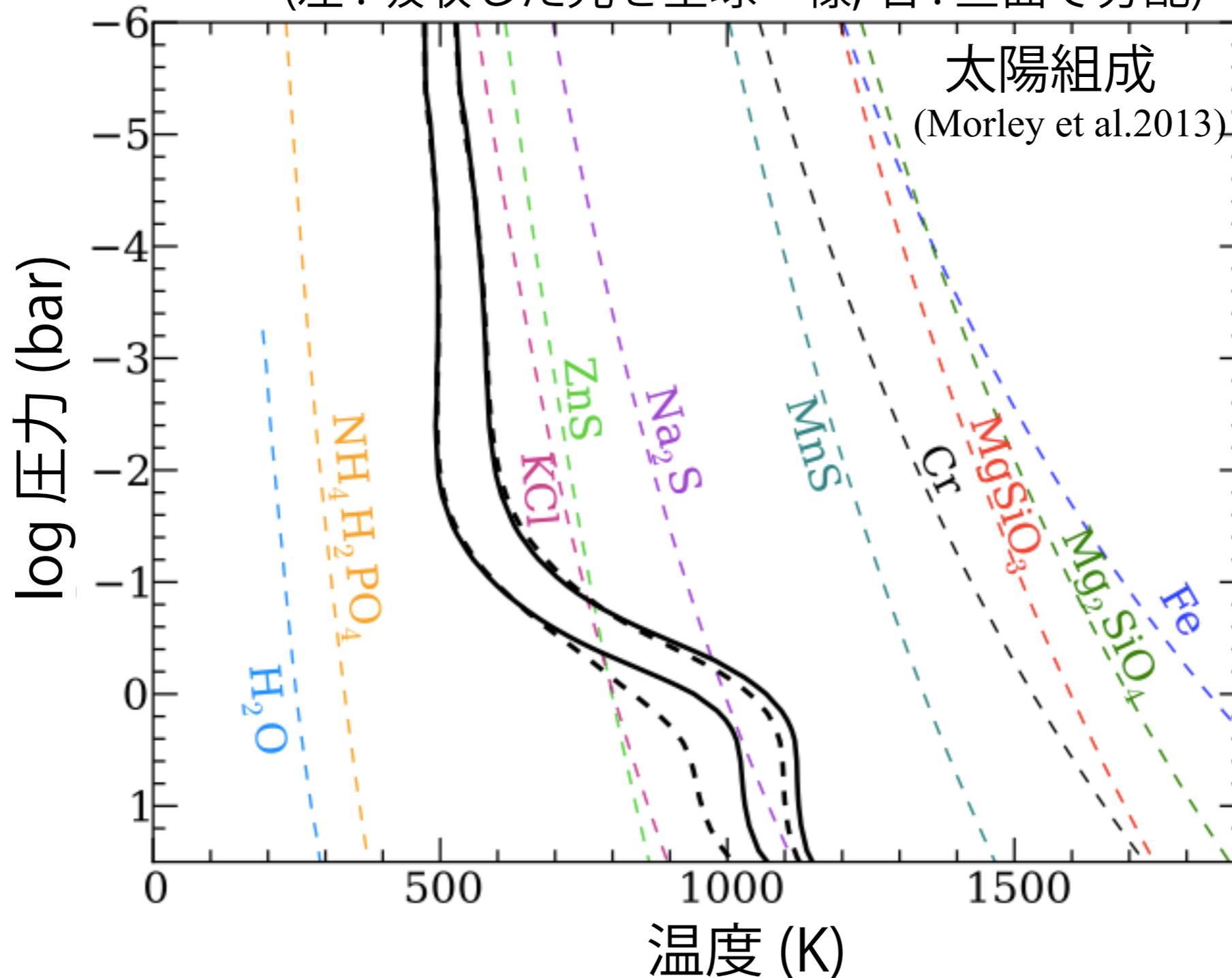
← 中心星からの距離

(Lodders,2004;Marley,2008)

hot Jupiterの雲は Mineral cloud

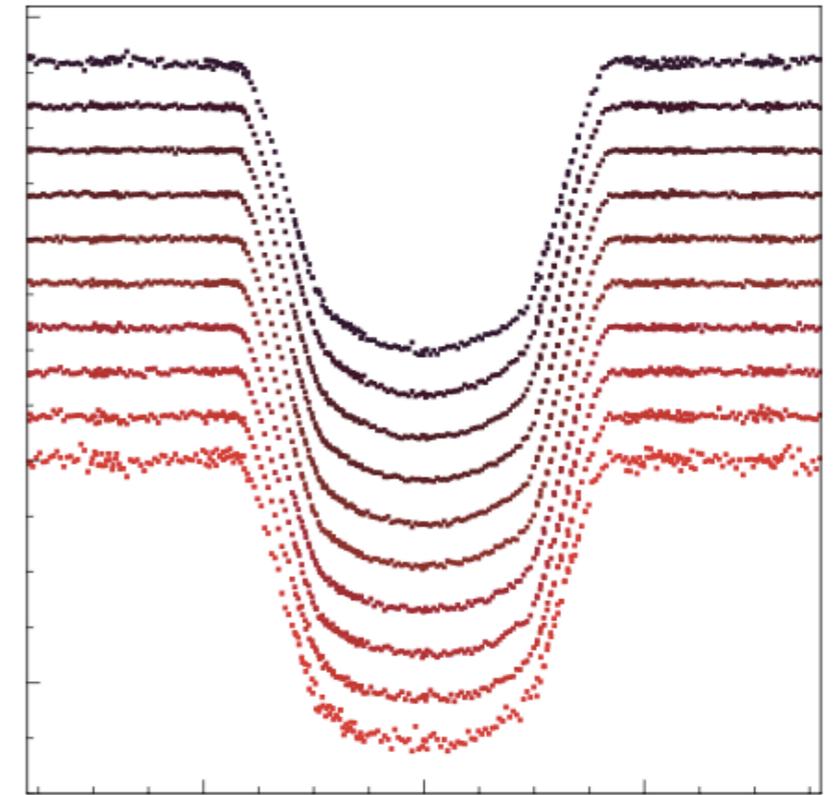
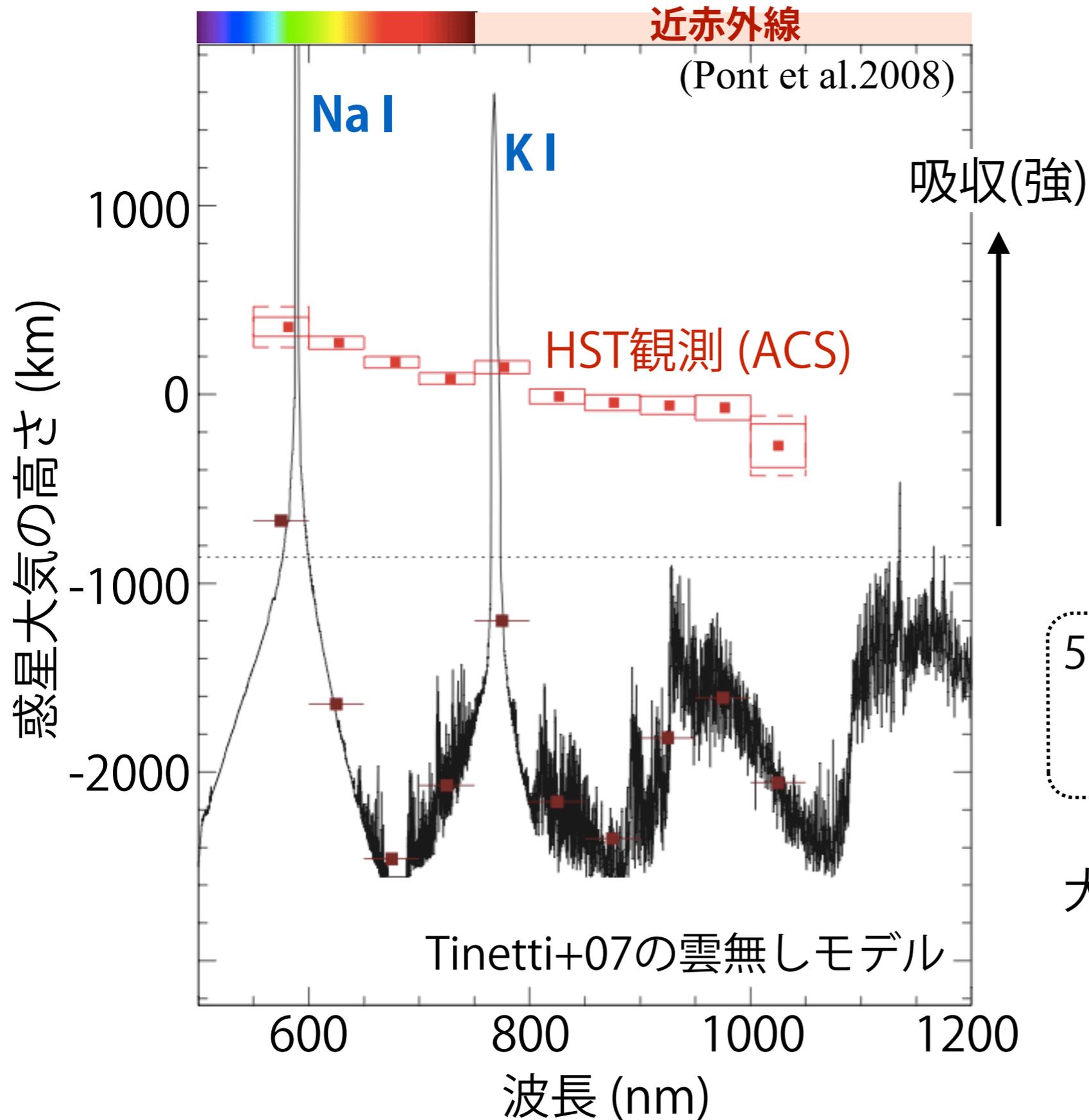
凝縮曲線と (雲あり／なし)GJ1214bのP-T分布

(左: 吸収した光を全球一様, 右: 昼面で分配)



※ Kepler-7b大気に $(MgSiO_3)$ 雲が存在する?(Demory et al.2013)

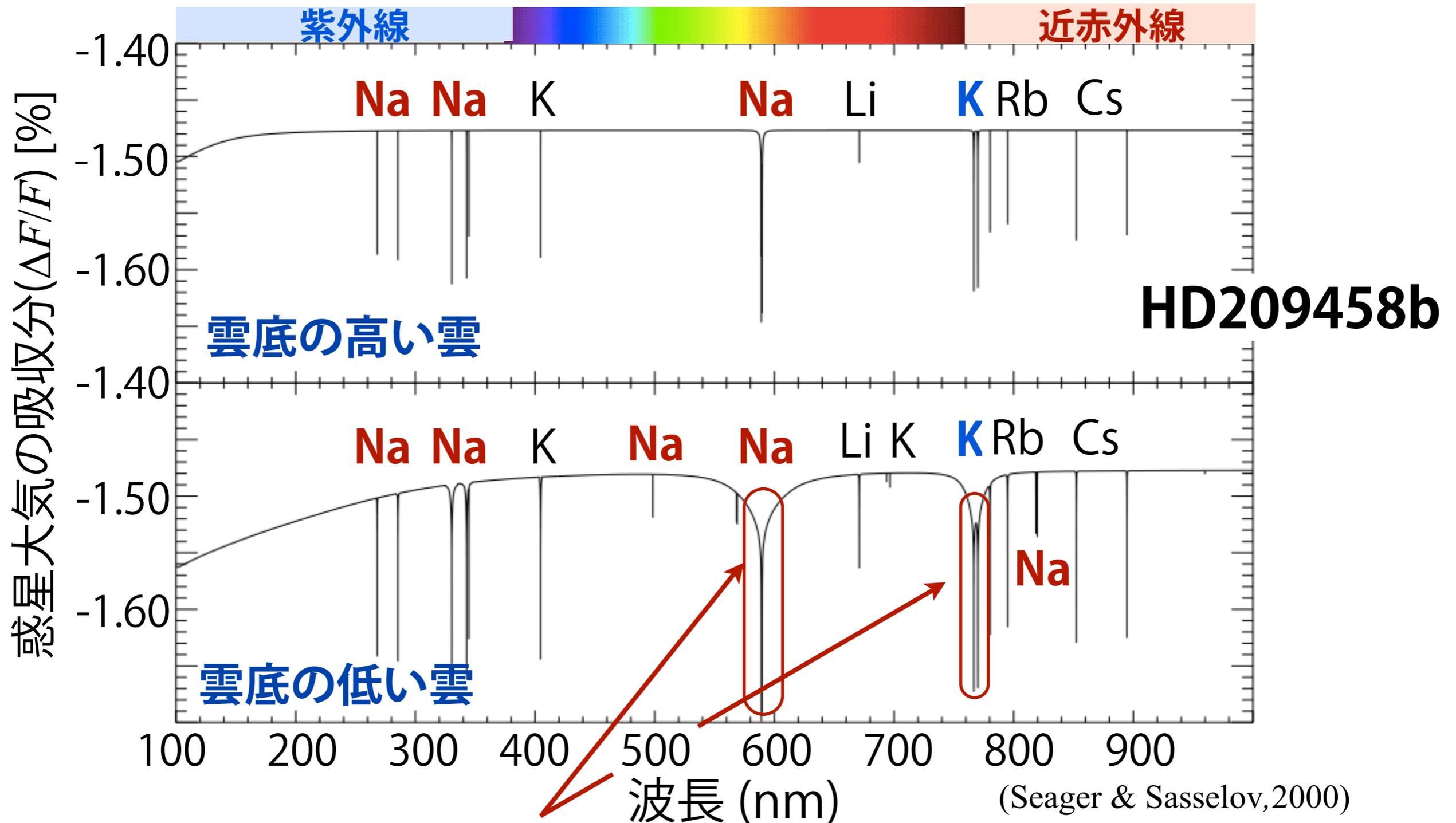
HD189733b大気中の雲 or haze?



550-1050nmの透過スペクトル
(1) **featureless**
(2) 弱いNa, K吸収

大気上層での透過光吸収?
→ 雲 / hazeの存在?

大気中のアルカリ金属と雲の存在



透過出来る大気領域(UP)

- (1) より深い吸収線
- (2) 高密度領域での圧力broadening

Haze Chemistryと大気的光化学

(a) 中心星からの強烈なX線, UV照射

(b) 高い平衡温度

$\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{CO}$ (主に、 $T < 1000\text{K}$ で CH_4 安定)

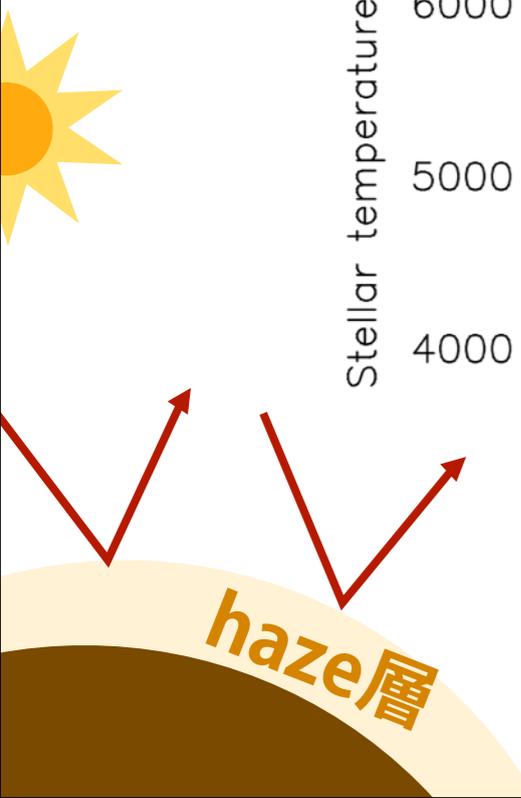
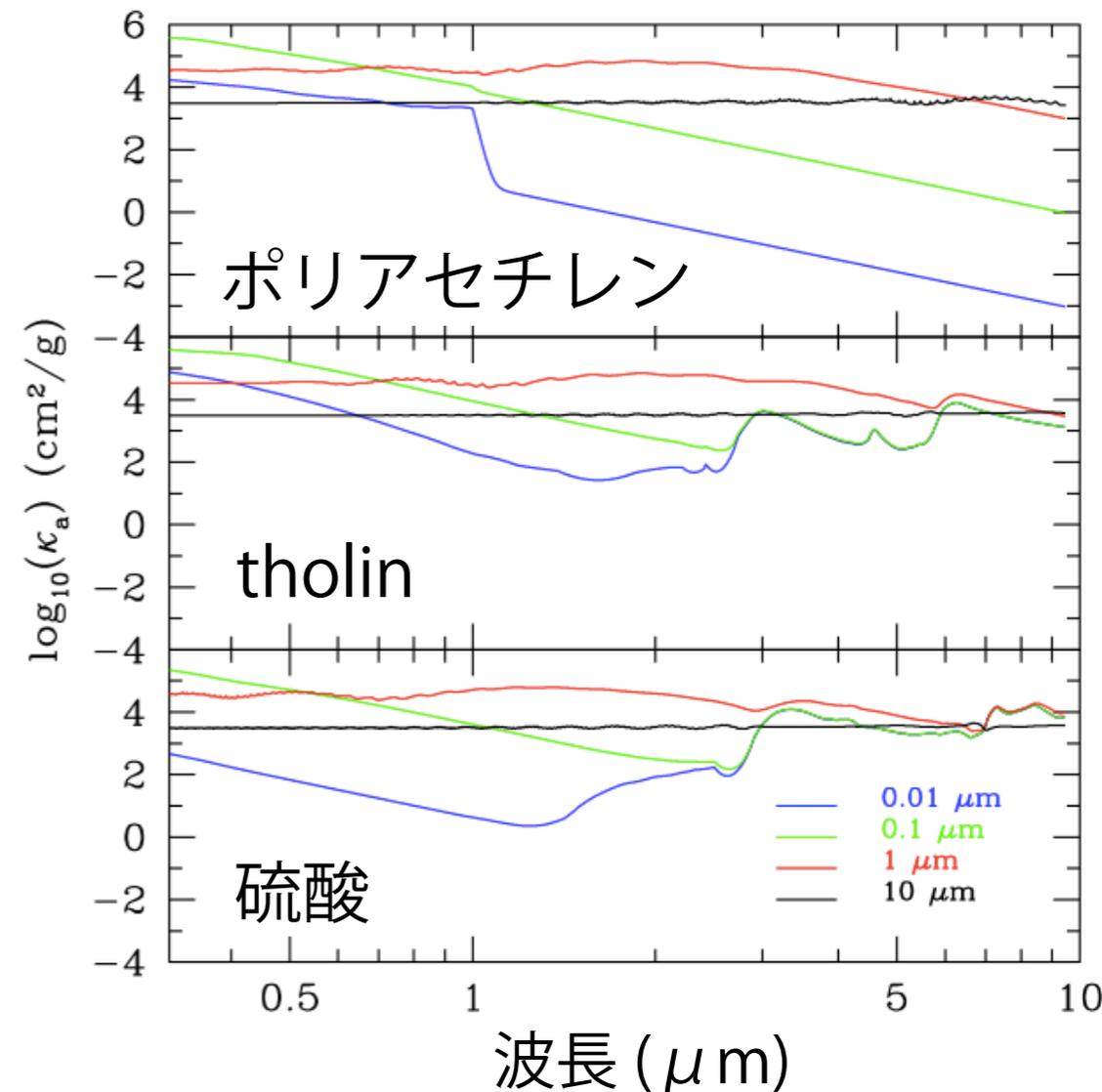
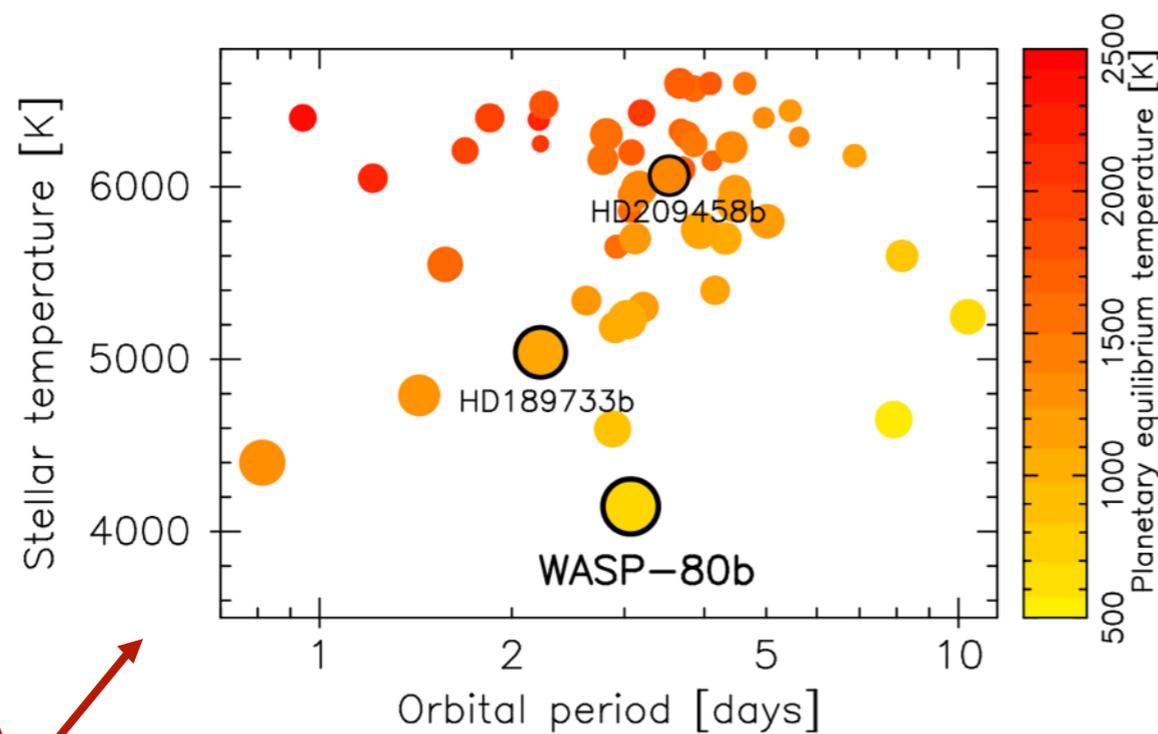
Titanのもや (橙色)



大気上層 ($P \leq 1\text{mbar}$)でのUVによる CH_4 , NH_3 , H_2O 光分解

※ H , NH_2 , CH_3 基 etc \rightarrow C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , HCN など生成

\rightarrow もや (炭化水素haze/soot \rightarrow tholin)

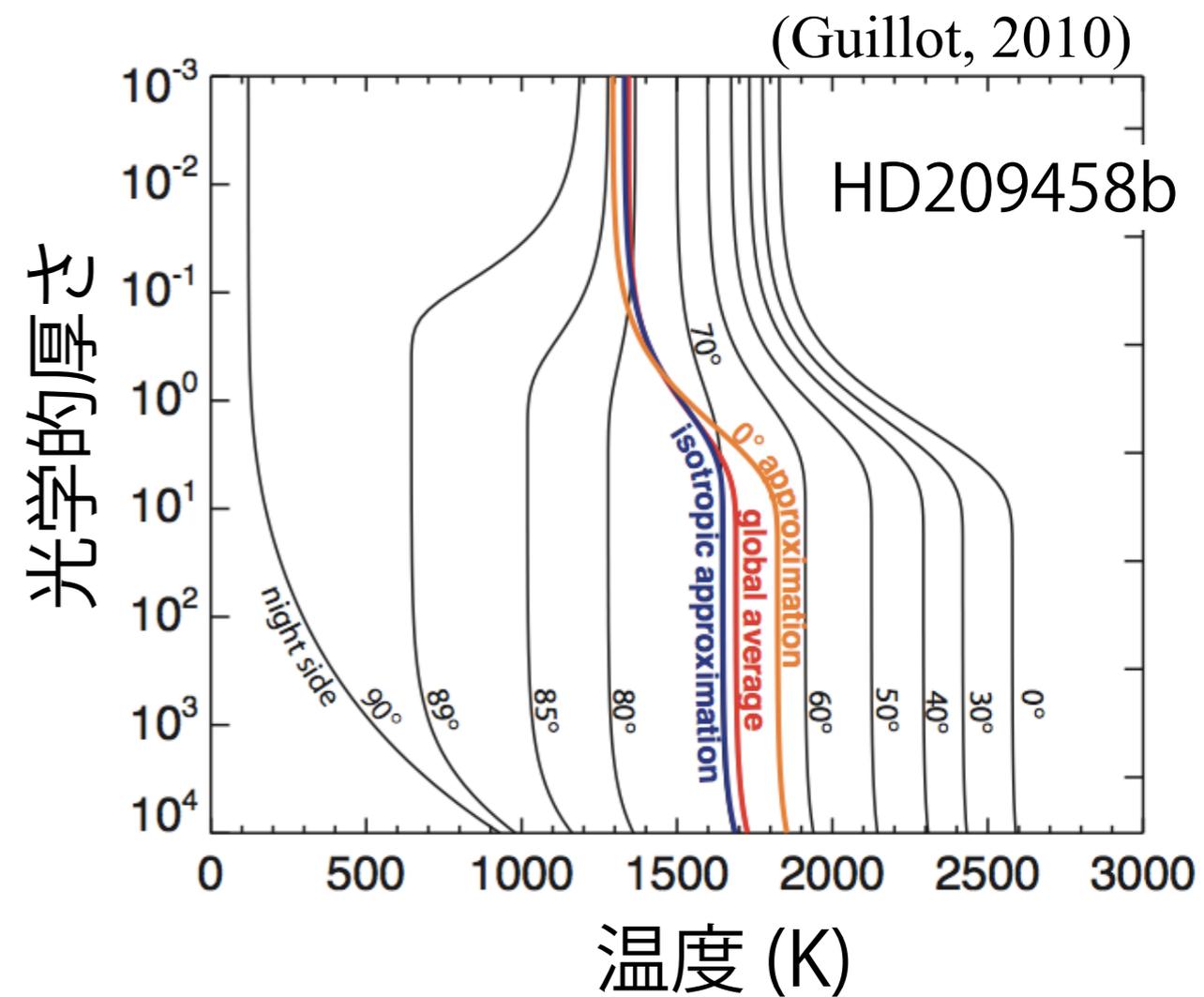
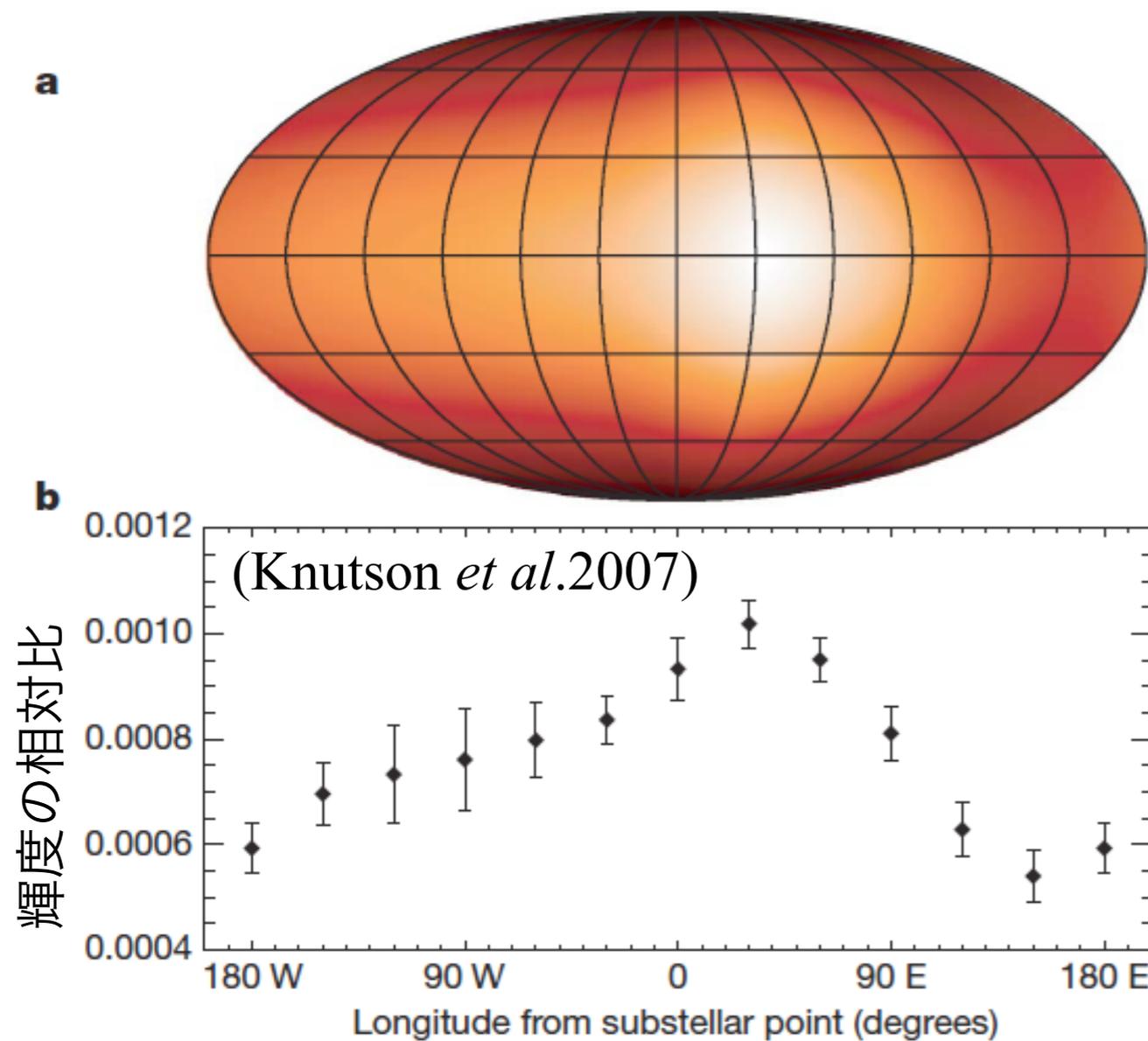


hot Jupiterの温度構造と熱再分配

潮汐固定されたhot Jupiter

昼側 → 夜側への熱再分配は効率的か？

HD189733b



昼夜面の温度差 ~ 250K
→ 効率的な熱輸送？

hot Jupiter大気の温度構造と逆転層

逆転層の存在 --- 気相の**TiO, VO** (>1800K)による可視光の吸収

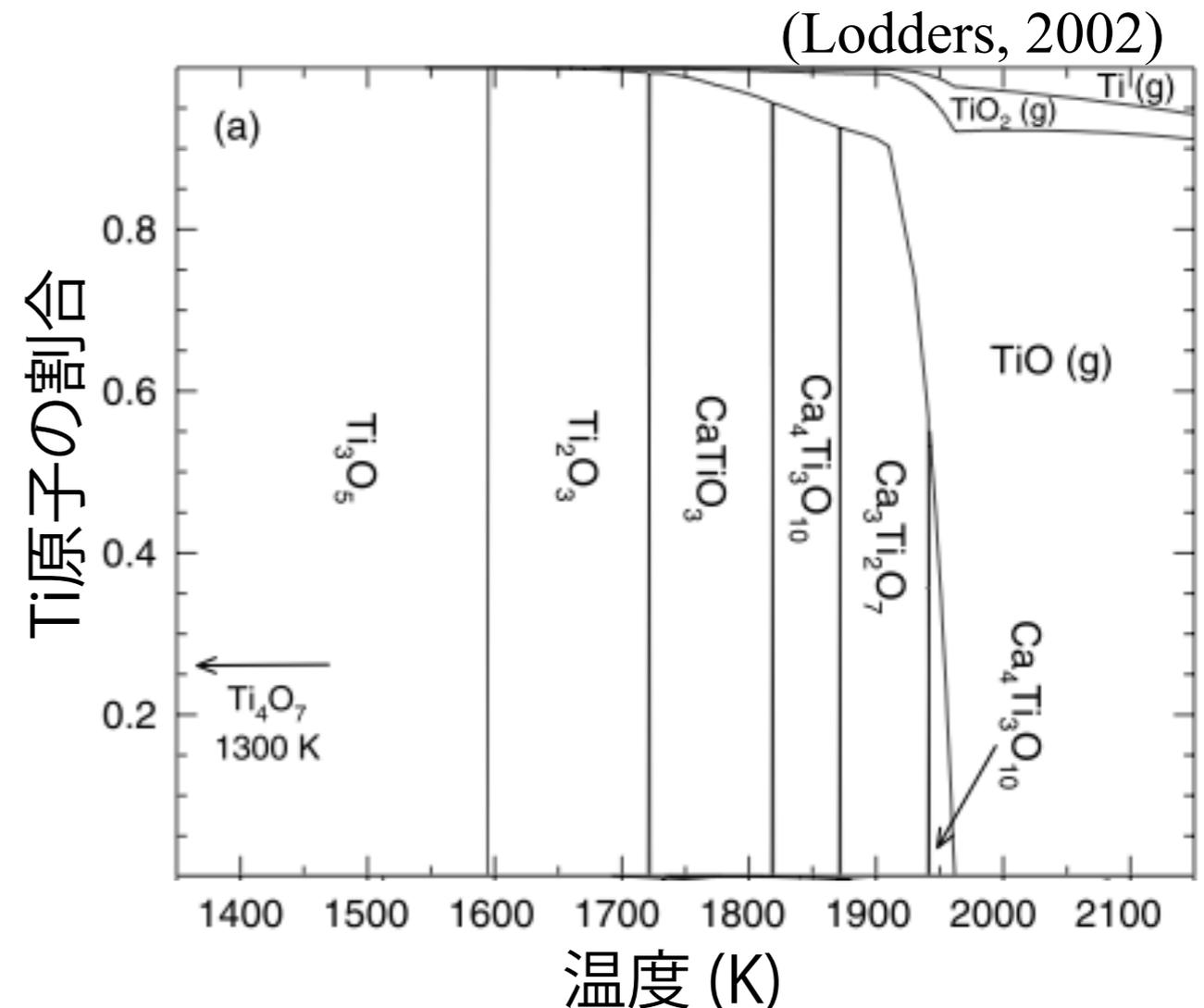
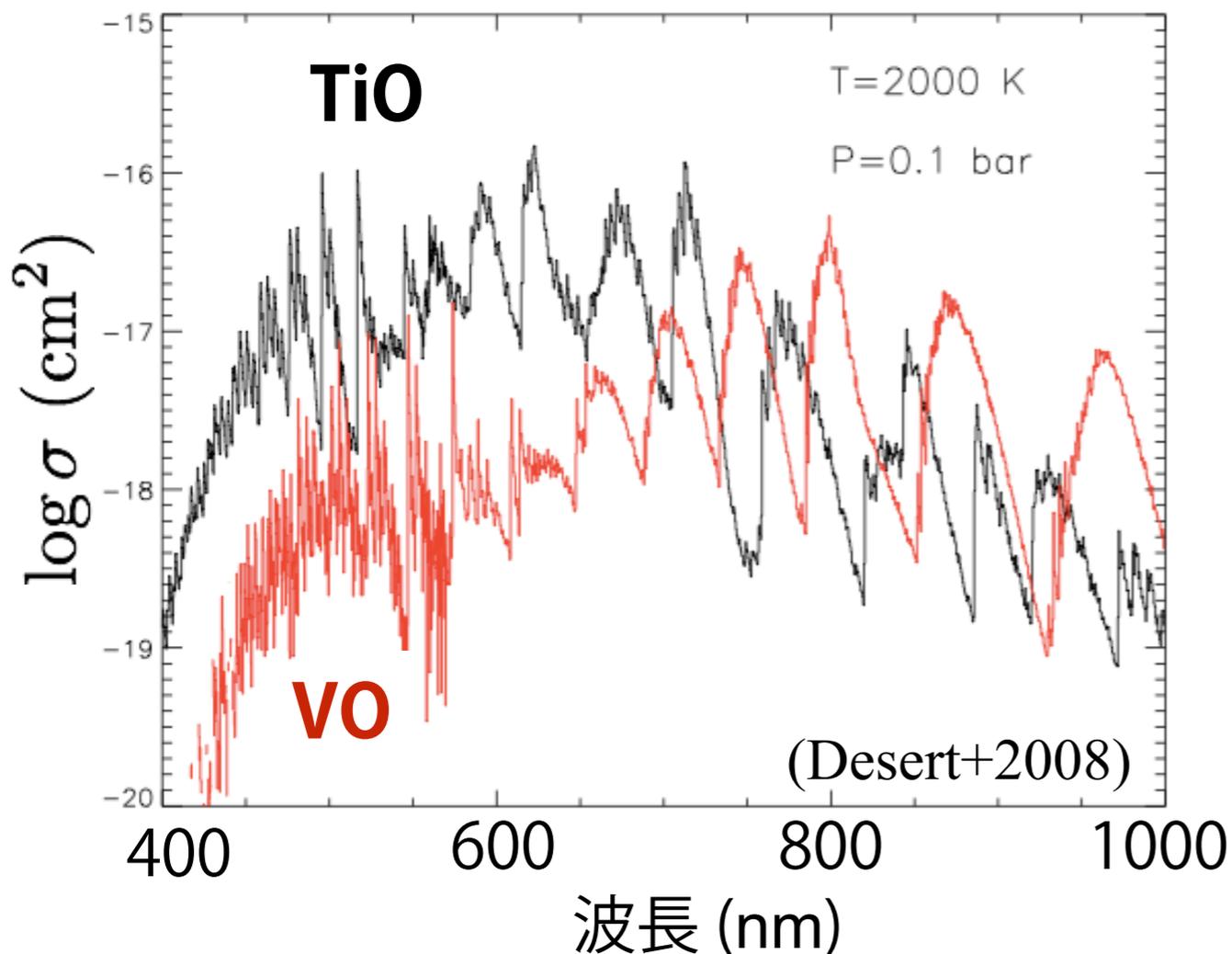
※ VO > TiO → TiOのfeatureが隠される?

豊富なTiO or 巨視的なmixingが必要? (Spiegel *et al.*2009)

S, HSのような硫化物によるUV吸収? (Zahnle *et al.*2009)

if not: **低温下**で凝縮 (cold-trap) + 沈殿 (**Ti, V** or **凝縮物**)

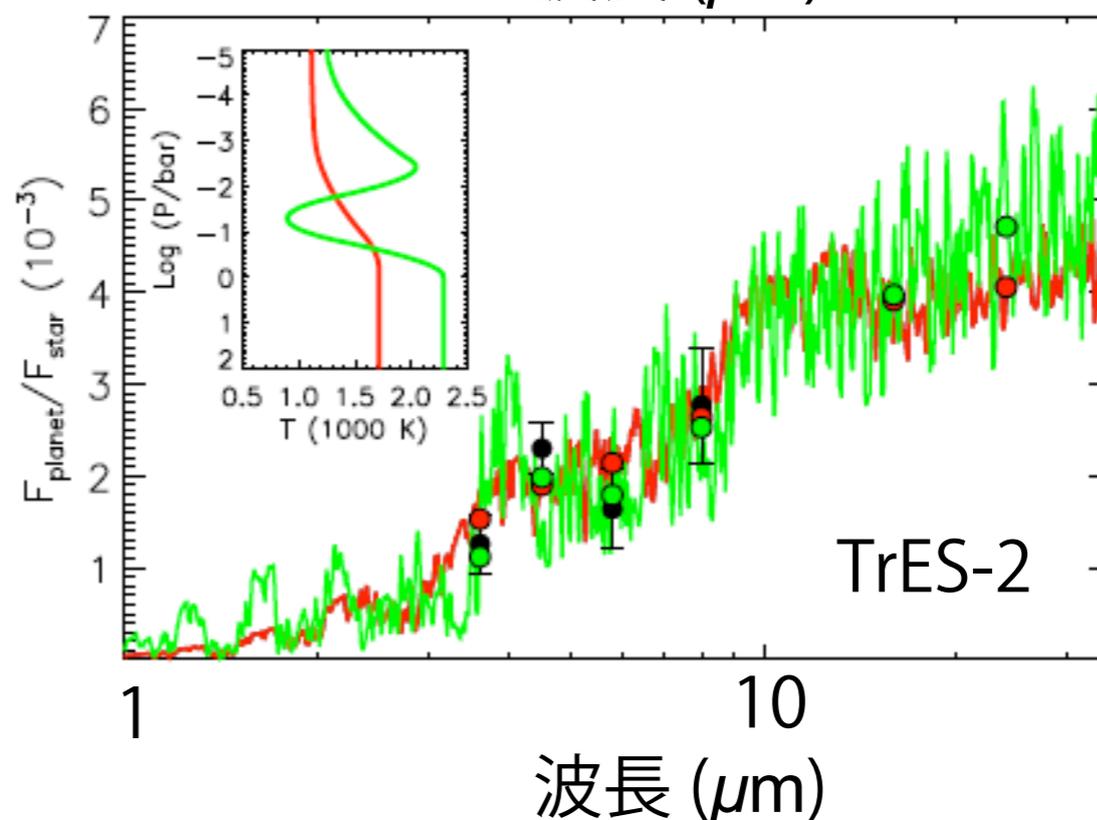
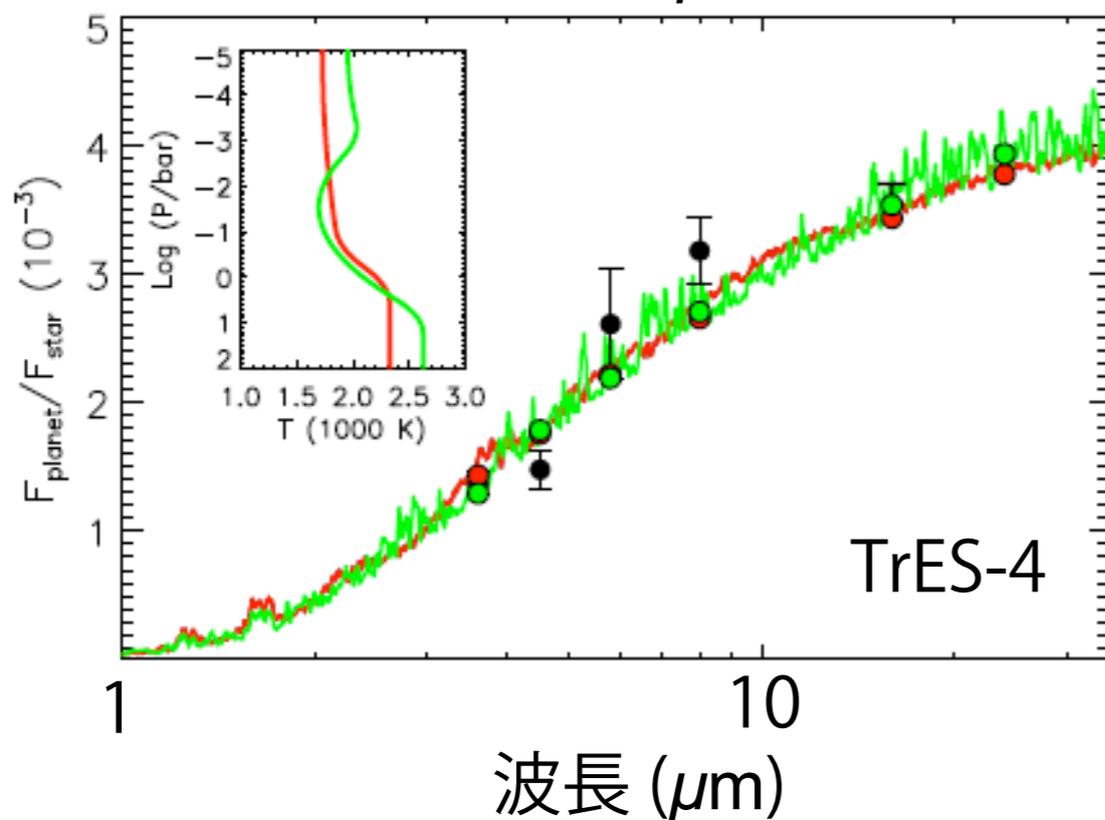
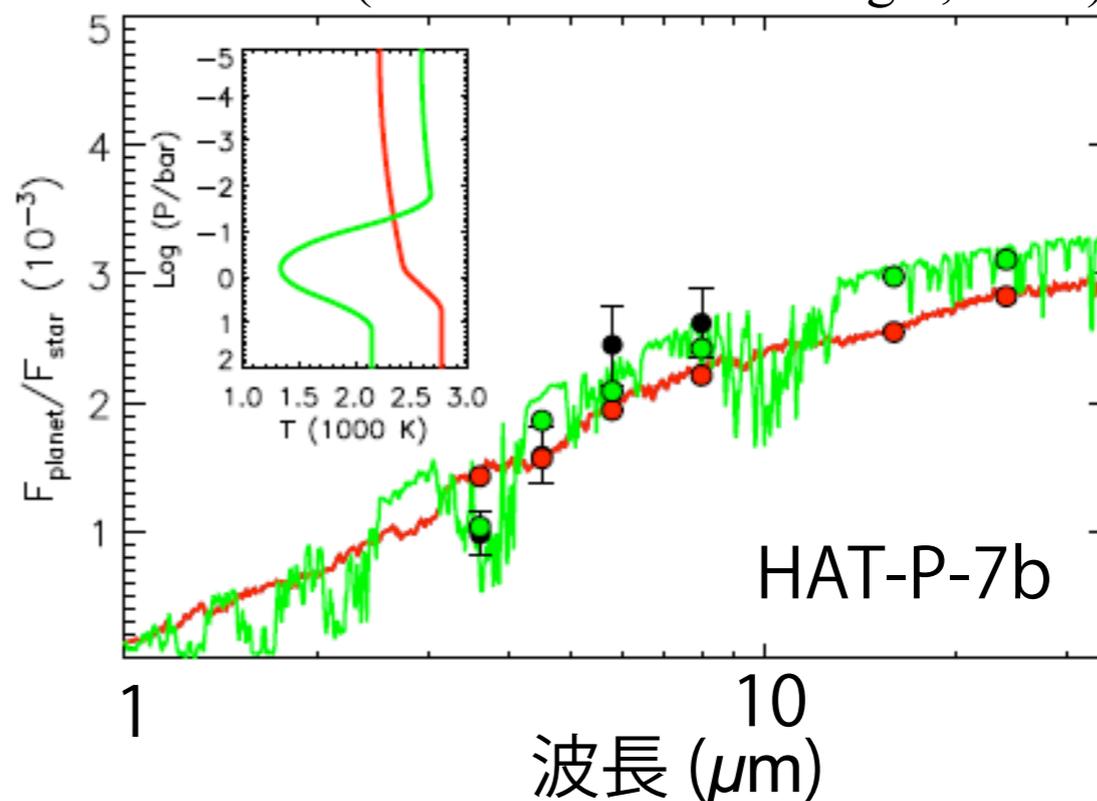
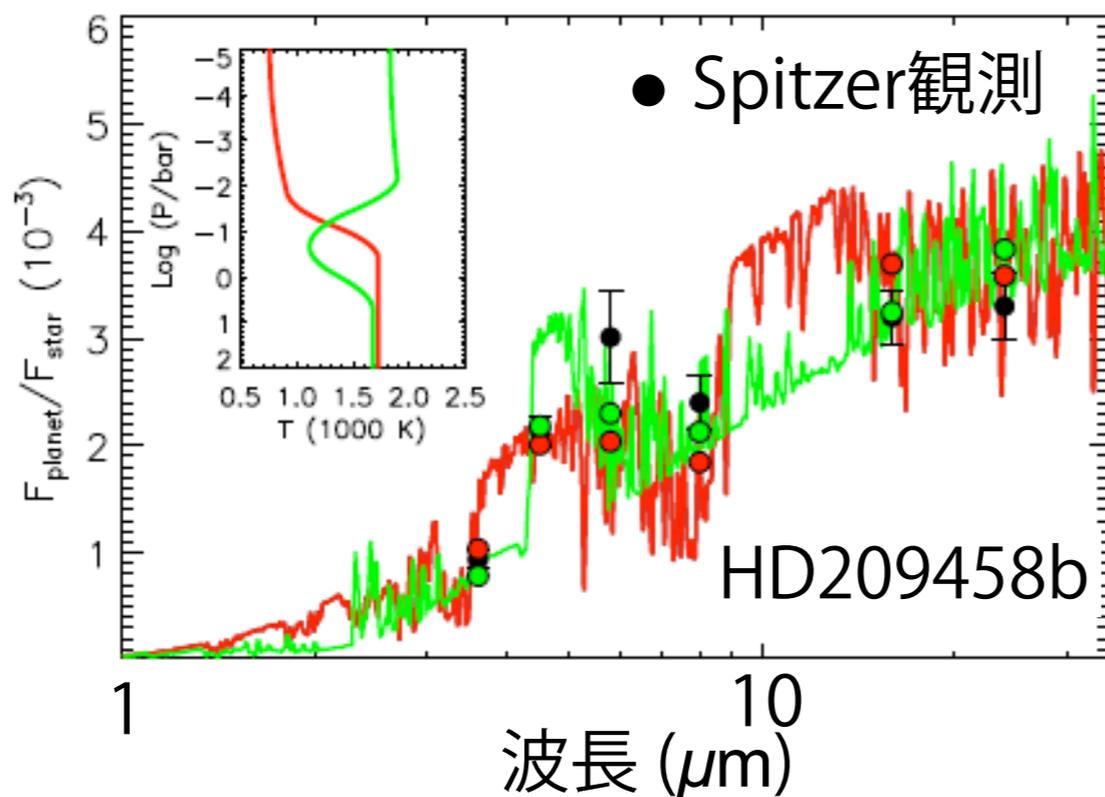
強烈な**UV照射**による**破壊** (Knutson *et al.*2010)



hot Jupiterの温度構造と逆転層の存在

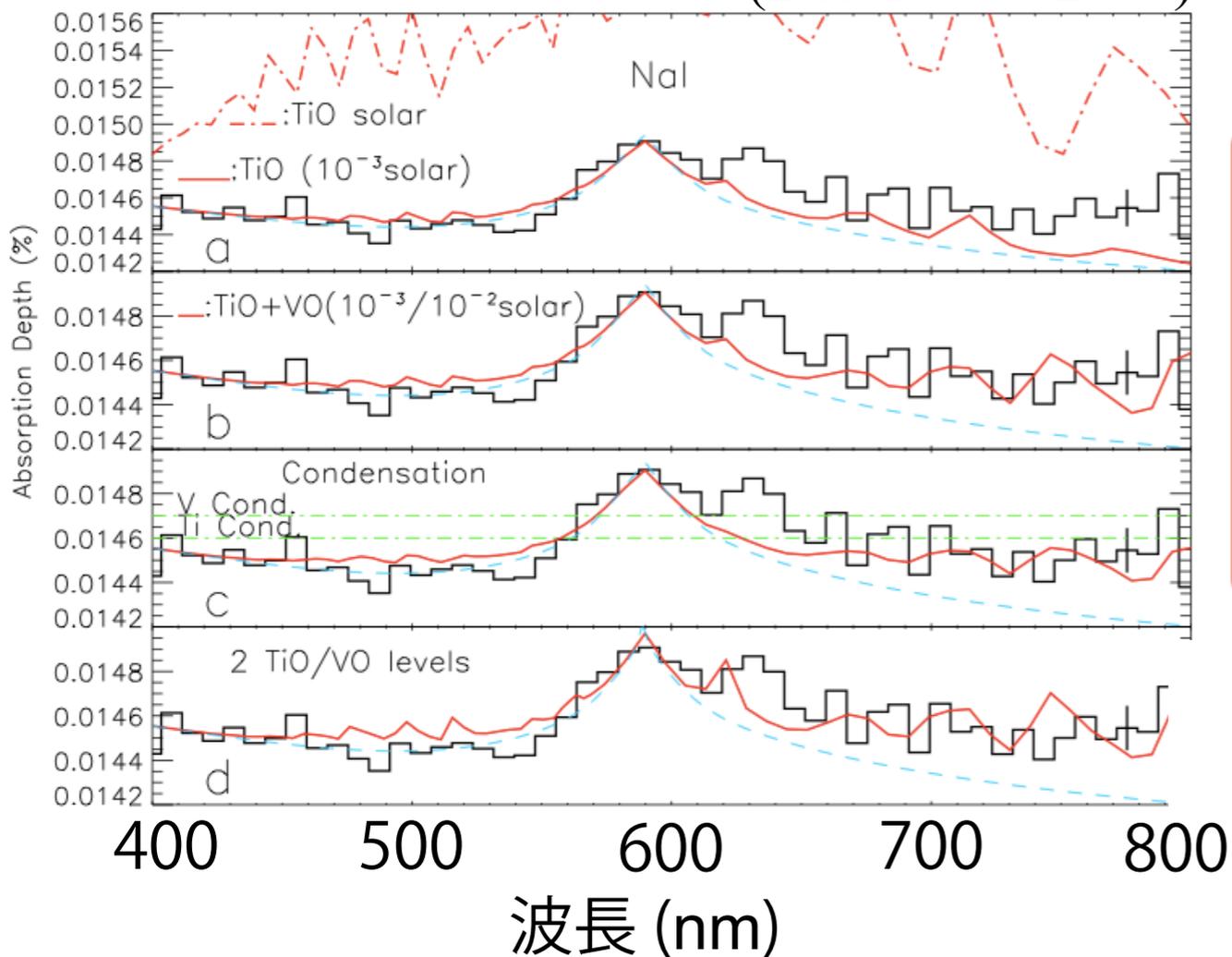
逆転層なし, 逆転層あり

(Madhusudhan & Seager, 2010)



hot Jupiter 上層大気中のTiO/VO

(Desert *et al.* 2008)



(1) HD209458b

TiO, VOのbroadな吸収あり? (HST STIS)
(Desert *et al.* 2008)

Ca (616.2, 649.3nm)の吸収 → TiO ×?
(Astudillo-Defru & Rojo, 2013)

※ Ca : CaTiO₃等の凝縮物 (~2000K)
(e.g. Lodders 2002)

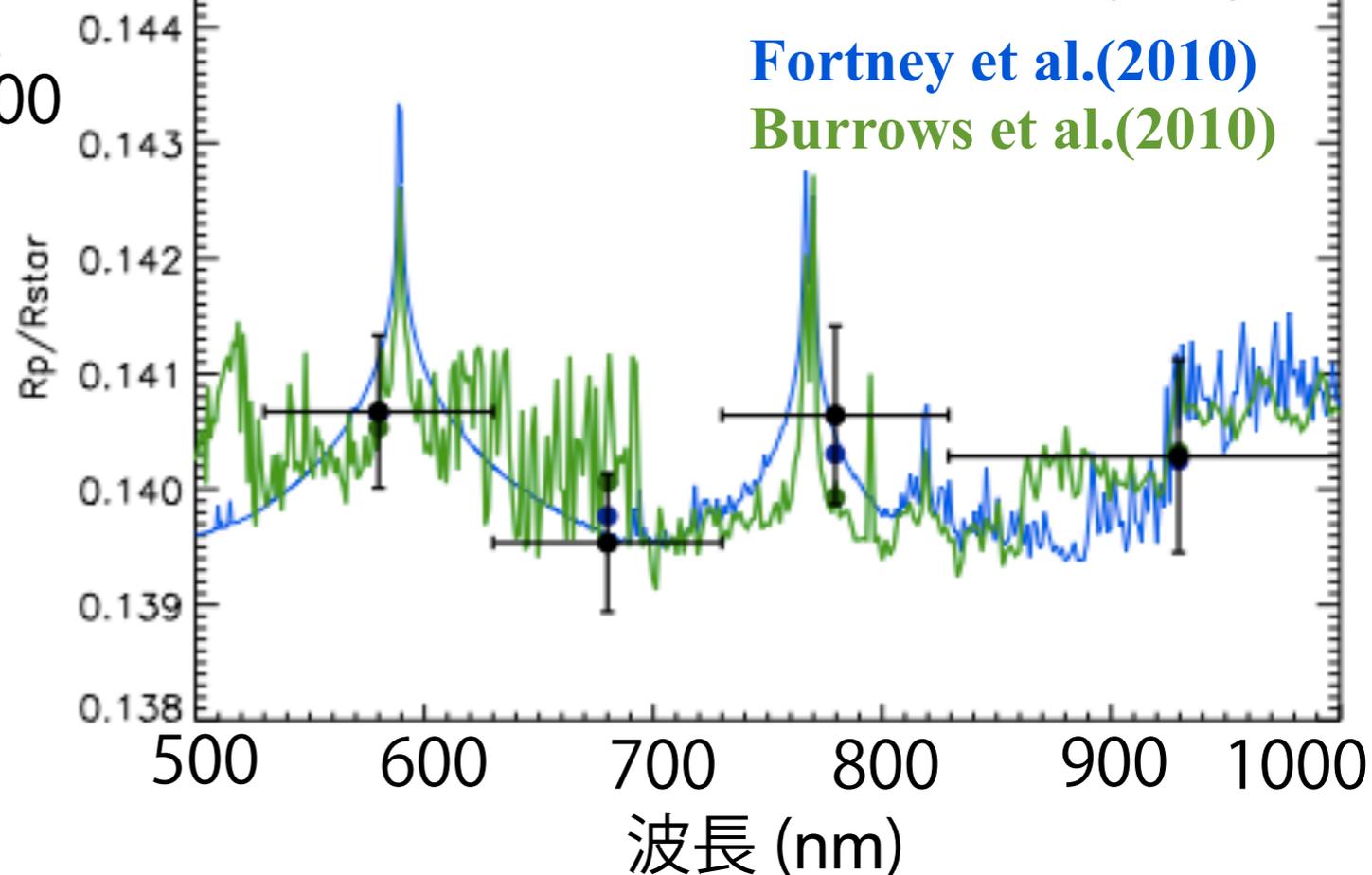
(2) WASP-19b

no or low **TiO** (HST STIS)
(+H₂Oの吸収)

→ C/O比は1より小さい?

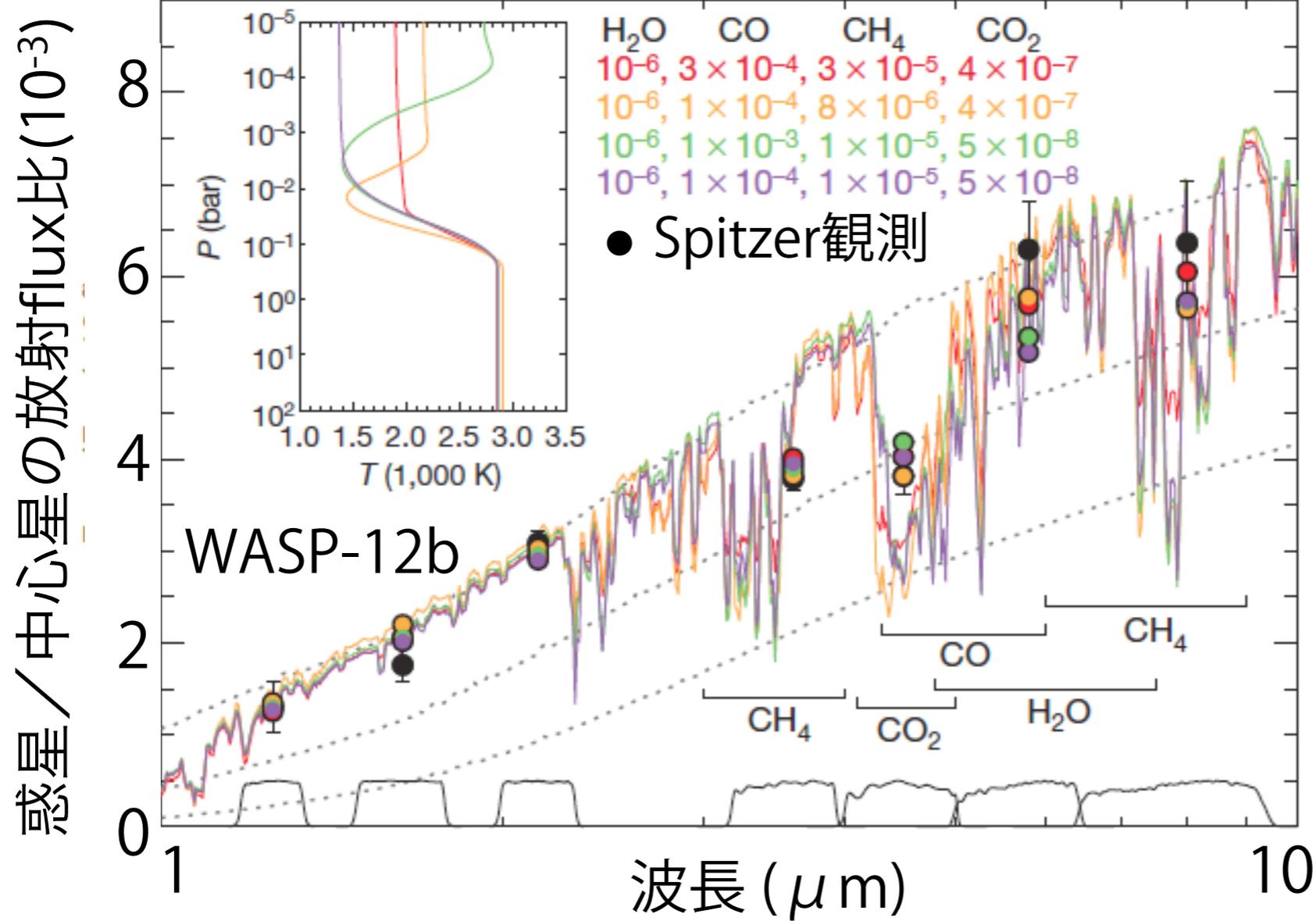
(Huitson *et al.* 2013)

no TiO



hot Jupiterの温度構造と組成の縮退問題

(Madhusudhan *et al.* 2011)



高いC/O比 (TiO量 ↓)

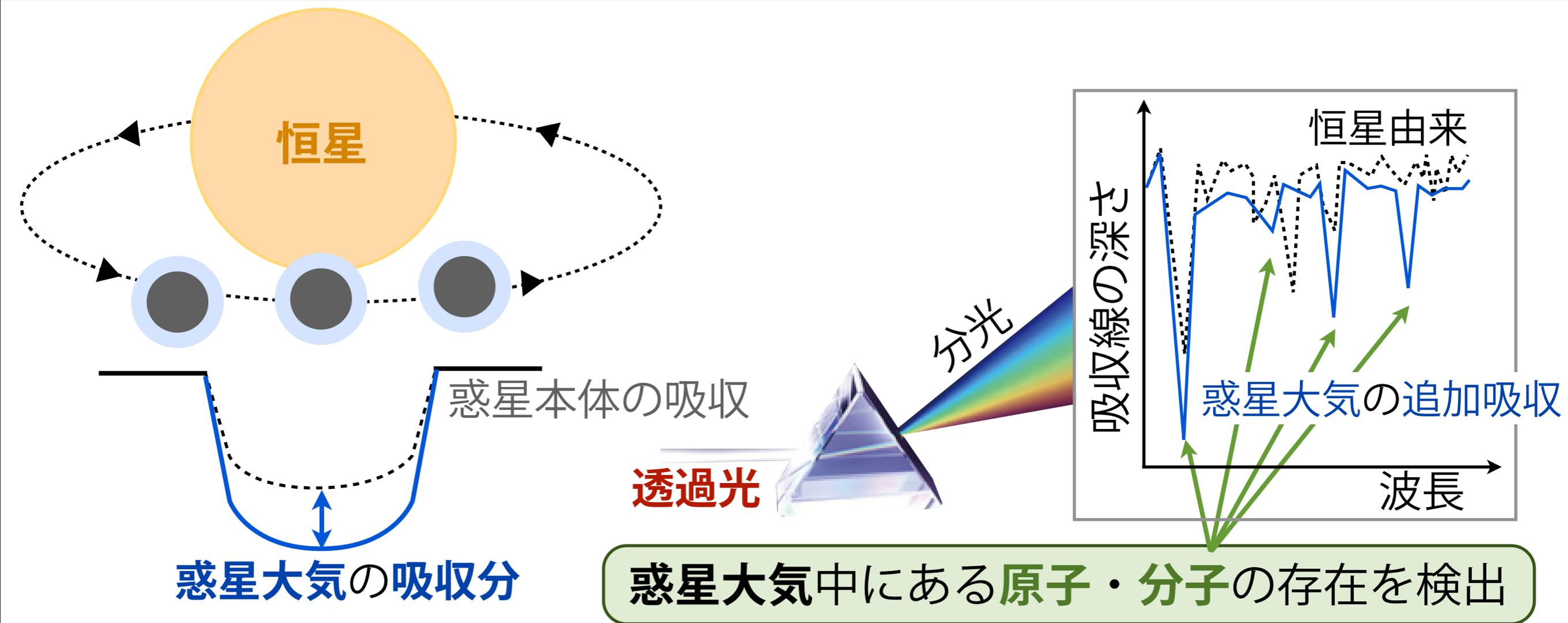


逆転層の存在と縮退

- (1) 可視光領域：TiO/VO吸収の有無
- (2) ~600nm付近：Caの吸収

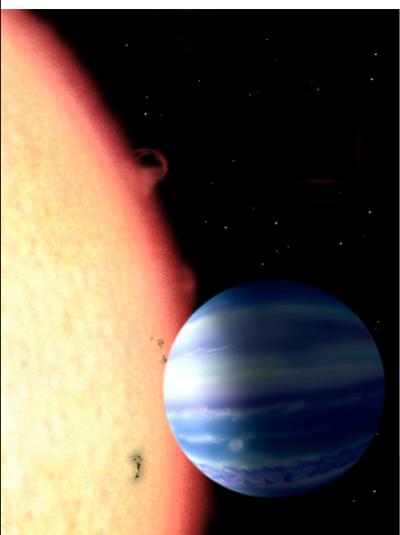
→ 逆転層の存在と組成(形成環境)の縮退を紐解く

Primary Eclipseから惑星大気の組成

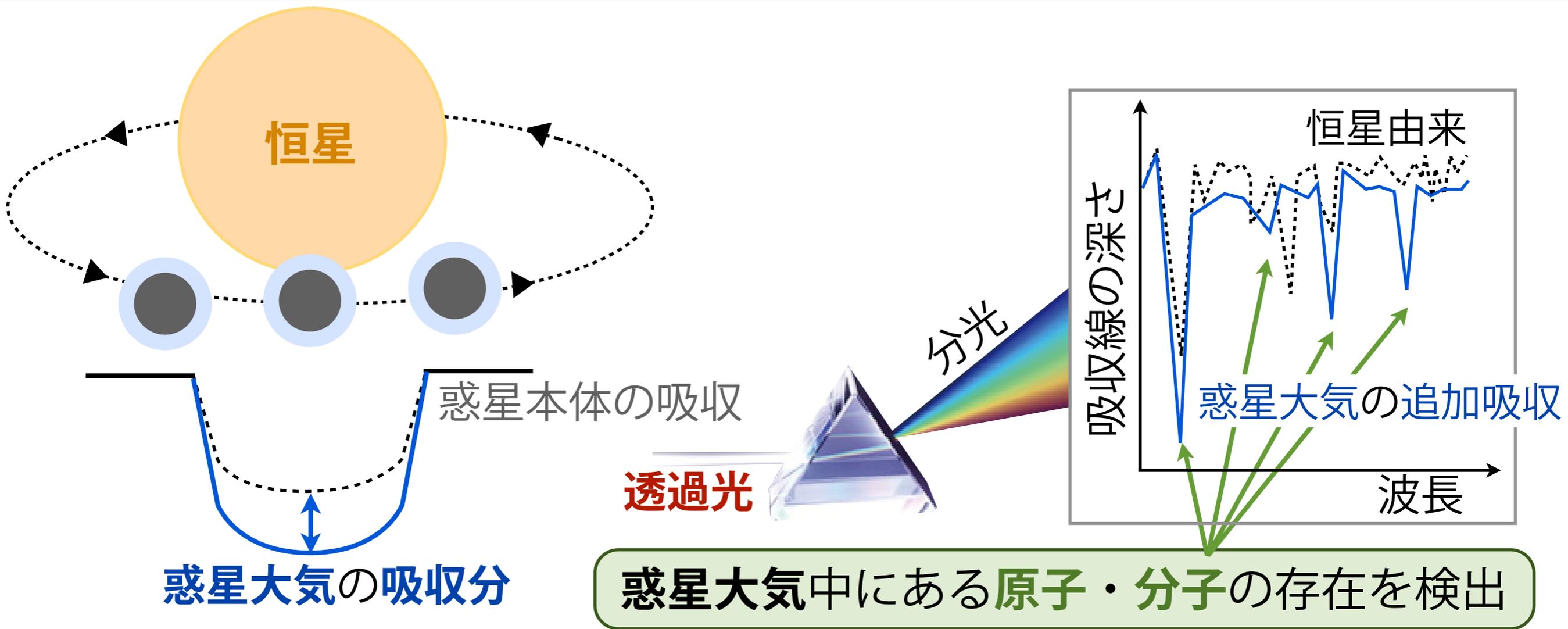


hot Jupiter大気中に**アルカリ金属**の検出 (Na D線 : 589, 589.6nm)

HD209458b	Na, Ca	(e.g. Charbonneau+02; Snellen+08)
HD189733b	Na (地上)	(Redfield+08)
WASP-17b	Na (地上)	(Wood+11; Zhou+12)
WASP-12b	Na (HST)	(Fossati+10) ※ 他にMgII等(?)
XO-2b	Na, K (地上)	(Sing+11;12)
HAT-P-1b	Na	(Nikolov+13)



Primary Eclipseから惑星質量の制限

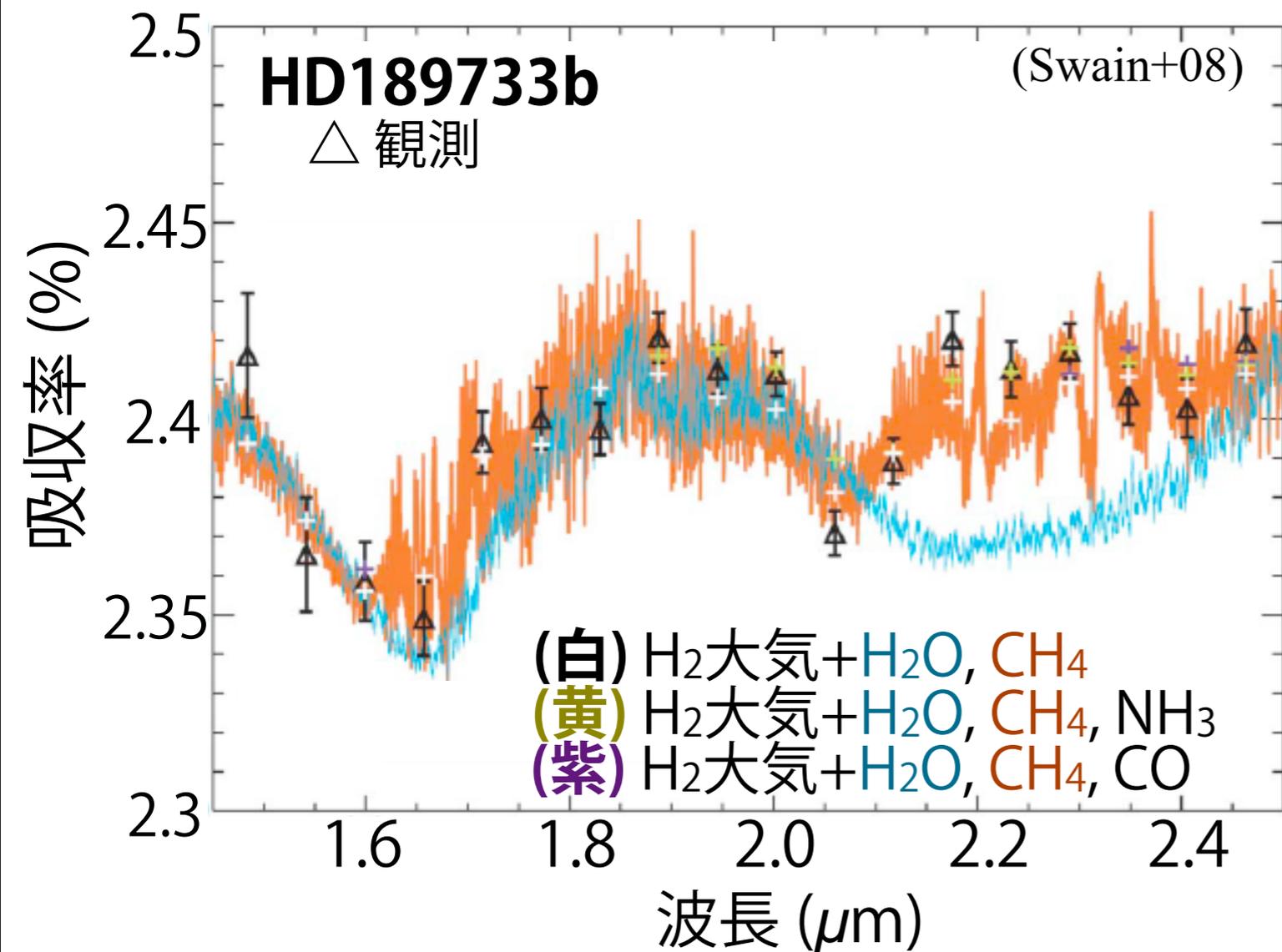


(cf) scale heightとtransit半径から惑星質量へ

$$H = \frac{kT}{\mu g} \longleftrightarrow M_p = \frac{kTR_p^2}{\mu GH} \rightarrow M_p = -\frac{4kTR_p^2(\lambda)}{\mu G \frac{dR_p(\lambda)}{d \ln \lambda}}$$

(例) Rayleigh散乱: $\sigma(\lambda) = \sigma_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-4}$

hot Jupiterの大気組成：揮発性成分



■ 大気モデル

T-P分布：line-by-line 輻射輸送
 化学組成：化学平衡 or 光化学反応

(例) HD209458b

H_2O (Barman+07;Beaulieu+10)

CH_4 , CO , CO_2 (Swain+09;Madhusudhan & Seager,2009)

HD189733b

H_2O (Tinetti+07;Beaulieu+08;Swain+09)

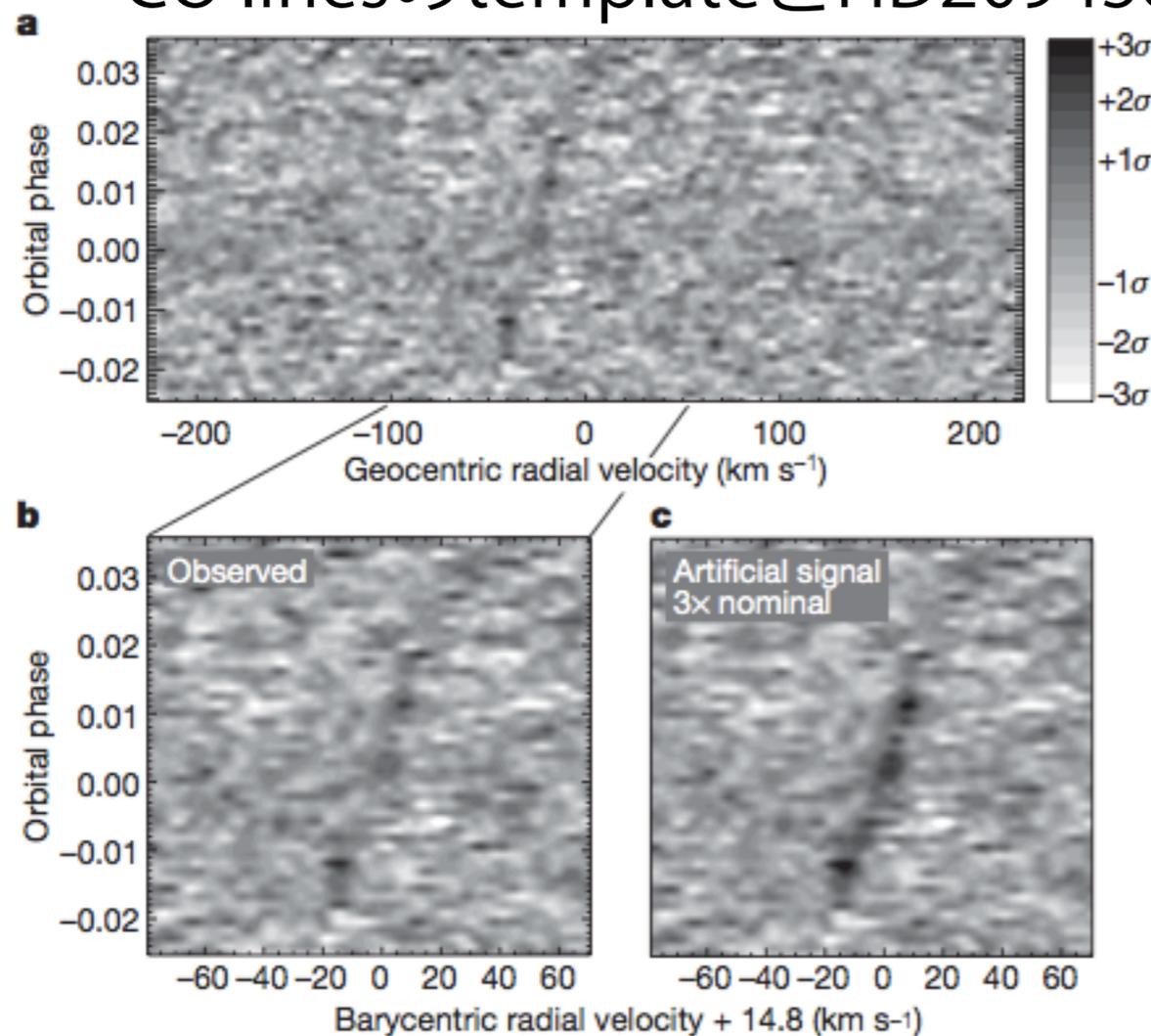
CH_4 , CO , CO_2 (Swain+08;09)

51Peg.b

H_2O , CO (?) (Brogi+13)

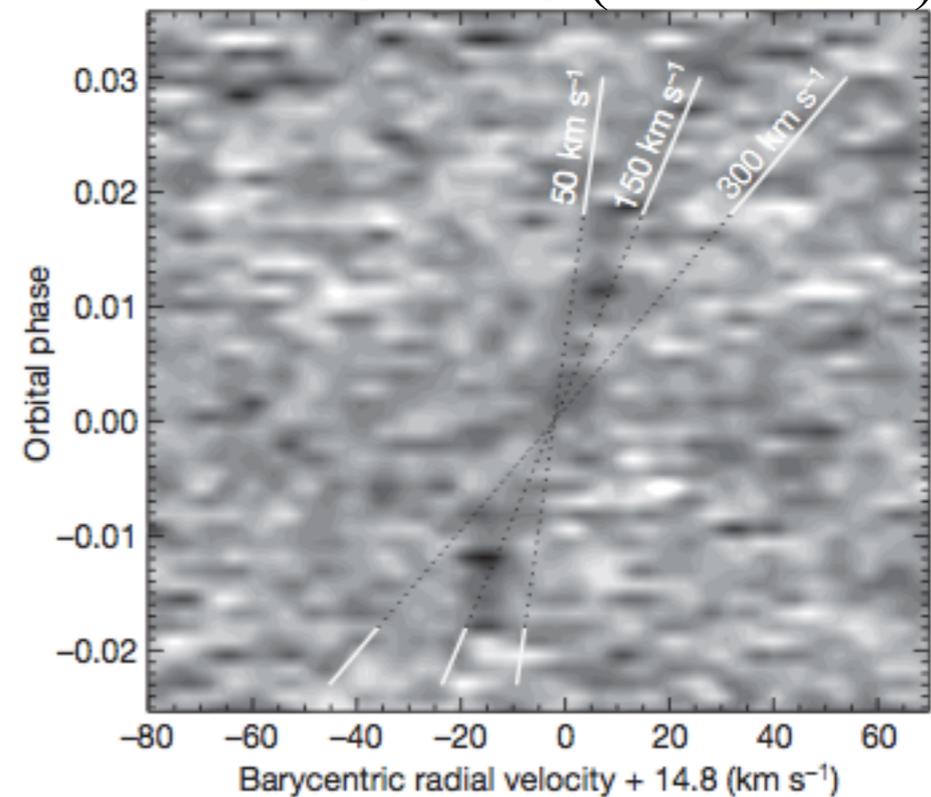
Doppler Tomographyによる分子検出

CO linesのtemplateとHD209458 観測スペクトルの
cross-correlation



cross-correlation

VLT CRIRES (Snellen+10)



※ 質量も決まる

CO検出

- Transiting planet
 - HD209458b (Snellen+10)
 - HD189733b (de Kok+13; Rodler+13)
- Non-transiting planet
 - τ Boo b (Brogi+12; Rodler+12)
 - 51 Peg. b (Brogi+13)

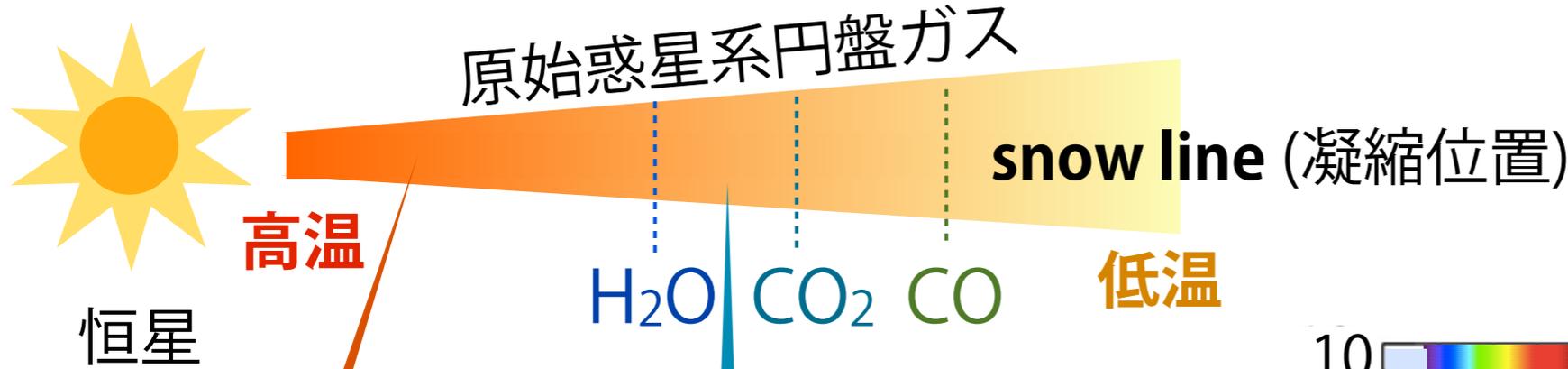
H₂O検出

HD189733b (Birkby+13)

CRIRES (NH₃: NIR RV ~ 5m/s)



揮発性分子のC/O比と惑星の形成環境



気相: O欠乏 → 高いC/O比
 (固相: O豊富)

中心星と同程度のC/O比

※ 近傍の太陽型星のC/O比

C/O > 1.0: 1-5%

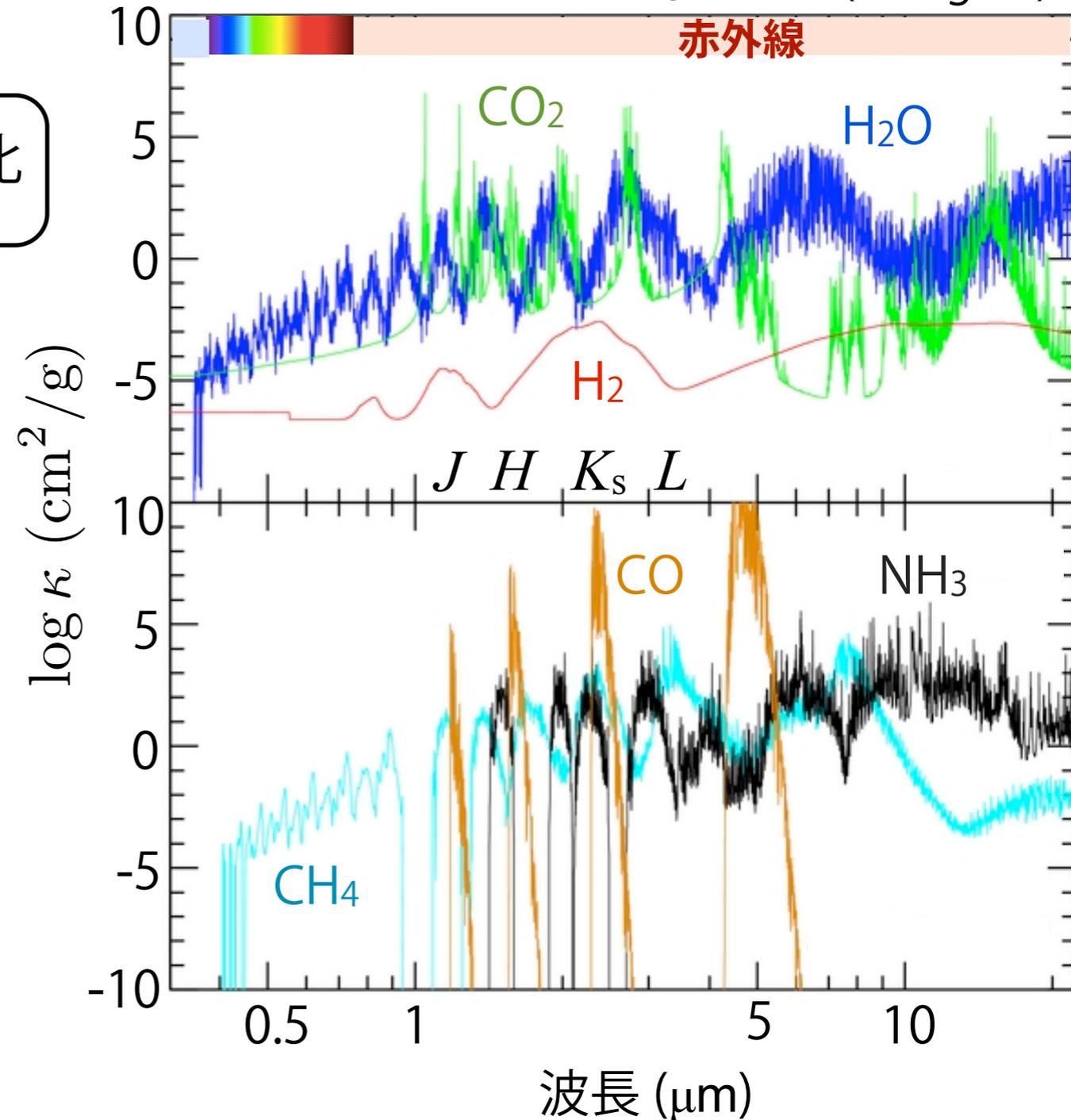
C/O > 0.8: 10-15%

(Fortney, 2012)

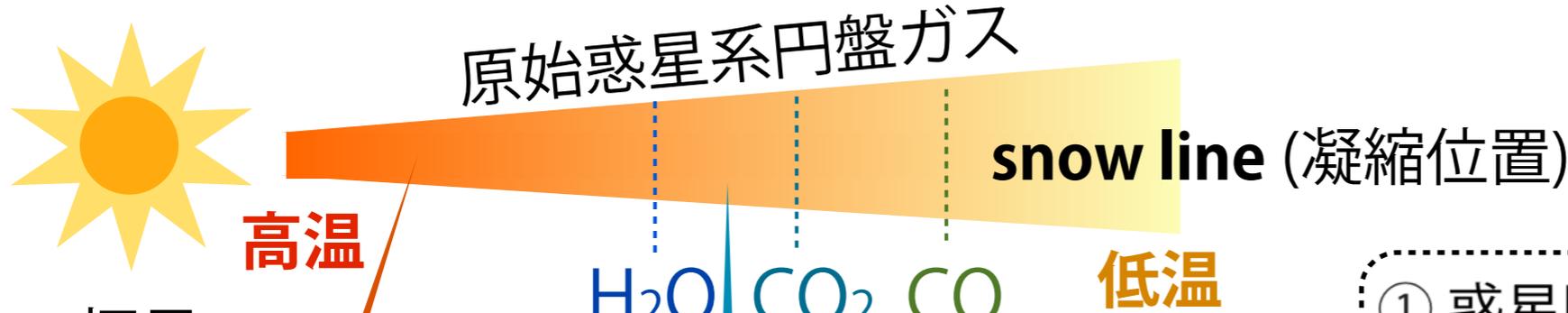
(低温環境下) CO₂, CH₄, H₂O 安定

(高温環境下) CO 安定

(Howe & Burrows, 2012)
 500K@1mbar (10⁻⁵ g/cc)



揮発性分子のC/O比と惑星の形成環境



気相: O欠乏
(固相: O豊富) → 高いC/O比

中心星と同程度のC/O比

■ 惑星大気中のC/O比

→ 形成環境を反映

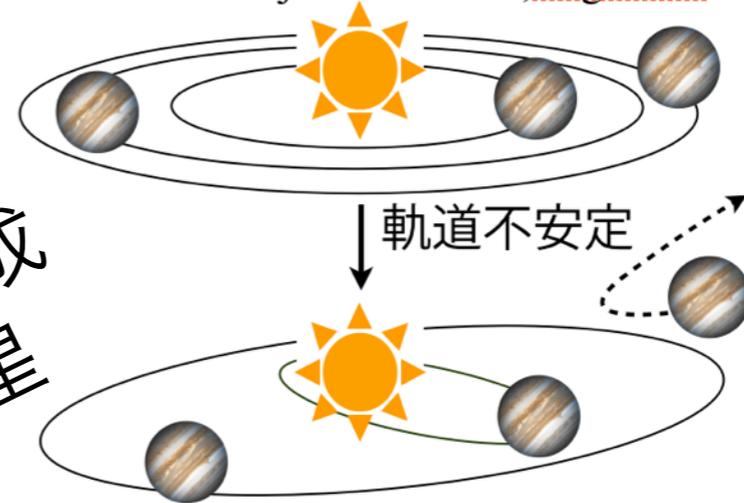
- (1) CO (CO₂) / H₂Oの混合比
- (2) H₂Oの存在量

(例) WASP-12b のC/O比 > 1
(Madhusudhan et al.2010)

hot Jupiterの形成
遠方ガス惑星

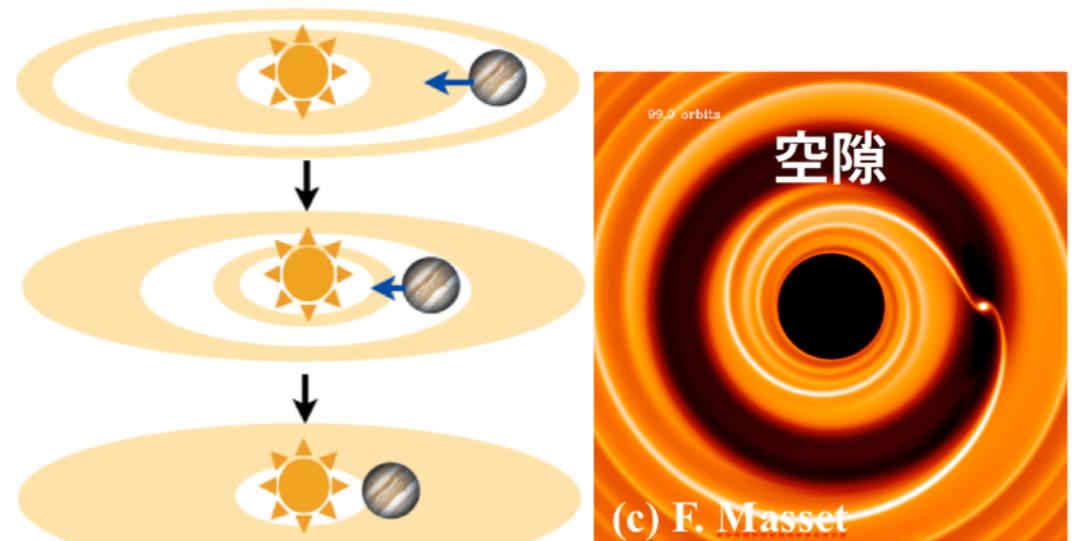
① 惑星同士の重力散乱

(e.g. Rasio & Ford, 1996; Weidenschilling & Marzari, 1996; Chatterjee et al. 2007; Nagasawa et al. 2008)



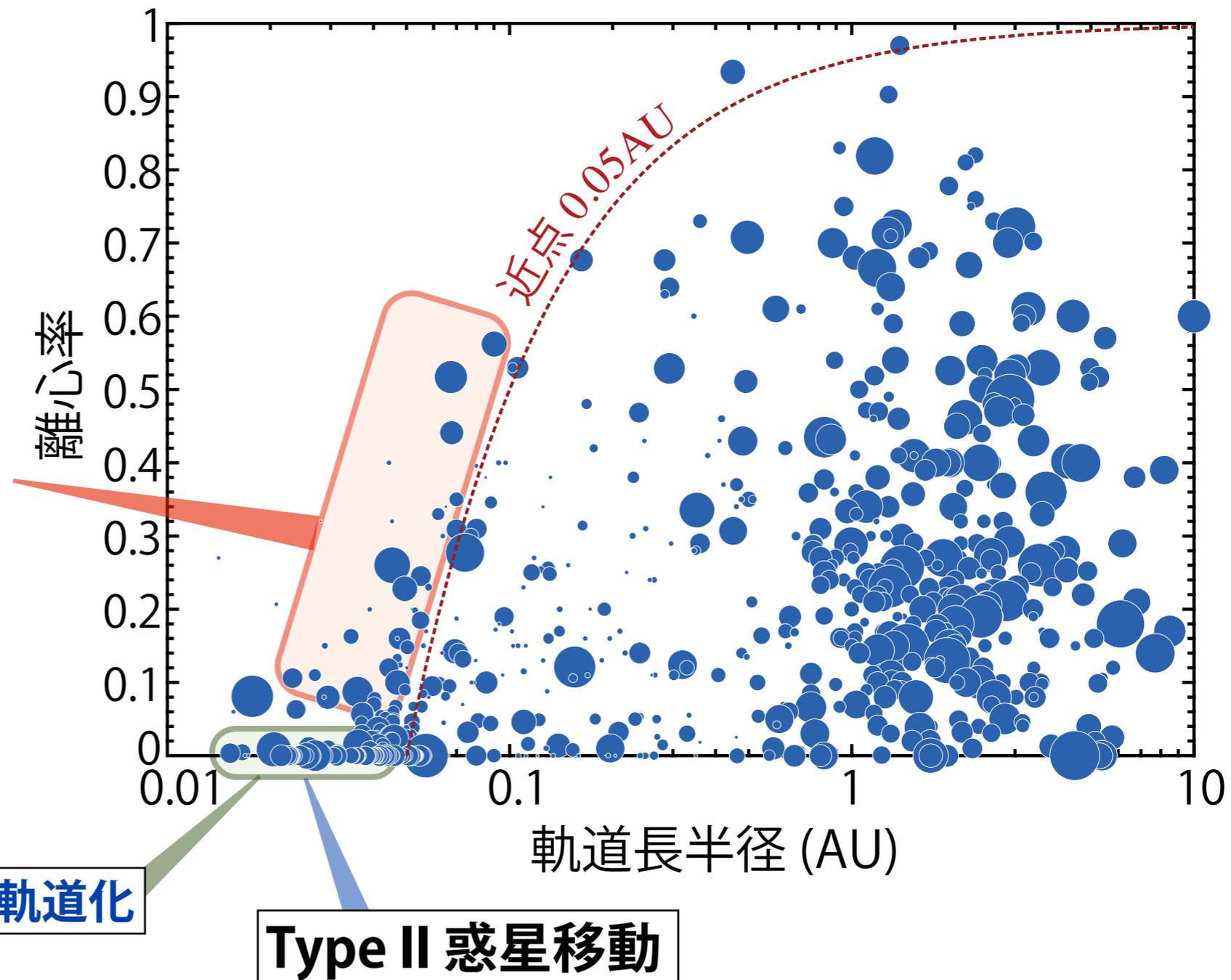
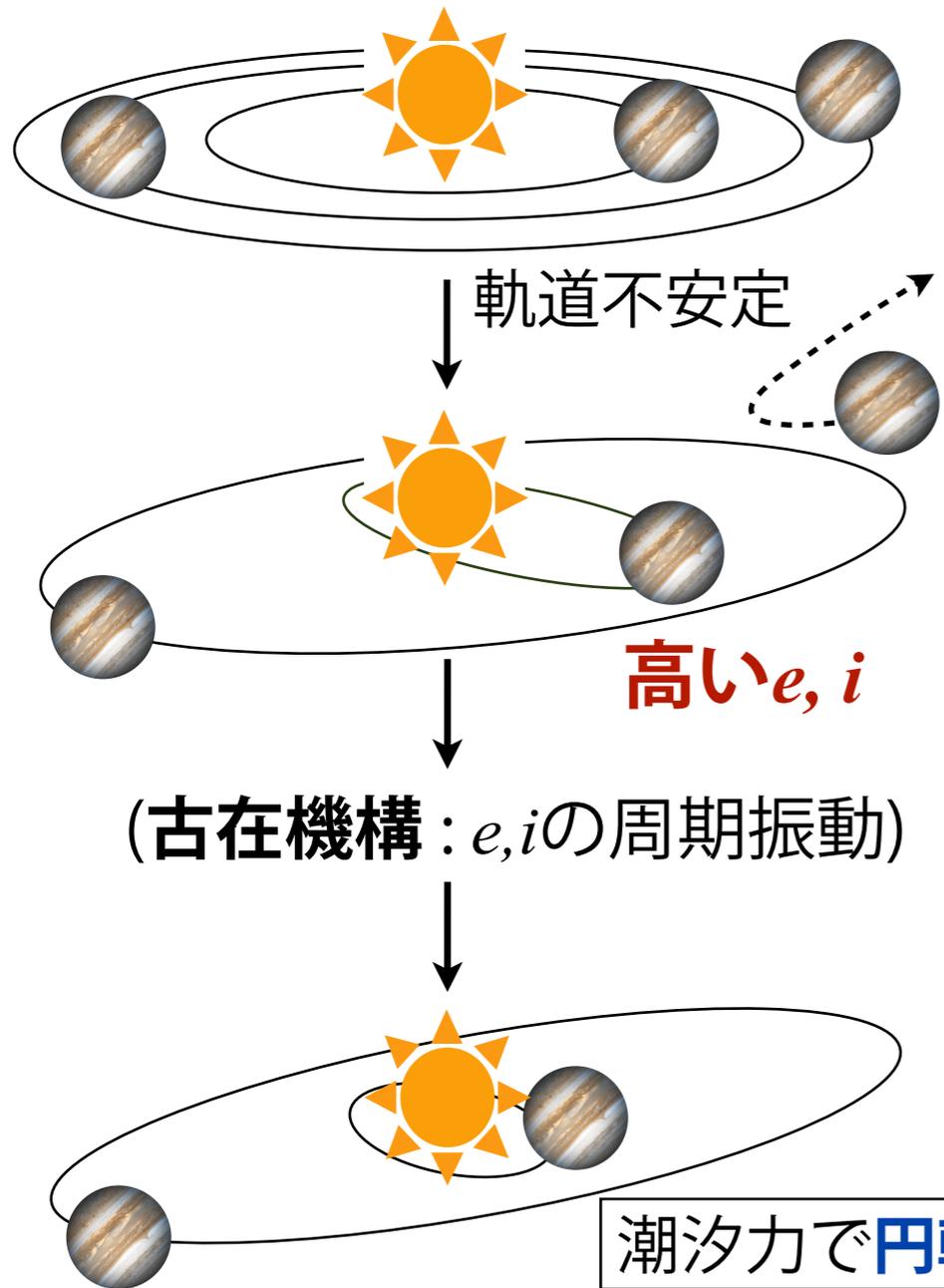
② Type II型惑星移動

(Lin & Papaloizou, 1986; Ward, 1997)

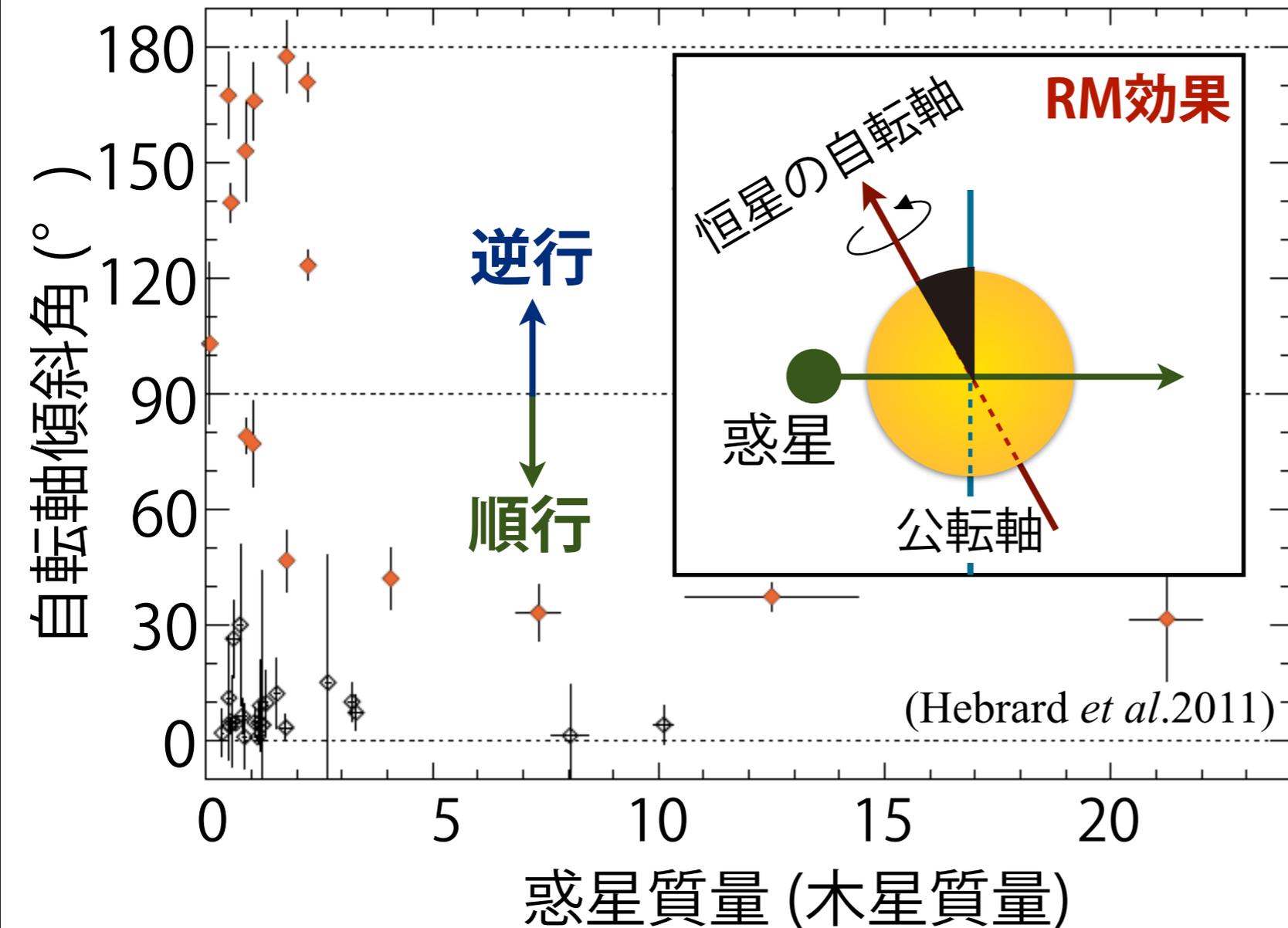
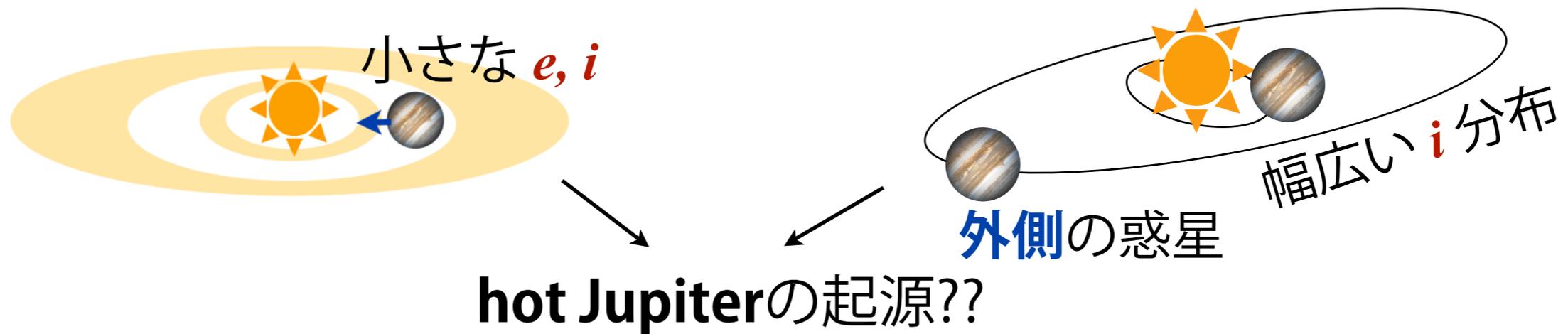


Hot Jupiterの起源：複数ガス惑星の軌道不安定

■ 惑星同士の重力散乱 (e.g. Rasio & Ford, 1996; Weidenschilling & Marzari, 1996; Chatterjee *et al.* 2007; Nagasawa *et al.* 2008)



Hot Jupiterの起源：自転軸傾斜角と外側の惑星



(a) **潮汐力**の強さ (Winn.2011)

低温星 ($T_{eff} \leq 6250K$) ほど
傾いていない

(b) **恒星磁場と円盤**の相互作用

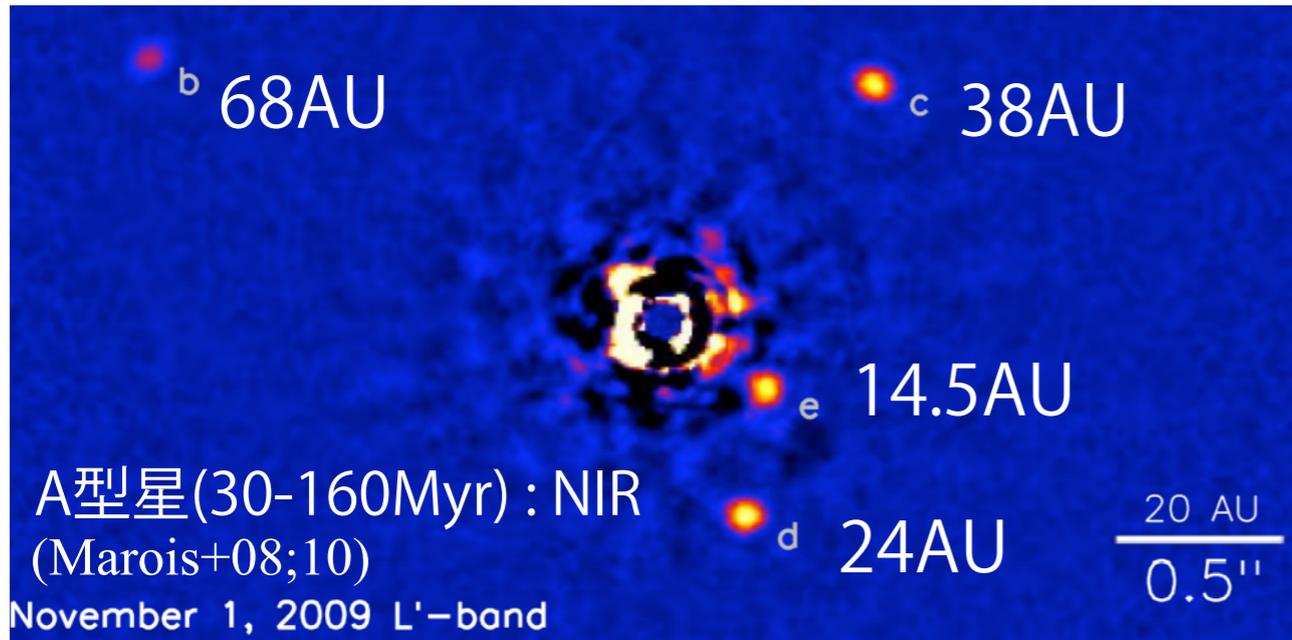
→ 様々な自転軸傾斜角

(Lai et al.2011)

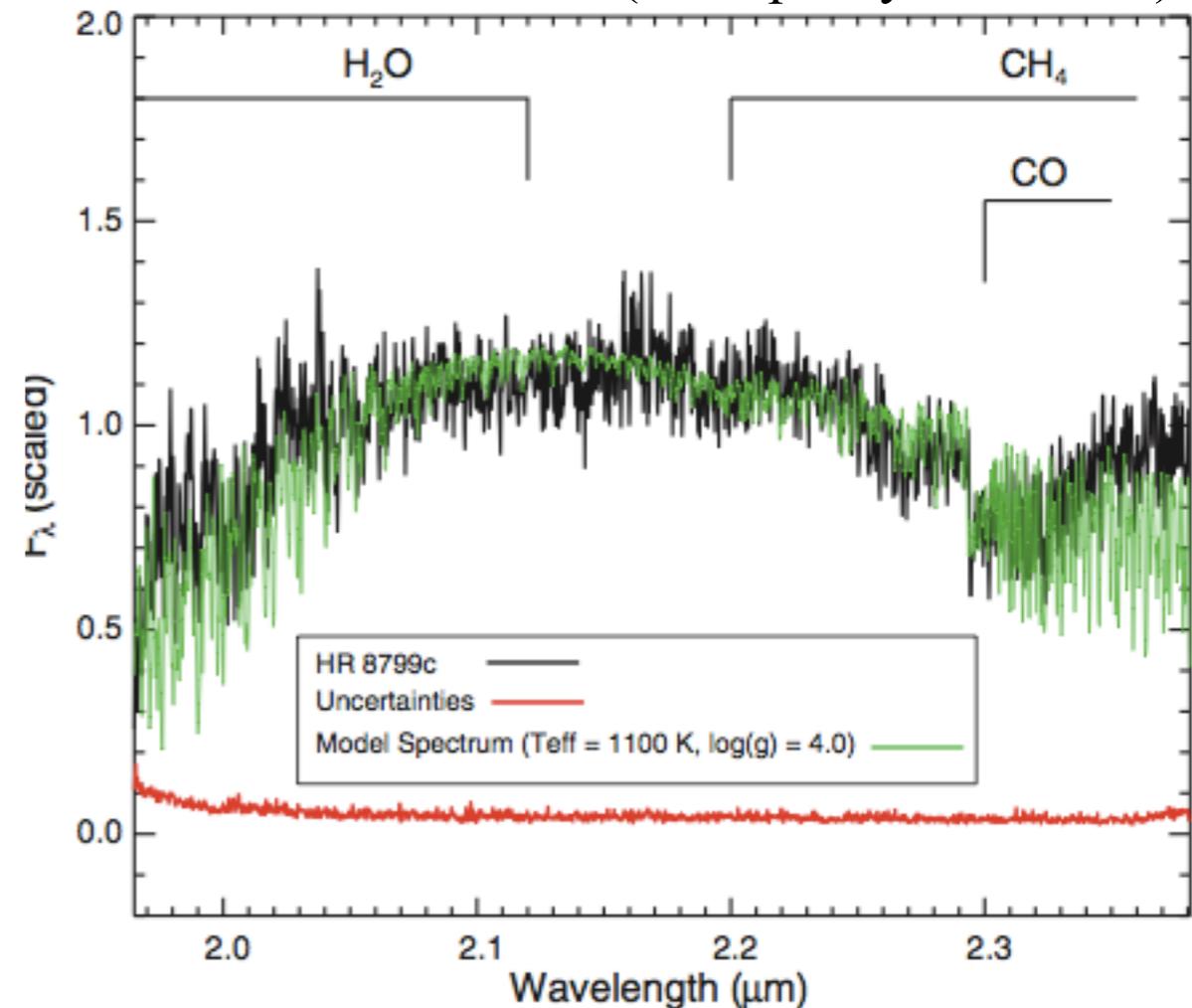
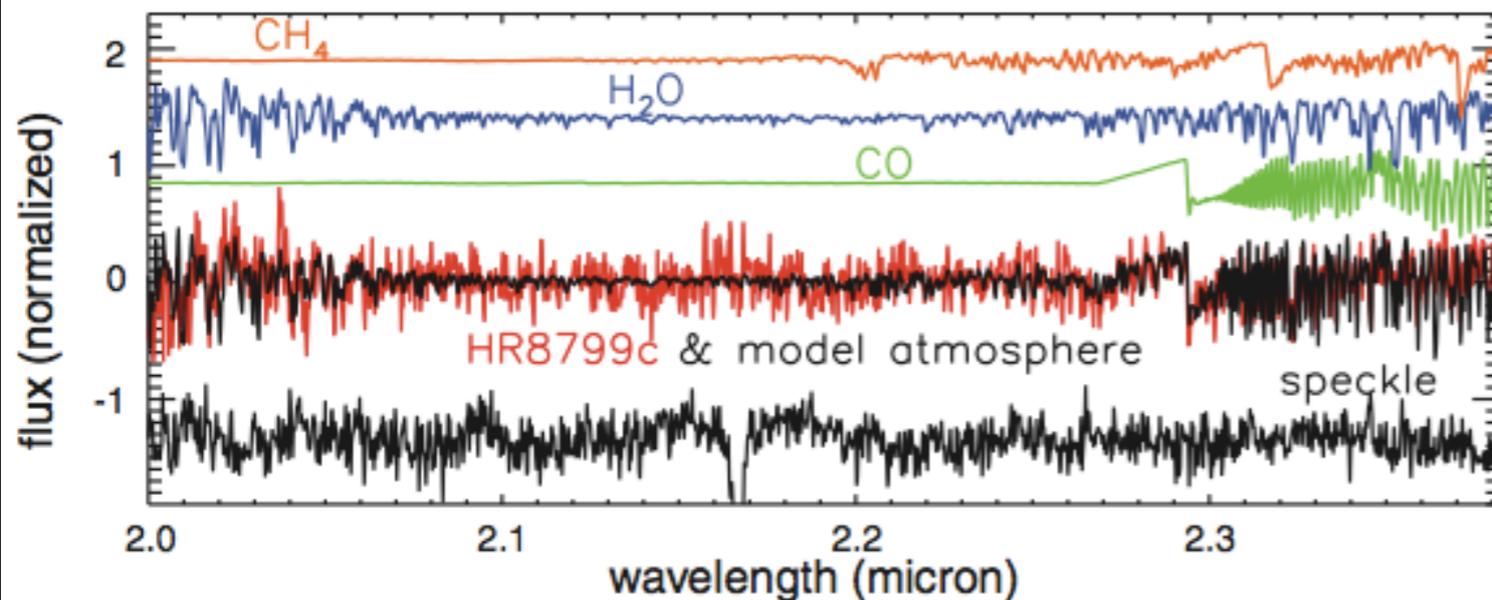
(c) **単独**のhot Jupiterが多い?

直接撮像で発見された遠方ガス惑星の大気

■ HR8799 : 4つのガス惑星(5-10木星質量)



(Konopacky et al.2013)



HR8799cのC/O比(0.65)は、
中心星の値(0.55)より高い？

直接撮像されたガス惑星の雲の有無と褐色矮星

低温の褐色矮星 (L型 → T型: ~1200K)

- (a) 光球面以下に**ダスト雲**の凝縮 / 沈殿
- (b) **CO** → **CH₄** ⇔ covert

【L型矮星】

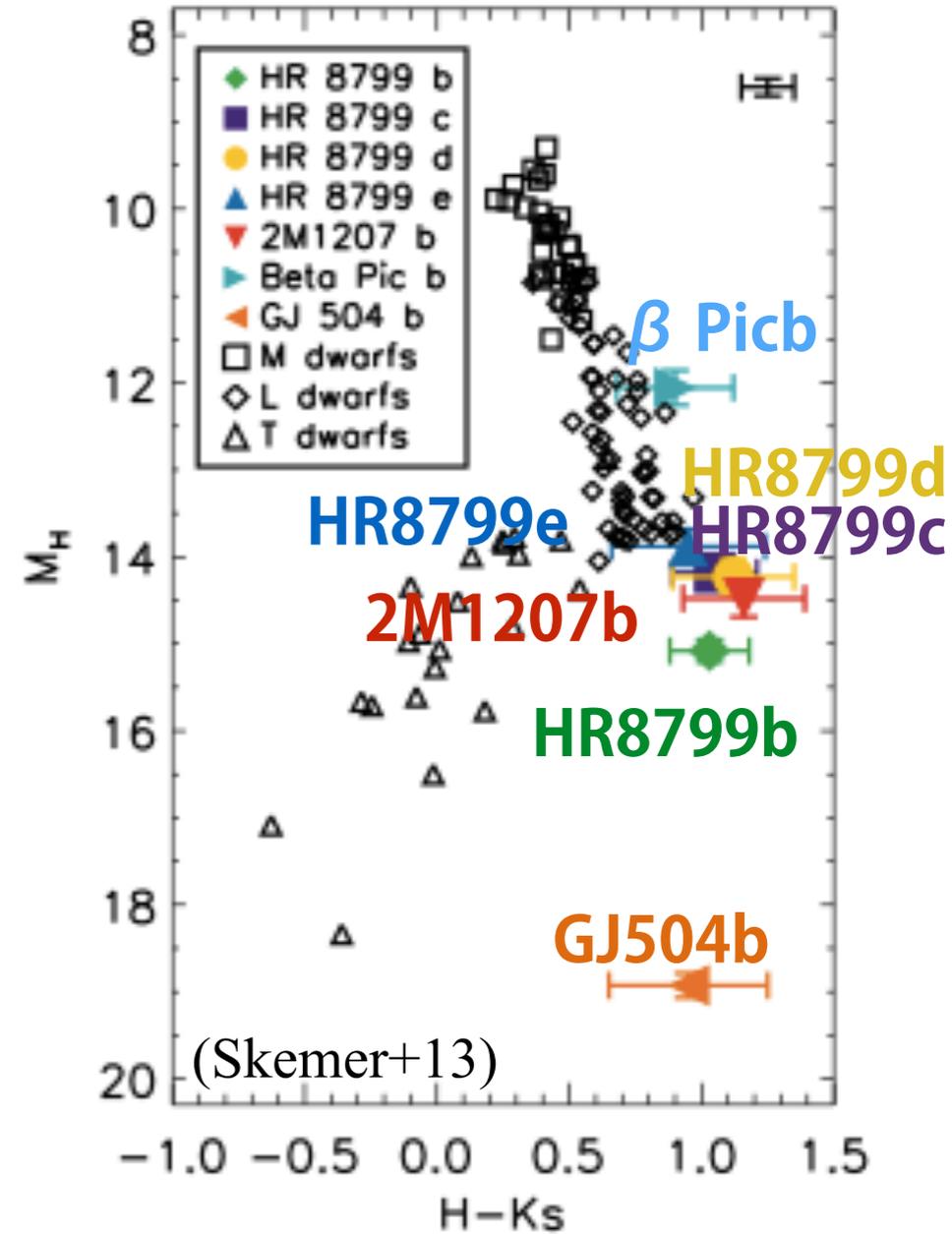
- (NIRの)colorは**赤い**
- CO**の**強い吸収** (e.g. K-band)
- 浅いH₂O** 吸収

※ cloudあり : opacityで高温な大気
CH₄ → CO ⇔ (colorは赤くなる)



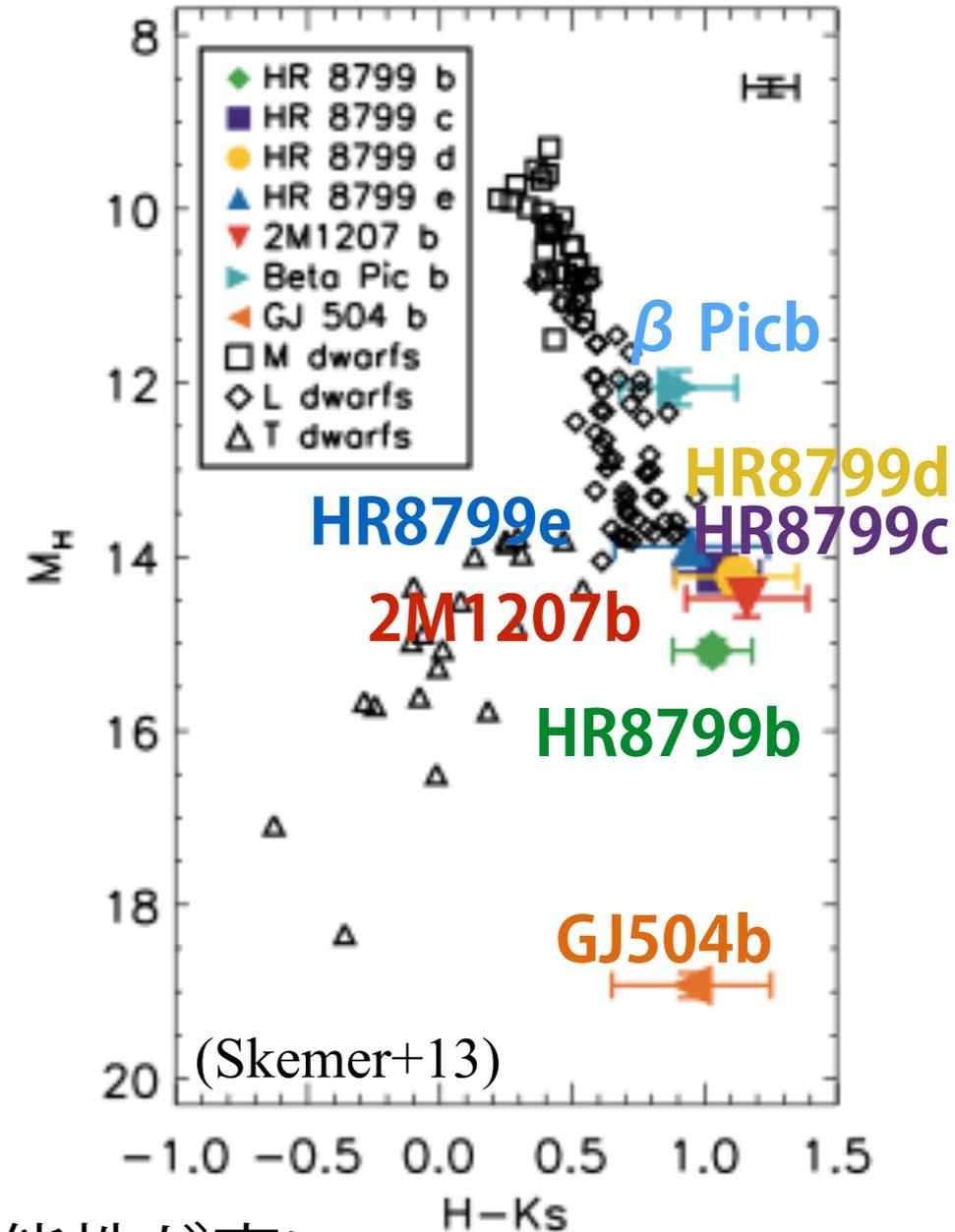
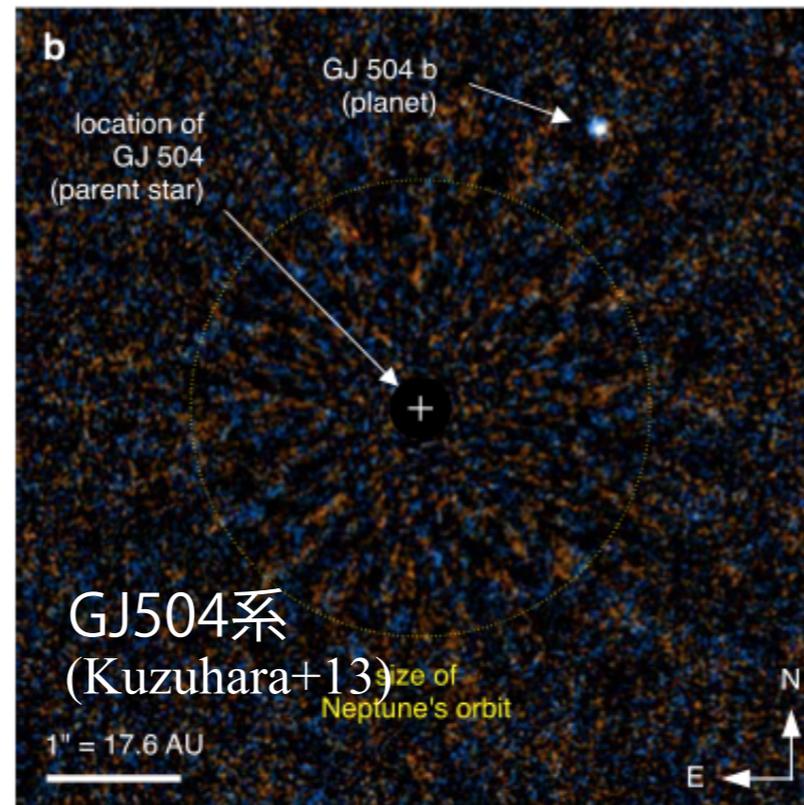
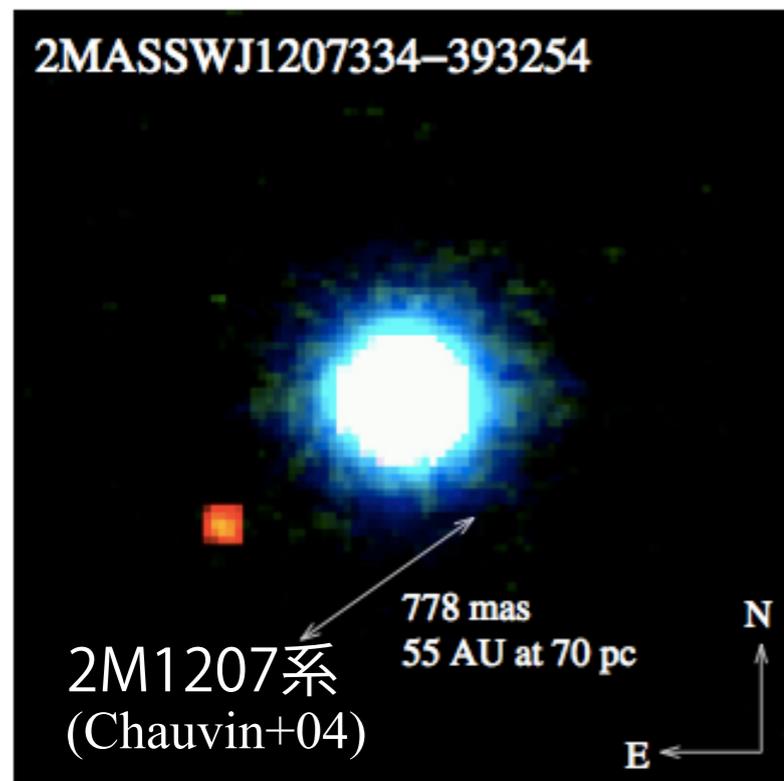
直接撮像されたガス惑星

- 2M1207b (~1200K) (Chauvin+04)
- β Pic b (~1500K) (Lagrange+09)
- HR8799b,c,d,e (~900-1200K) (Marois+08;10)
- GJ504b (~500K) (Kuzuhara+13)



- : M型星
- ◇ : L型星
- △ : T型星

直接撮像されたガス惑星の雲の有無と褐色矮星



赤い HR8799系, 2M1207b → **thick cloud**あり?

※ HR8799系は **patchy cloud**?

(e.g. Barman+11; Skemer+13)

(cf) L/T型の褐色矮星: **patchy cloud**を持つ可能性が高い

(Brenzli+13)

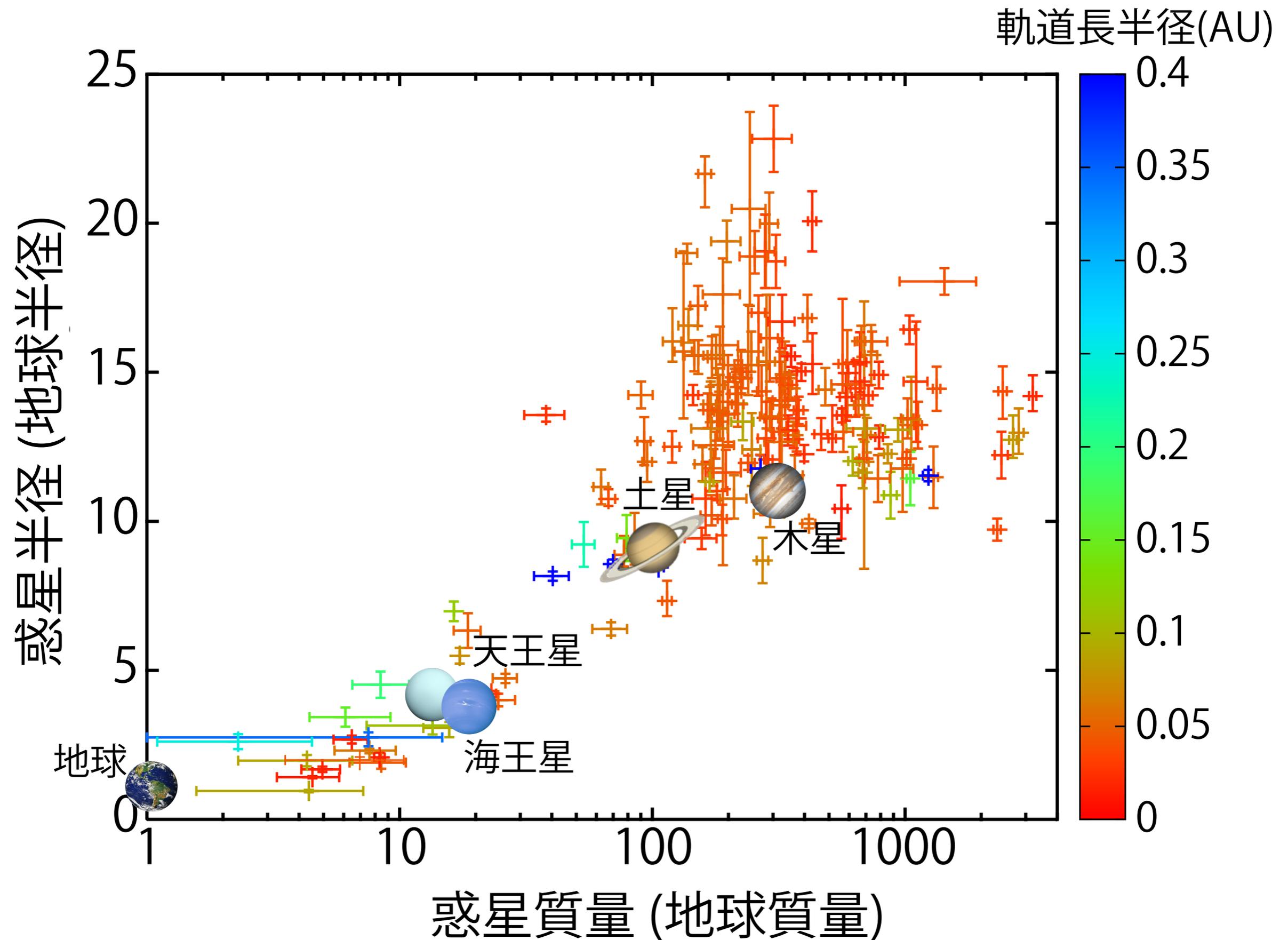
青い GJ504b : **less or no cloud**?

□ : M型星

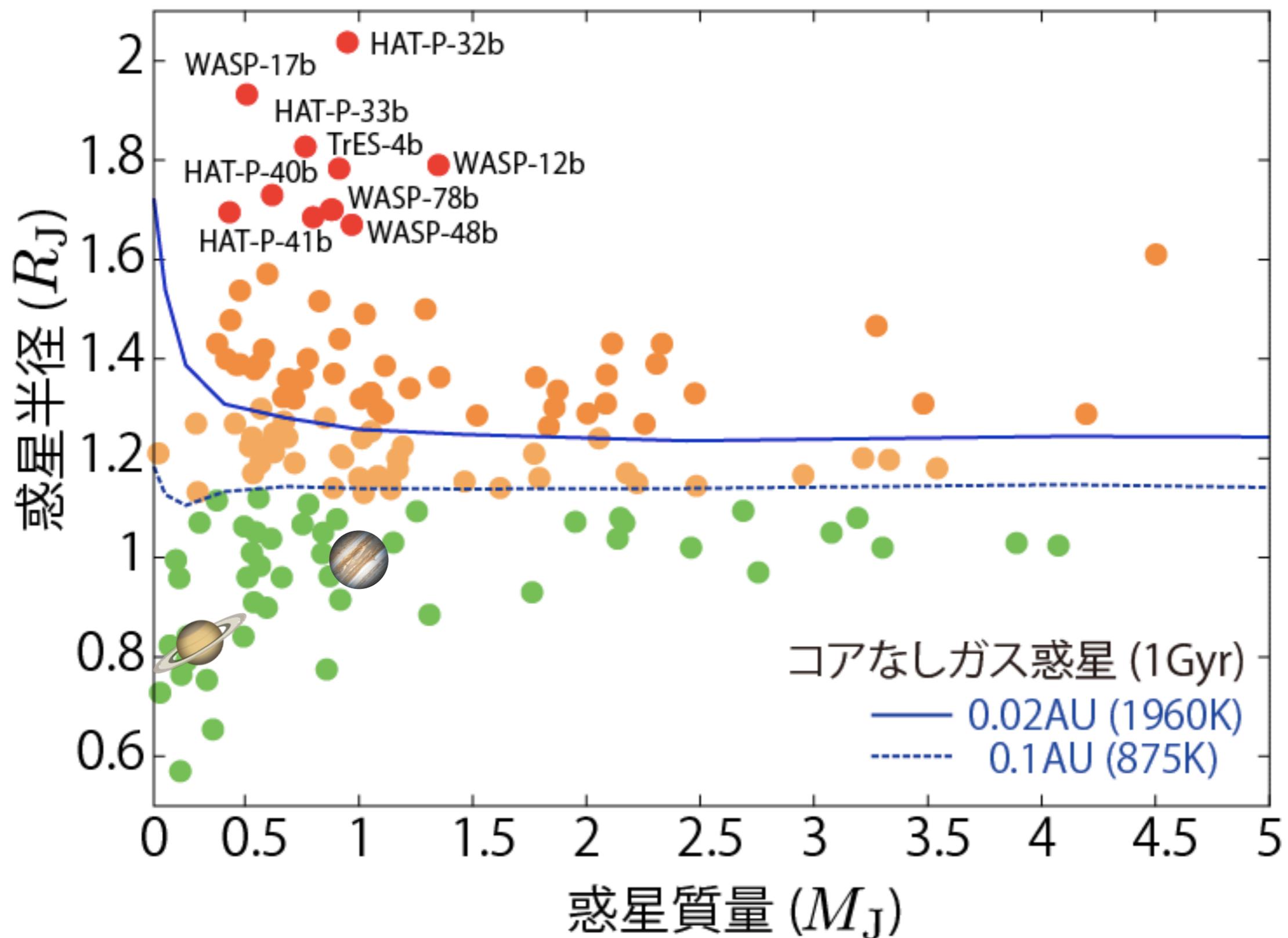
◇ : L型星

△ : T型星

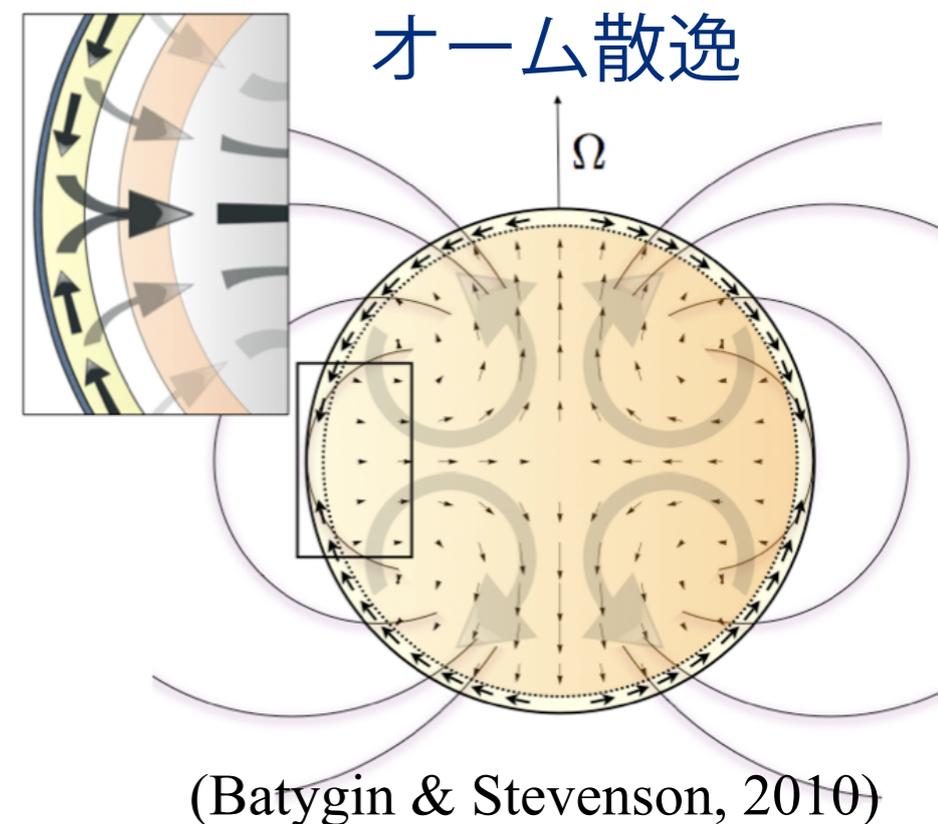
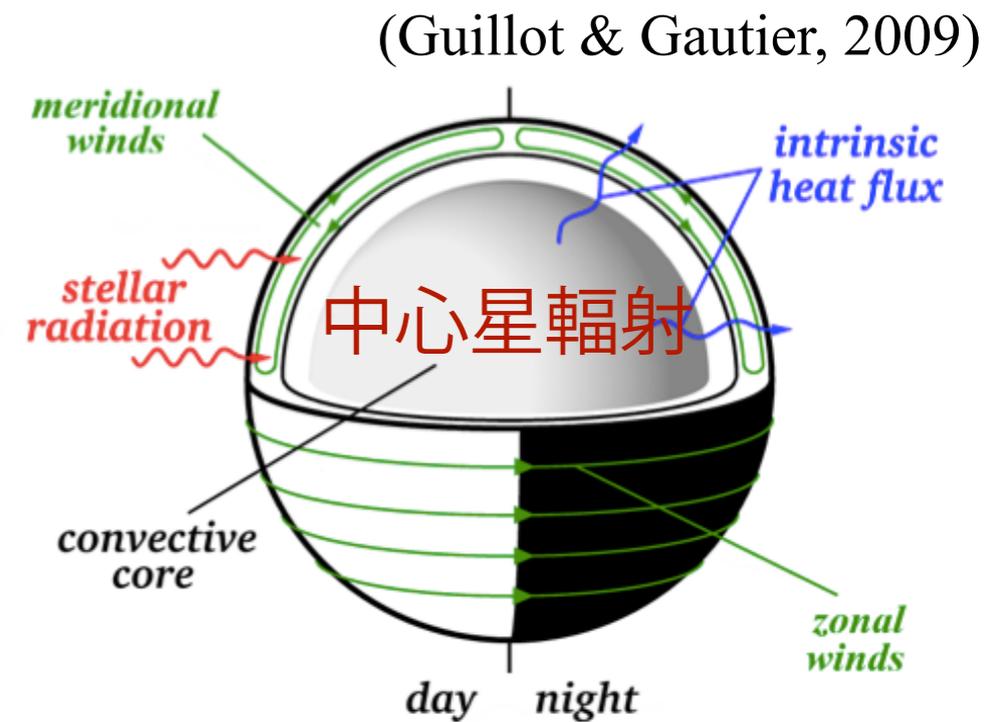
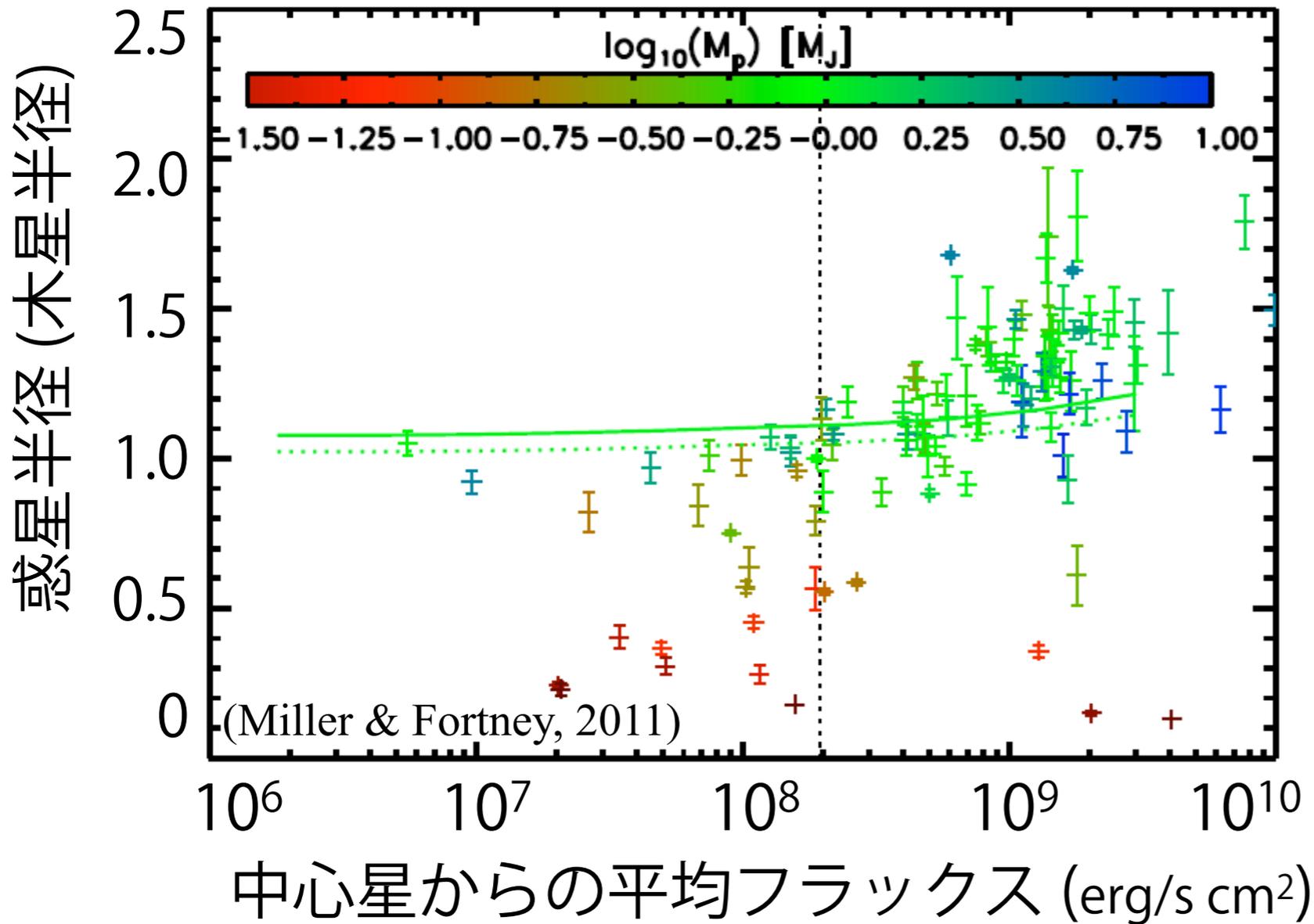
これまでに発見された Transit 惑星



異常膨張した短周期ガス惑星



hot Jupiter の異常半径と熱源



※ 大気中のオーム散逸

「アルカリ金属の電離 + 惑星磁場」

(a) 上層：中性ガス流への磁気抵抗

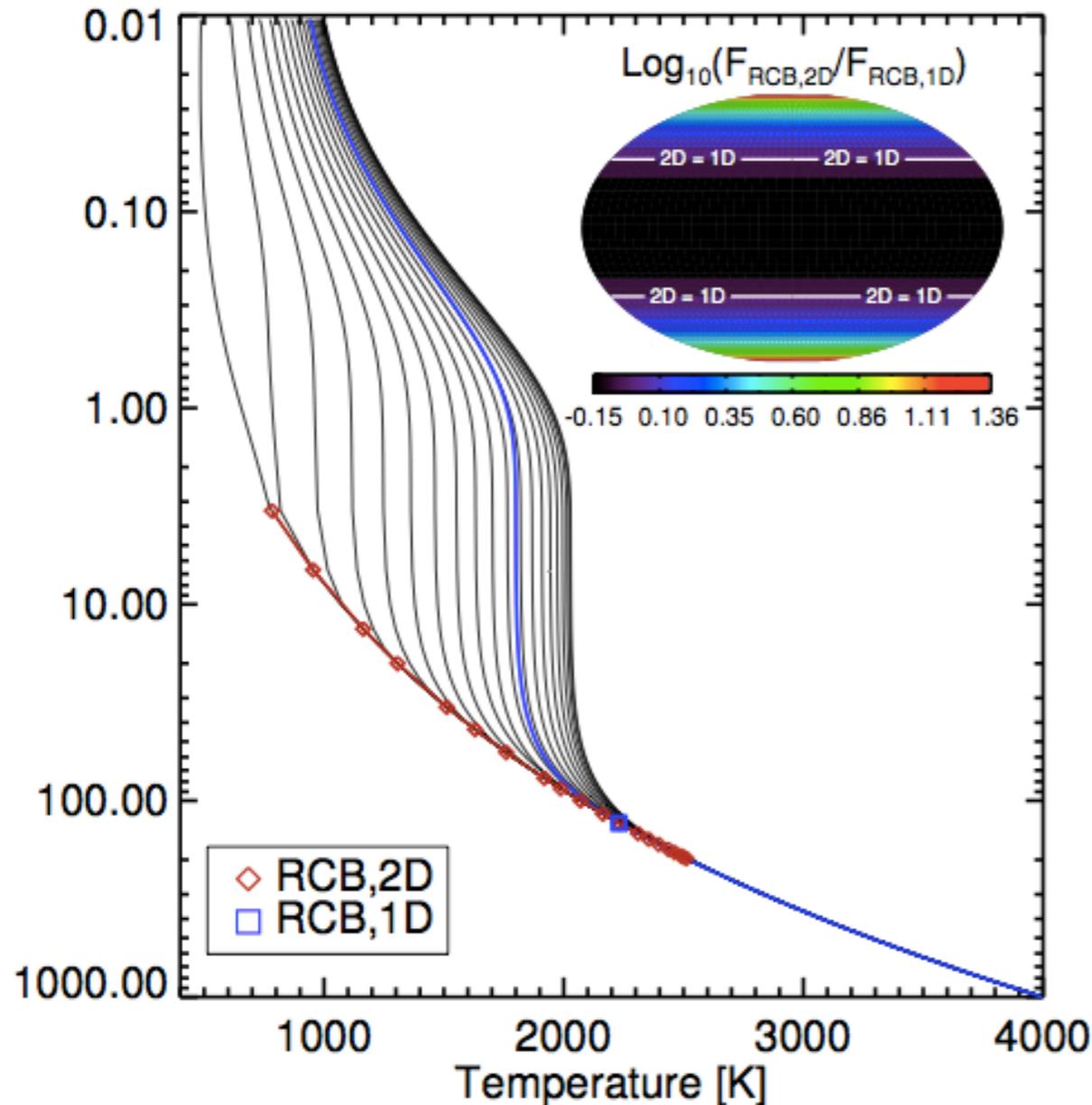
(b) 内部：誘導電流の貫入

大気の運動エネルギー → 熱エネルギー

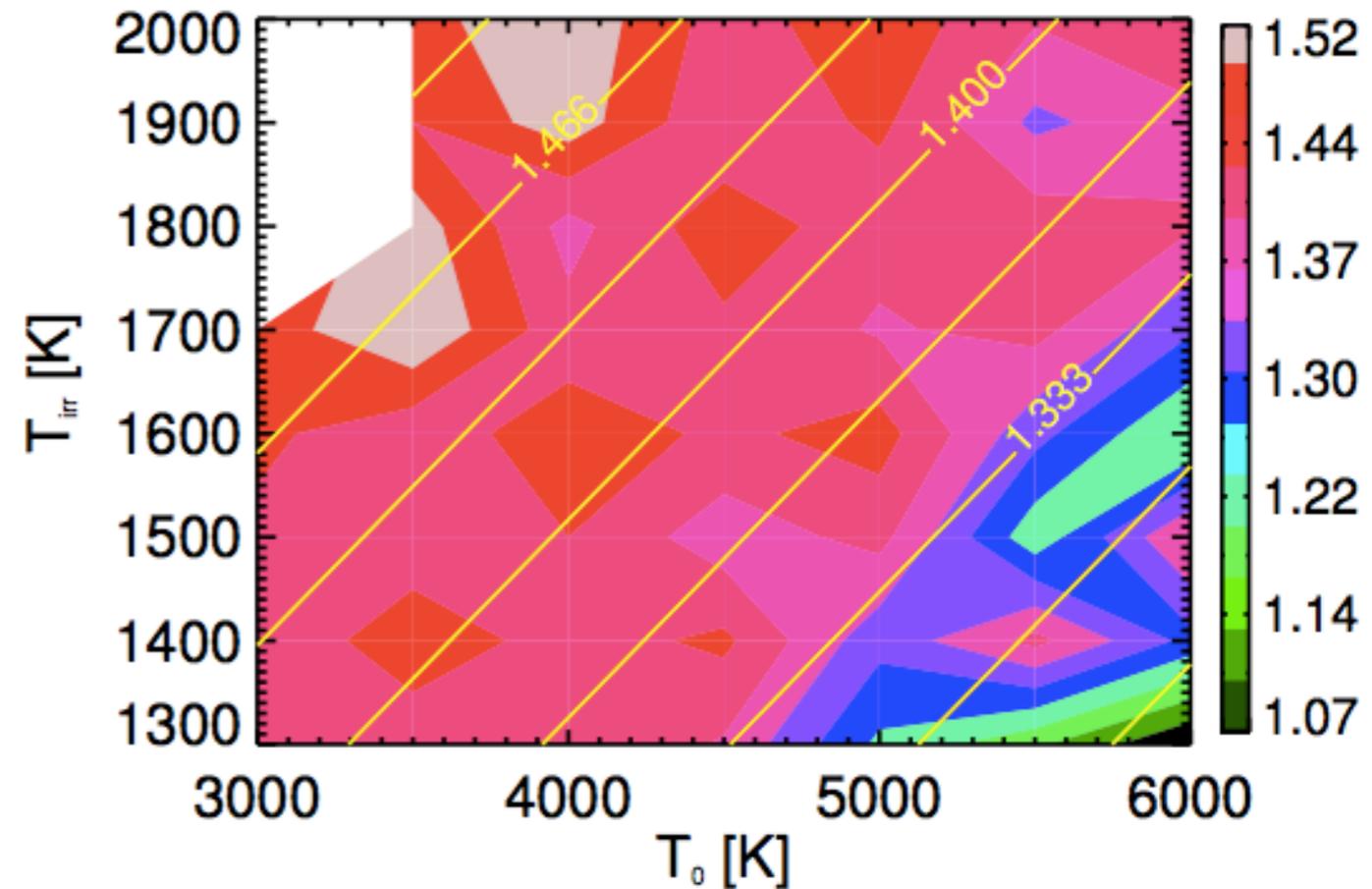
hot Jupiterの大気：対流圏界面と冷却率

(Rauscher & Showman, 2013)

1Dと2Dモデルで hot Jupiter大気の
対流圏界面の位置



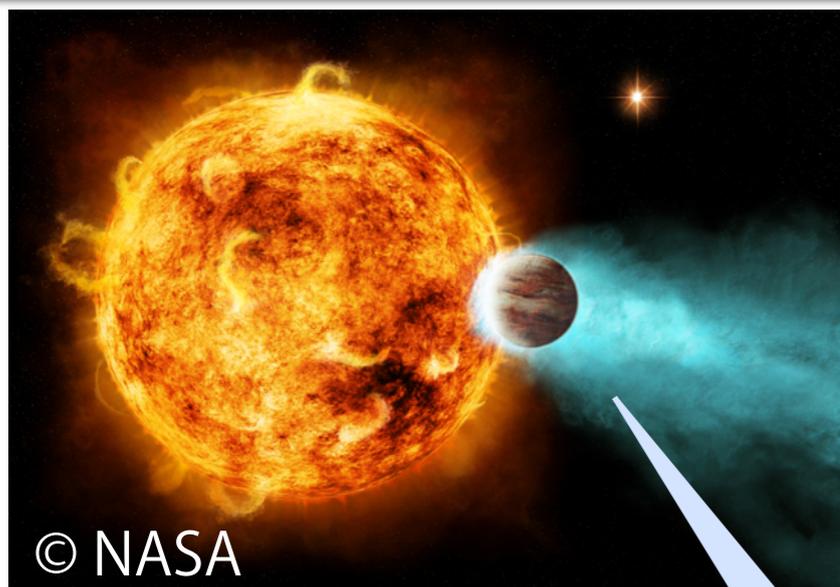
2D/1Dモデルでの冷却率の比



放射fluxは、極付近では**1桁程度高く**、赤道面では**抑制**
→ **cooling rate**は**10-50%増大**

※ 異常半径の問題には、マイナスのセンス

恒星からのXUVと系外ガス惑星の大気散逸

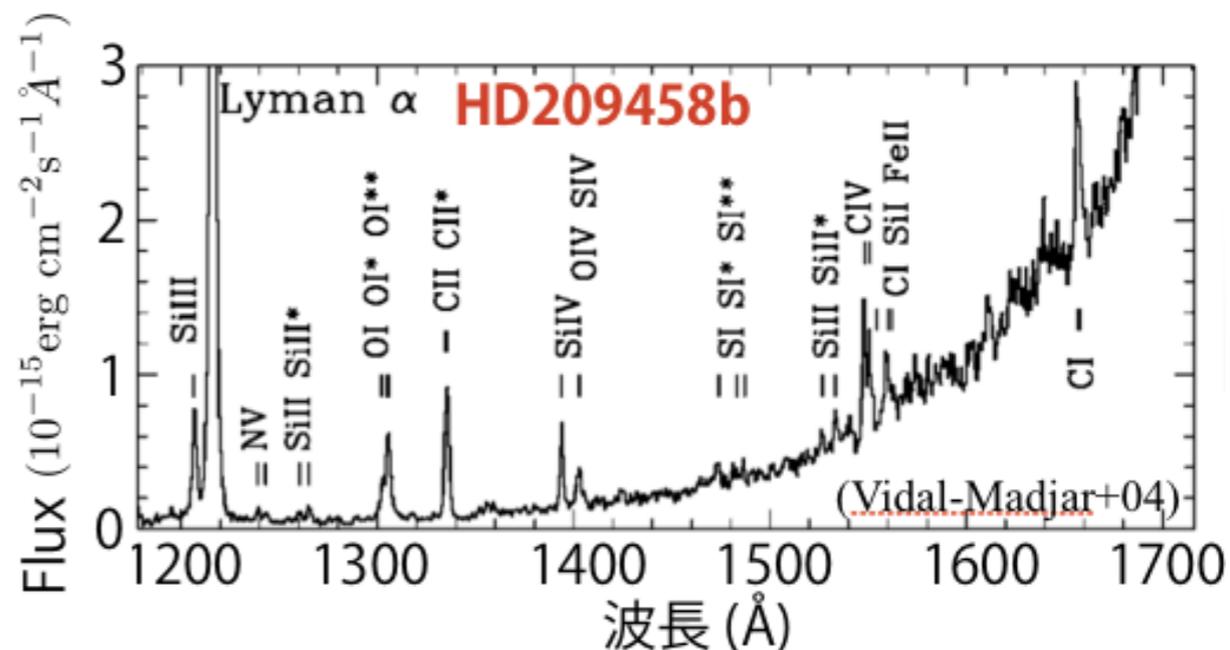


短周期ガス惑星 (hot Jupiter)

中心星近傍のガス惑星

(公転周期~ 数日, $a \sim 0.05\text{AU}$)

H₂大気の流出
流出した**Hガス**の尾



【大気散逸するhot Jupiterの傍証】

4例のみ (すべて**UV観測** by HST)

Hubble宇宙望遠鏡 (HST STIS)

HD209458b

HI Ly α , O I, C II, Si III
(Vidal-Madjar+03;04;08; Ballester+07;Linsky+10)

HD189733b

HI Ly α , Si III, N V
(Lecavelier des Estang+10;Bourrier+13)

55 Cnc.b

HI Ly α (Ehrenreich+12)

WASP-12b

Mg II (NUVA,B,C~2500-2800 \AA) (Fossati+10)



短周期惑星の質量損失：熱的／非熱的過程

(a) 中心星近傍で強烈な**X線, EUV照射**

→ 上層大気の加熱で**流体力学的散逸**

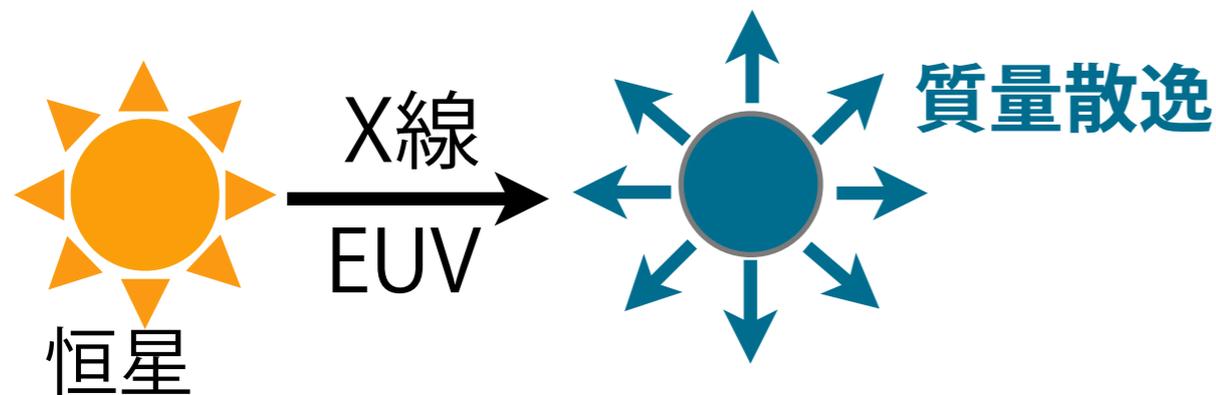
(e.g. Lammer+03; Lecavelier des Etangs+04; Yelle, 04; Erkaev+07)
Penz & Micela 2008; Lopez+12; Owen & Wu 2013; Lopez & Fortney, 2013)

(b) 恒星風／コロナ質量放出による**H⁺, O⁻ pick-up**

特に、**弱い惑星磁場**の場合

(Khodachenko *et al.* 2007; Lammer *et al.* 2009; Terada+09)

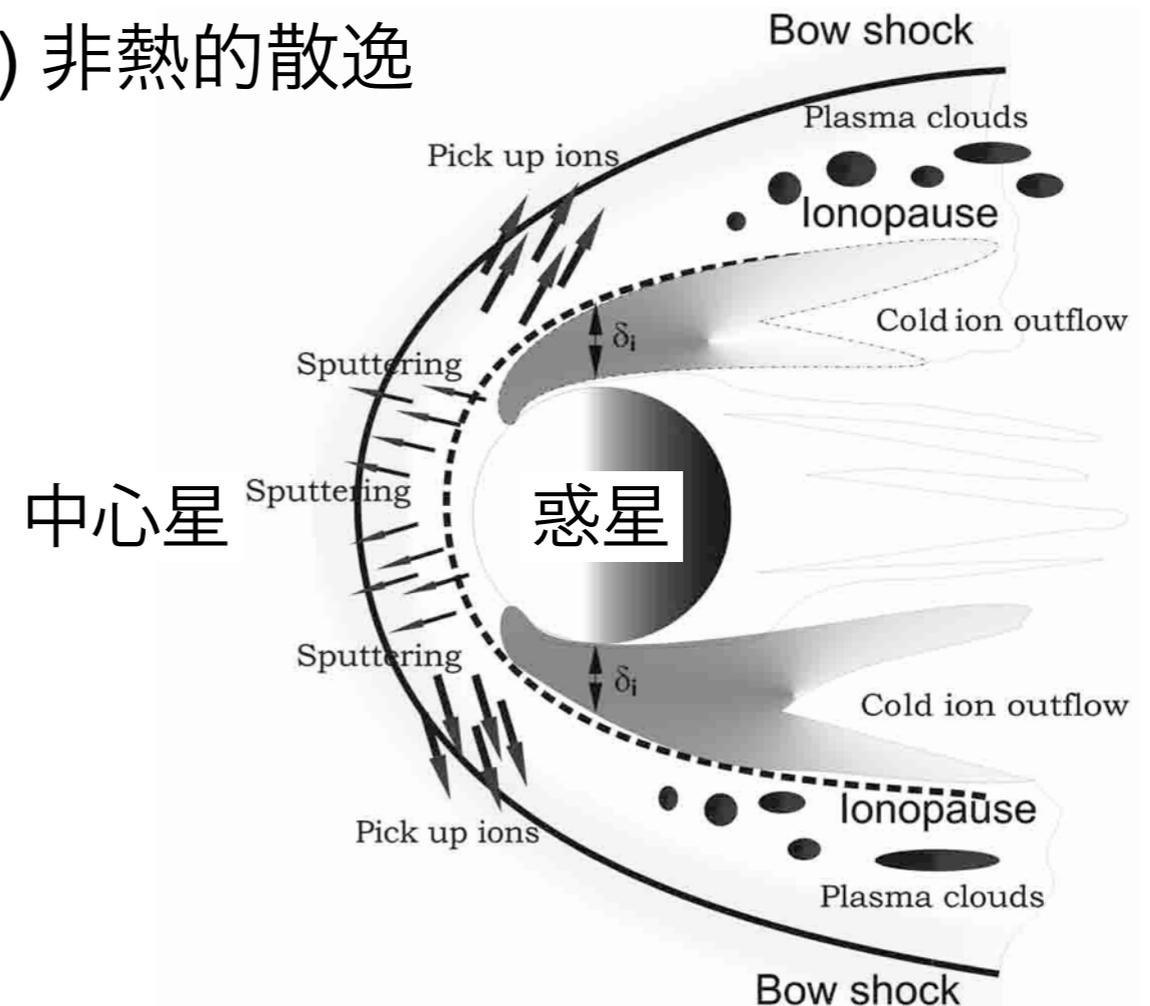
(a) 熱的散逸



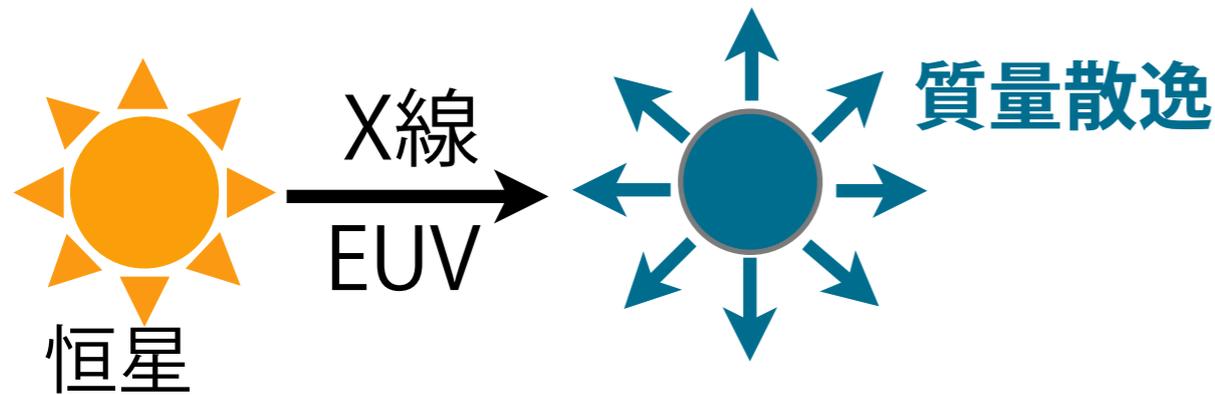
エネルギー一律速な**流体力学的散逸**

$$\dot{M} = \epsilon \frac{3F_{XUV}(t)}{4G\bar{\rho}K_{\text{tide}}} \quad (\text{e.g. Yelle, 2008})$$

(b) 非熱的散逸

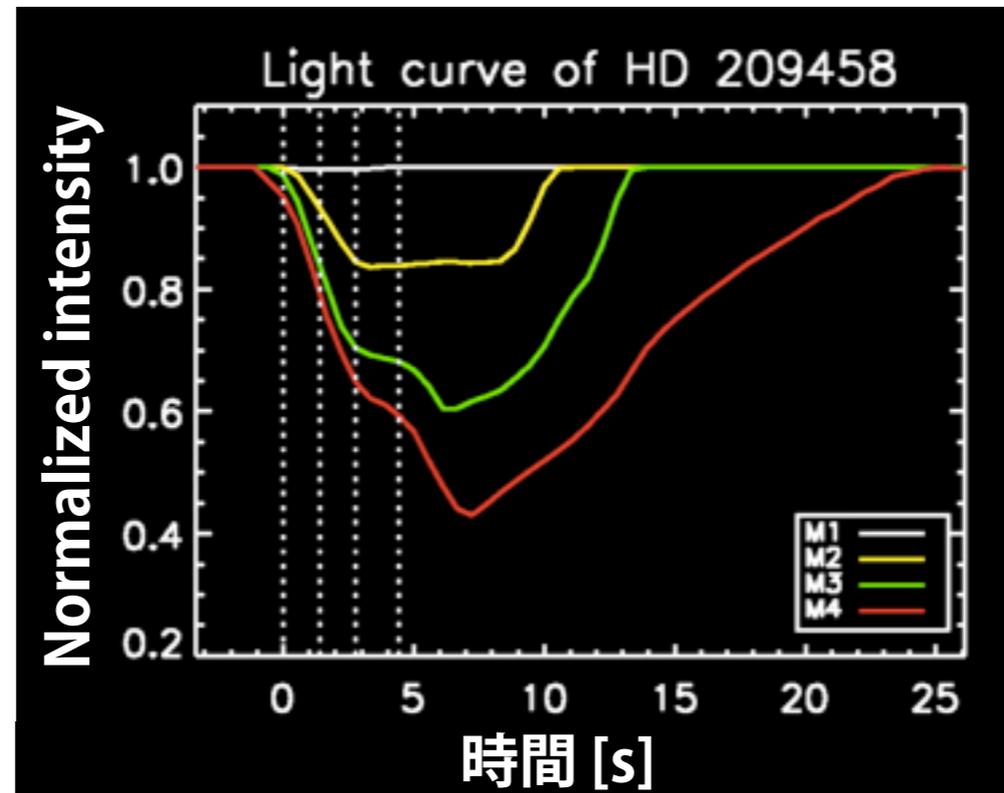


短周期惑星の質量損失：熱的／非熱的過程

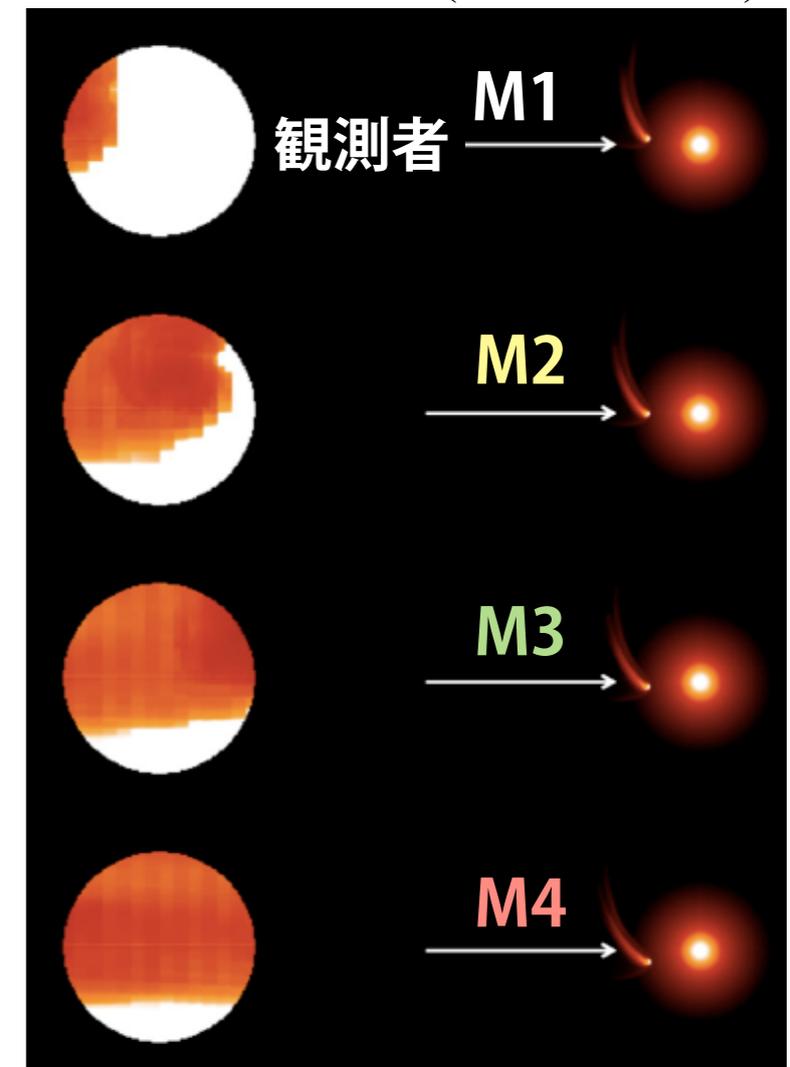


エネルギー一律速な流体力学的散逸 (Energy-consistent hydrodynamic mass loss)

$$\dot{M} = \epsilon \frac{3F_{XUV}(t)}{4G\bar{\rho}K_{\text{tide}}} \quad (\text{e.g. Yelle, 2008})$$



(Schneider+07)



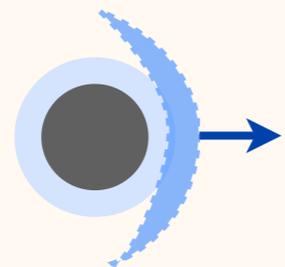
UV観測から探る系外巨大惑星の磁場と大気散逸

① Transit入りのズレ

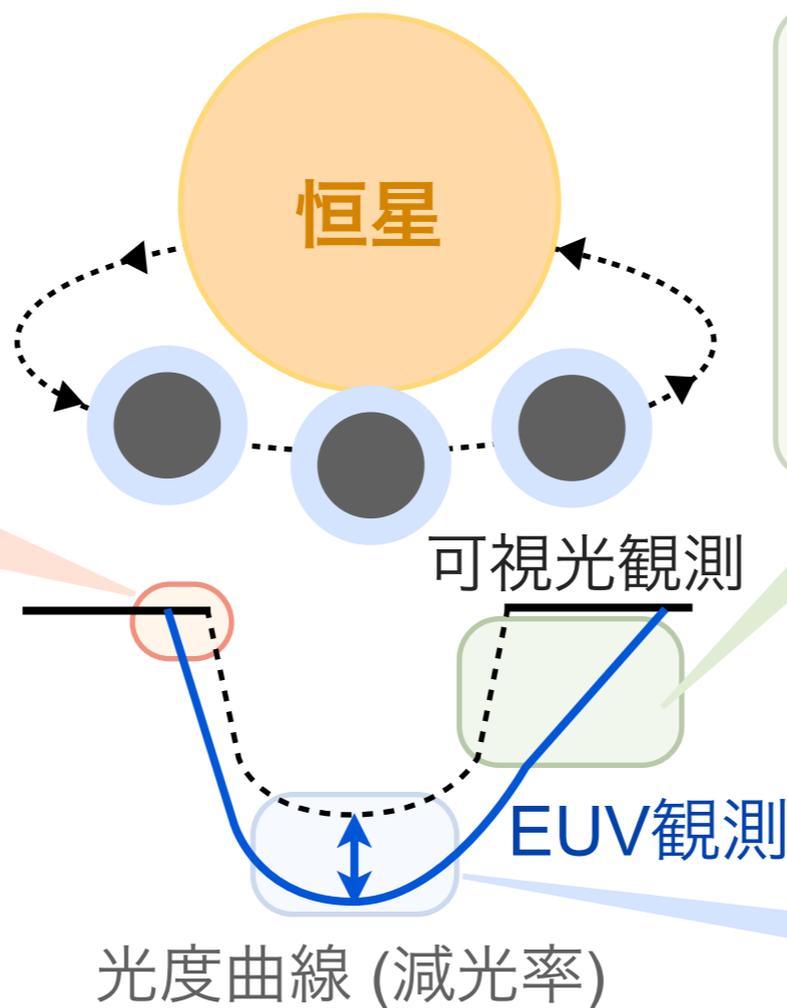
恒星風と**惑星磁場**の相互作用で惑星の**進行方向 前面**に**bow shock**形成 (Vidotto+10)



「**惑星磁場の情報**」



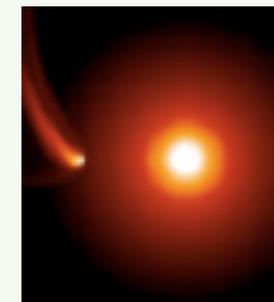
(観測例) **WASP-12b** (Fossati+10)



② 非対称な光度曲線

水素大気の流出

Coriolis力 + 輻射圧



ガス尾 → **大気の散逸率**

(e.g. Schneider+07; Holmstrom+08)

③ 深い減光率

水素大気(Ly α)の**UV吸収分**
(OI, CII, Si IIIでも同様)

$R_{uv} > Roche$ 半径

↳ **大気散逸の証拠**
大気の散逸率

(e.g. Vidal-Madjar+03;04)



④ Ly α 吸収の分光観測

Ly α 吸収線の**青方偏移**
H原子の速度分布 (> **脱出速度**)



「**大気散逸の証拠**」

(OI, CII, Si IIIなどの他の吸収線でも可)

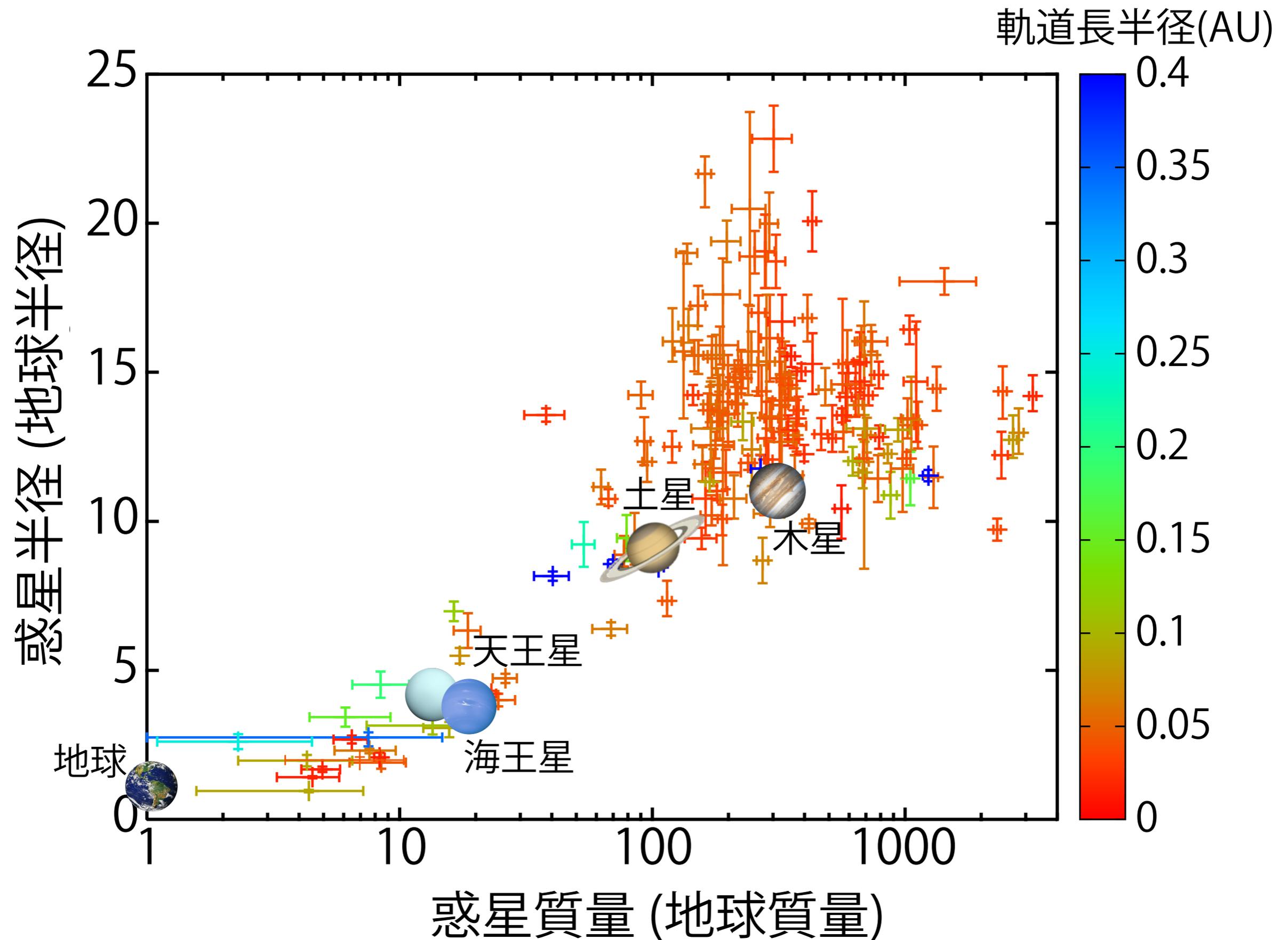
X線



UV



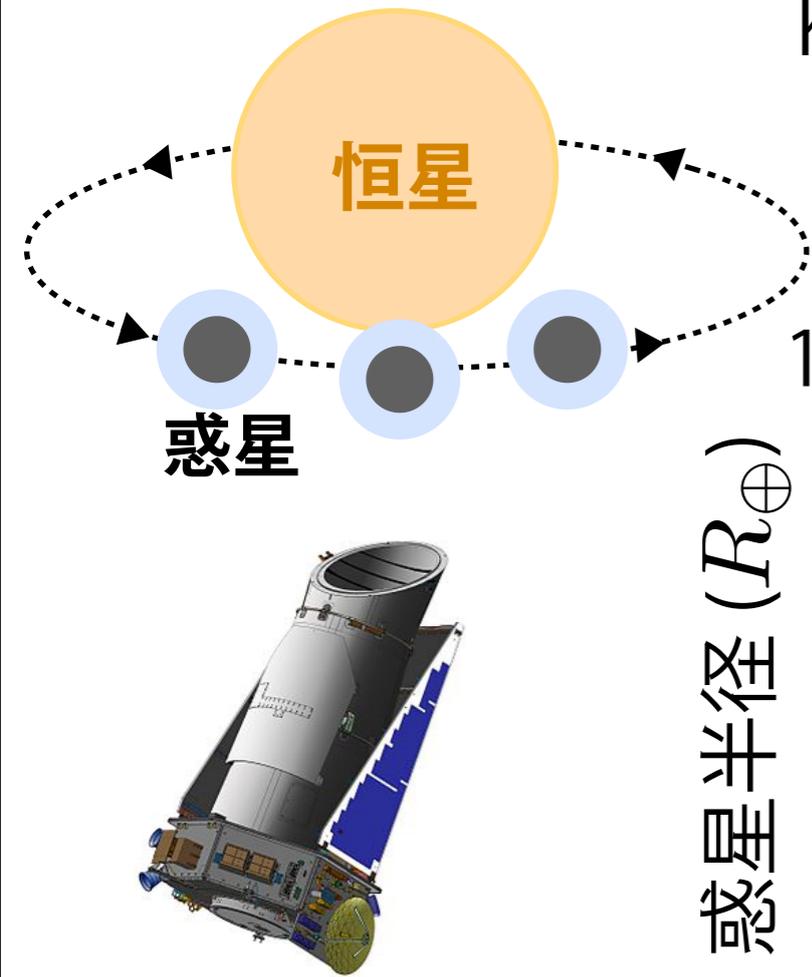
これまでに発見された Transit 惑星



Part II Super-Earths と hot Neptunes

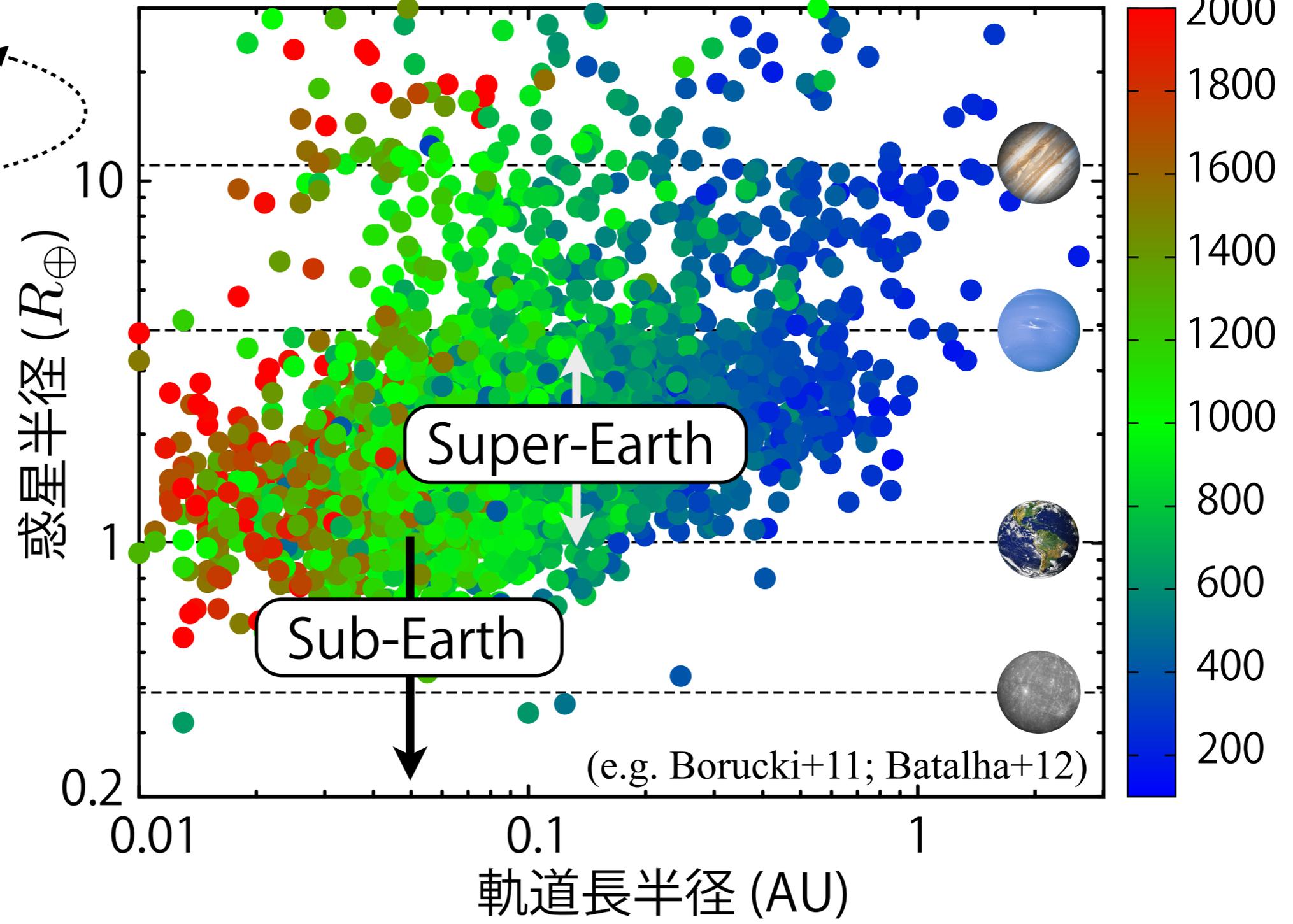
Super-Earth, そして Sub-Earthの時代へ

Transit観測



Kepler宇宙望遠鏡の惑星候補天体 (3,277個)

平衡温度 (K)



※ Bond albedo = 0.3
中心星からの入射flux：全球で一様

短周期 Super-Earthの起源

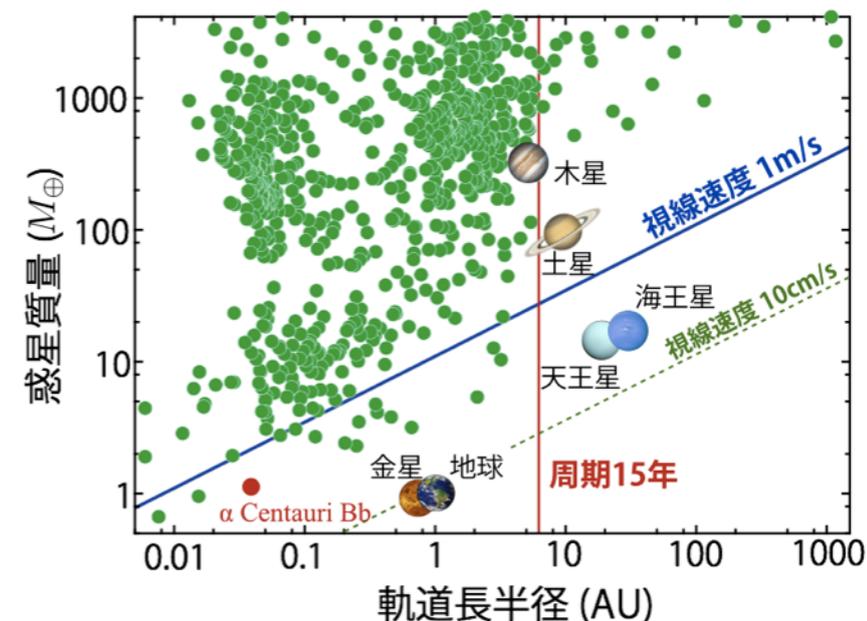


中心星近傍の**巨大な固体惑星**
(1-30地球質量)

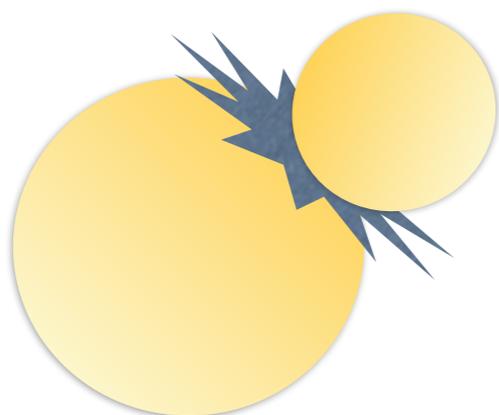
FGK型星周りでの存在頻度 (P<50日)

HARPS : ~**28%**
Keck : ~**18%** → **common**
Kepler : ~**13%**

(Howard+10;11;Mayor+11)

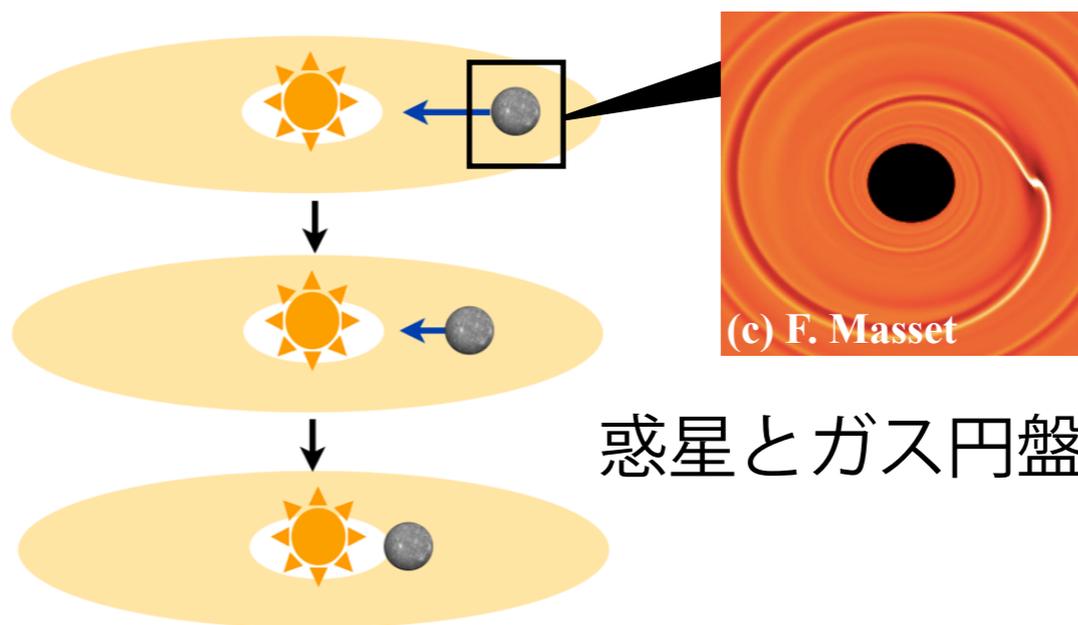


■ 天体同士の巨大衝突



※ (初期の)内側領域の**固体物質**の量

■ Type I 惑星移動 (Goldreich & Tremaine, 1980 Ward, 1986; Tanaka *et al.* 2002)



惑星とガス円盤の潮汐相互作用

※ 外側領域からの(原始)**惑星**の**落下**

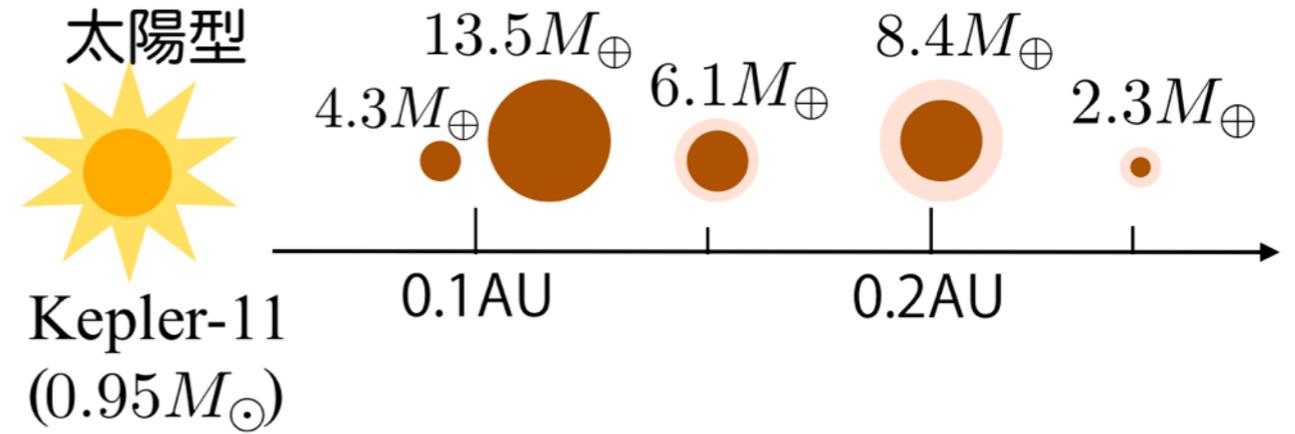
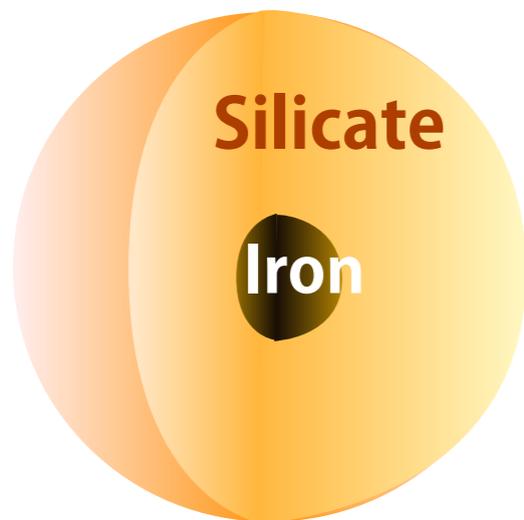
発見された高密度・低密度なSuper-Earth



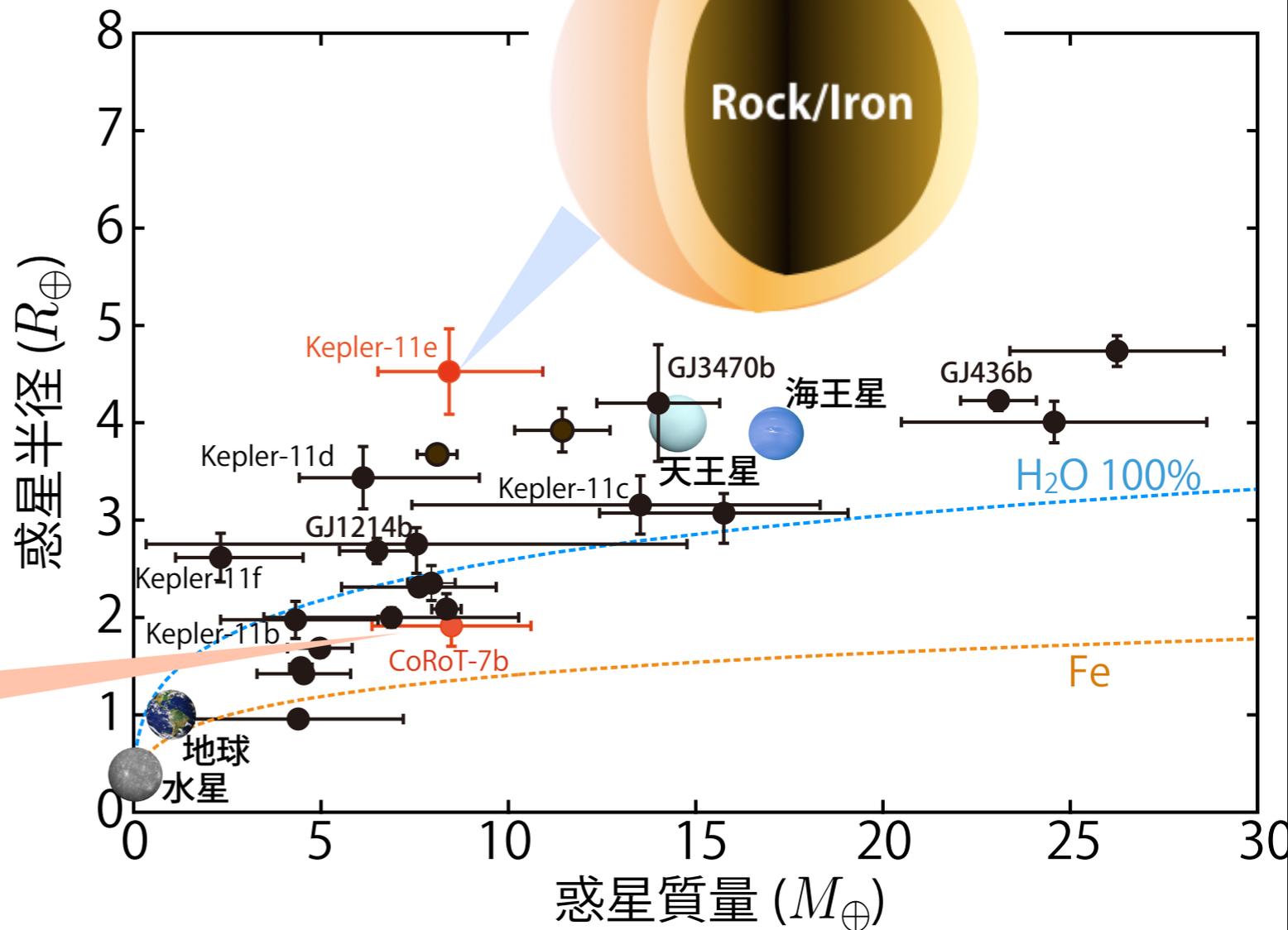
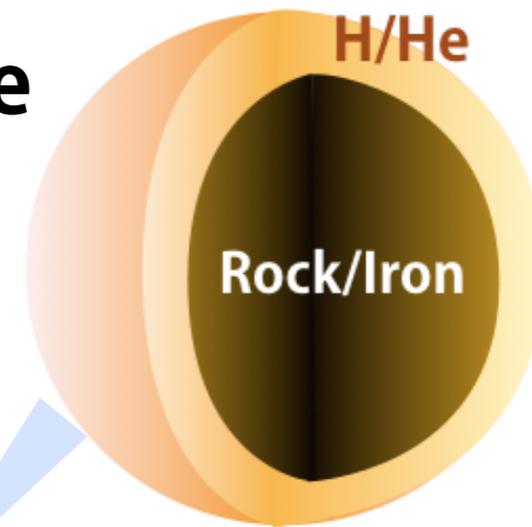
CoRoT-7b

周期 ~ 20hr (0.0172AU)
半径 ~ 1.68倍の地球半径
質量 ~ 4.8倍の地球質量

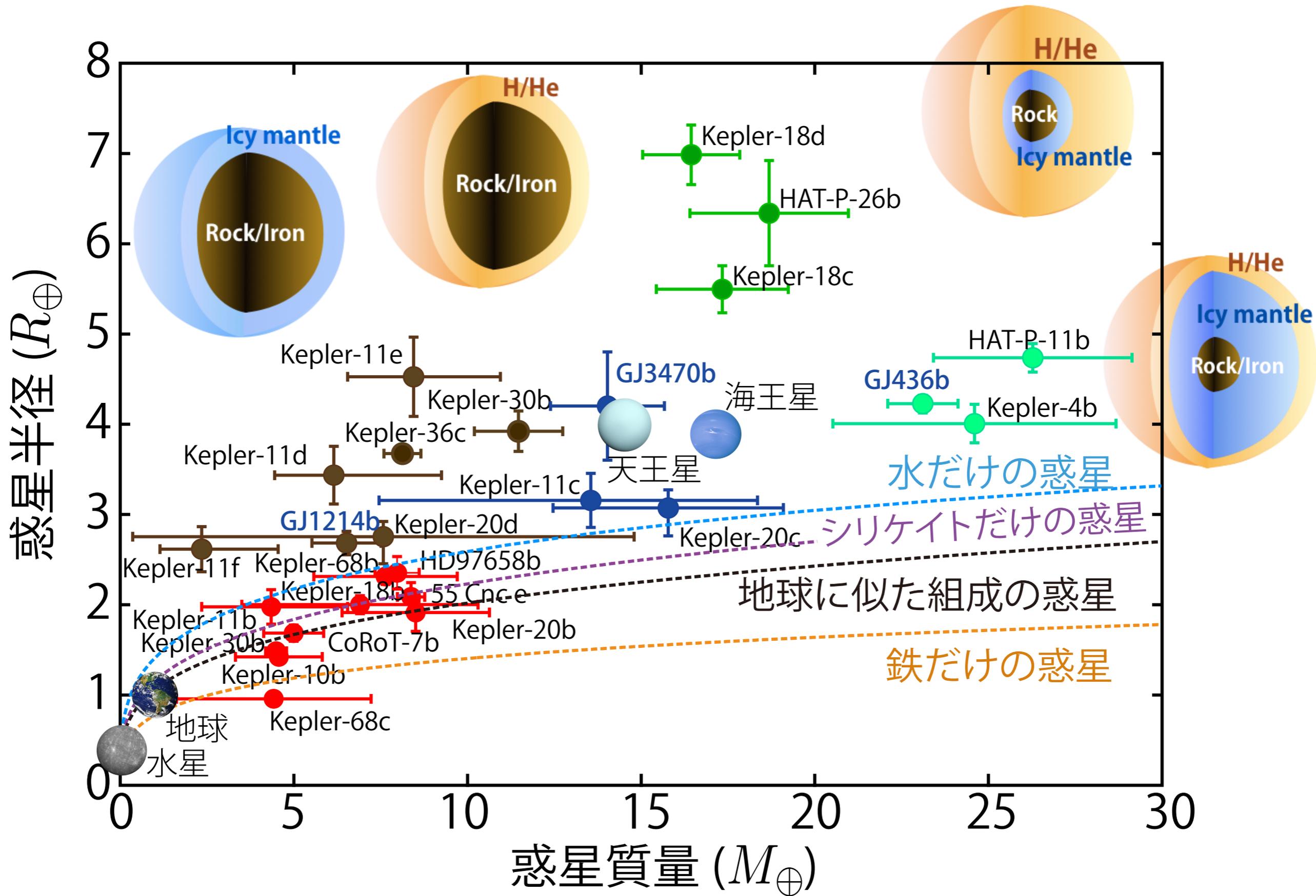
(恒星) K型星: $0.87R_{\odot}$



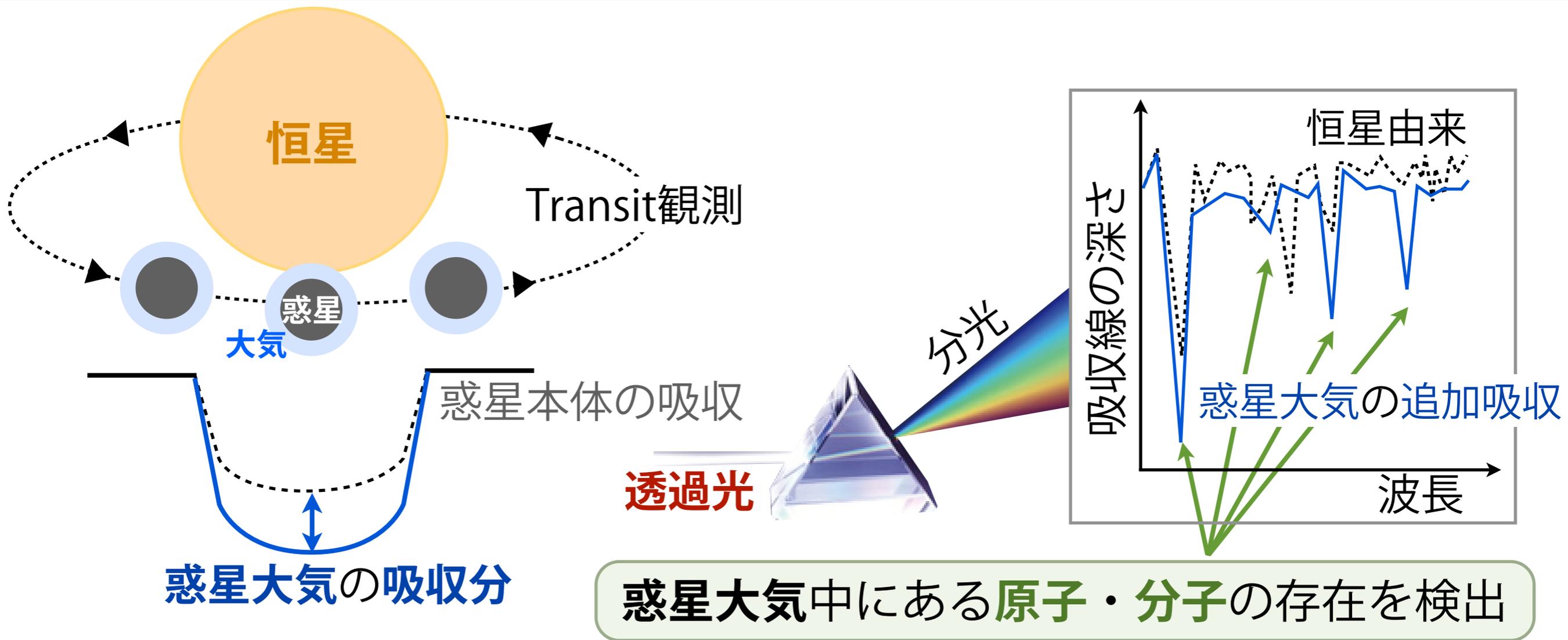
Kepler-11e



発見された短周期 Super-Earth (0.5AU以内)



大気スペクトルから「惑星の特徴付け」



* GJ436b

半径 ~ $4.09 R_{\oplus}$
質量 ~ $23.4 M_{\oplus}$
周期 2.64日 (0.0289AU)

※ **M型星** ($V = 10.68, 10.2\text{pc}$)
(Butler+04; Gillon+07)

* GJ1214b

半径 ~ $2.84 R_{\oplus}$
質量 ~ $6.26 M_{\oplus}$
周期 1.58日 (0.0141AU)

※ **M型星** ($V = 14.71, 13\text{pc}$)
(Charbonneau+09)

* GJ3470b

半径 ~ $4.6 R_{\oplus}$
質量 ~ $14 M_{\oplus}$
周期 3.34日 (0.0356AU)

※ **M型星** ($V = 12.27, 30.7\text{pc}$)
(Bonfils+12; Demory+13)

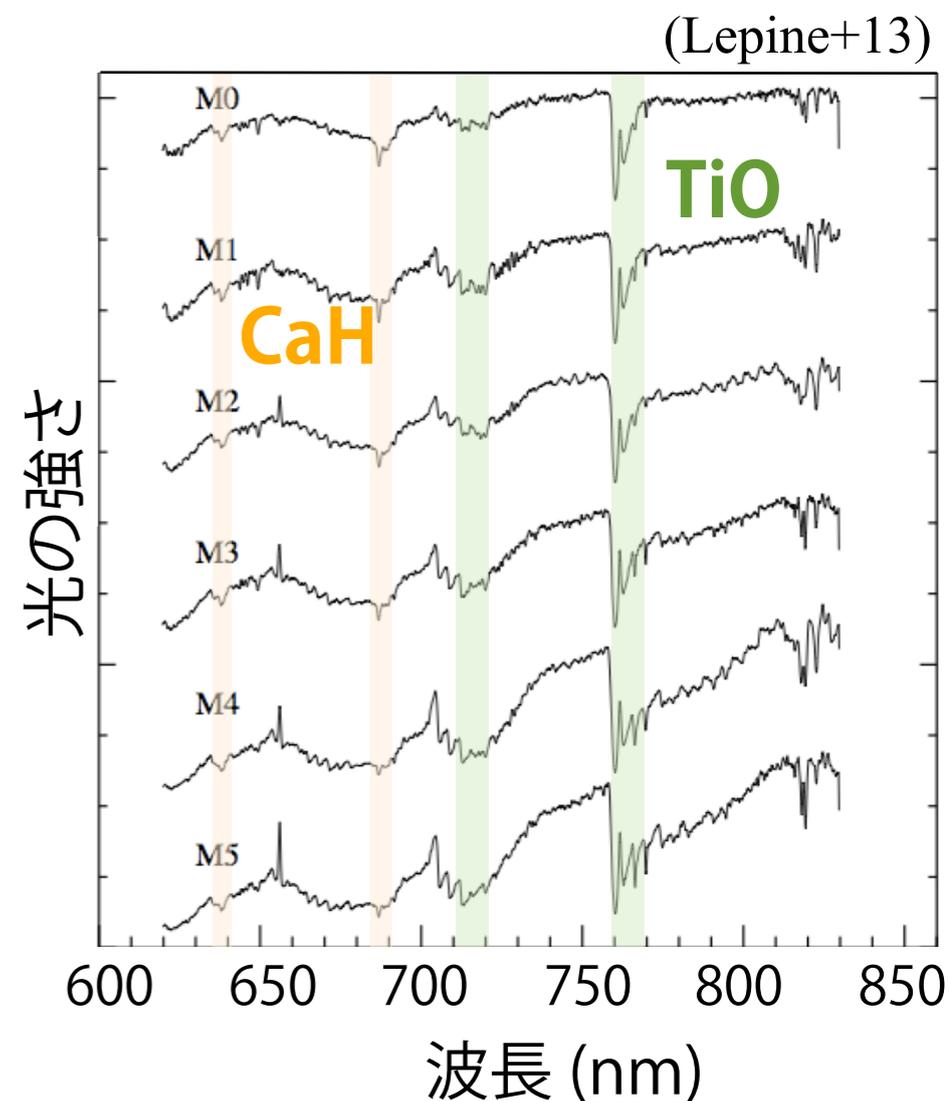
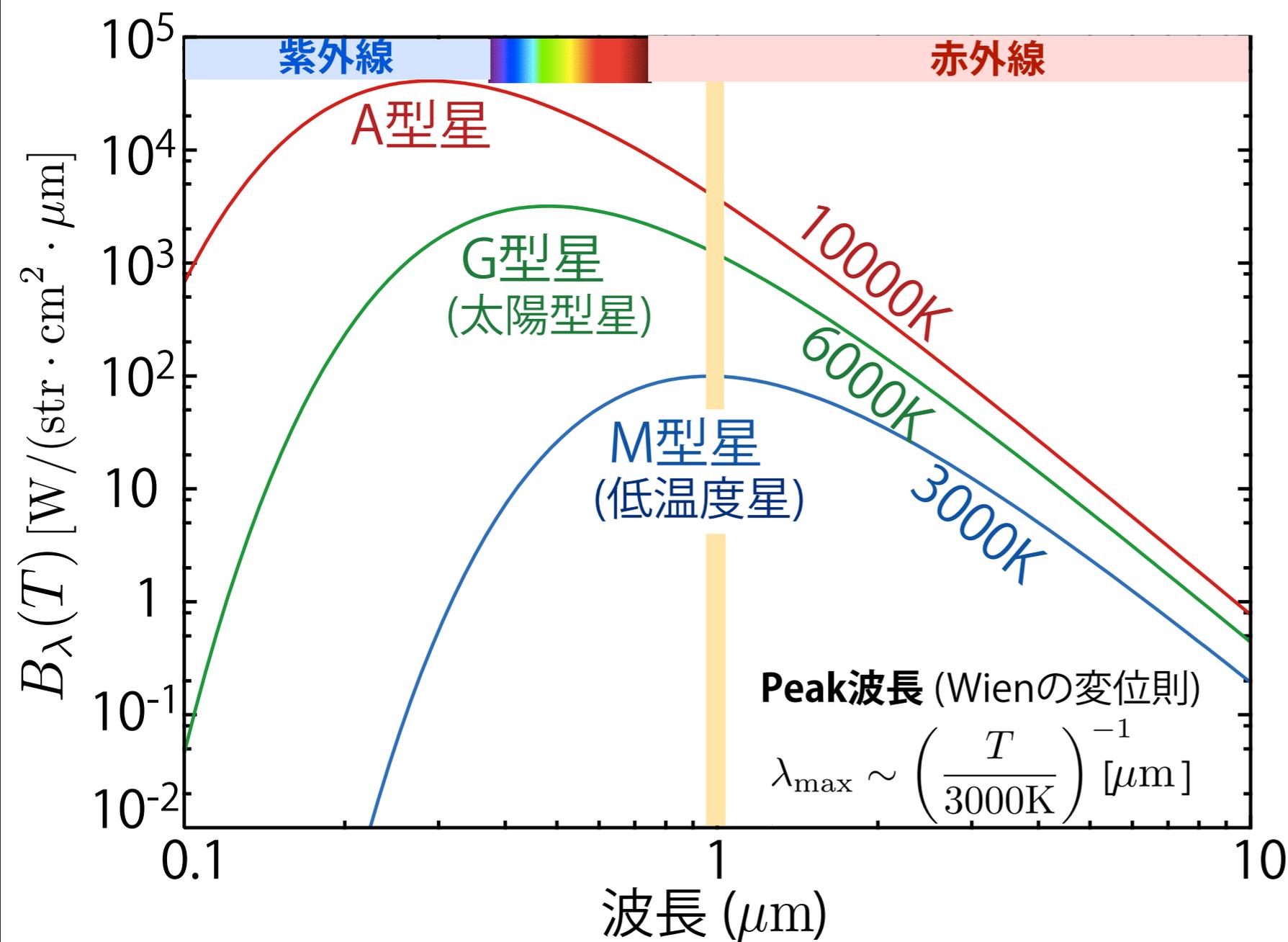
低温度星とは...

低温度星とは？ ※ **TiO**, **CaH** (VO)の吸収線 --- **M型星**と分類

0.08倍-0.5(0.7)倍の太陽質量 (低質量星)

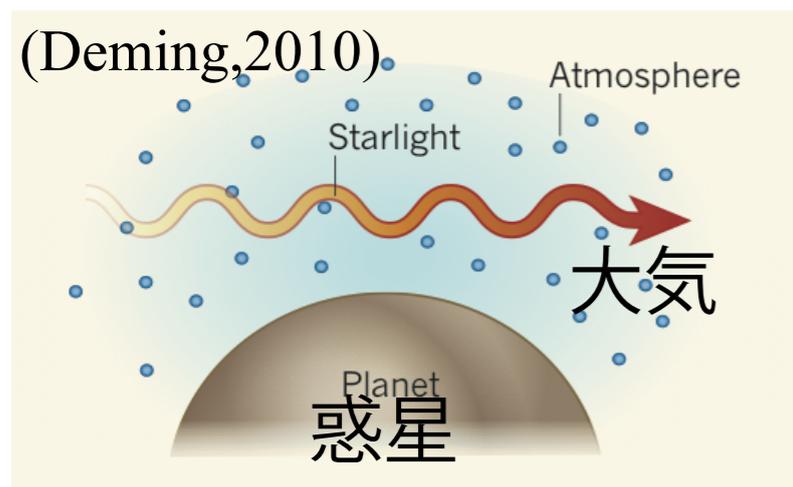
有効表面温度 **2000-3800K** (低温度星)

→ **冷たく, 暗く, 小さな星**



透過スペクトルで見えるhot Neptuneの大気

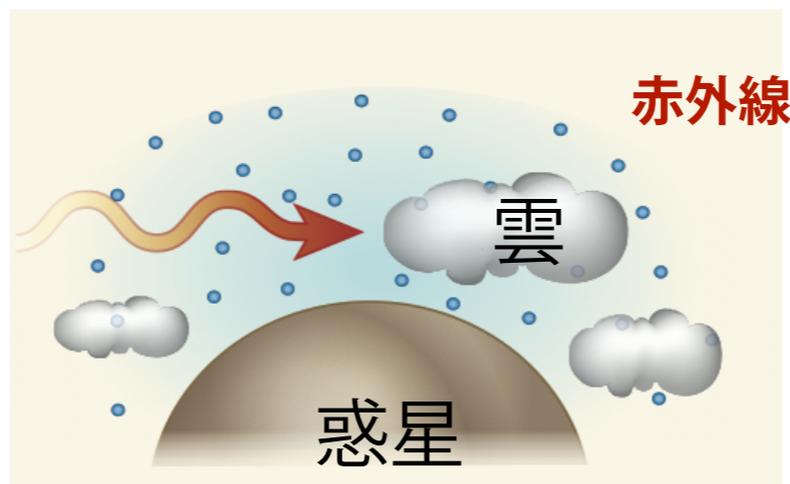
(1) **low μ (H₂-rich)**な大気



(可視光域) **Rayleigh散乱**

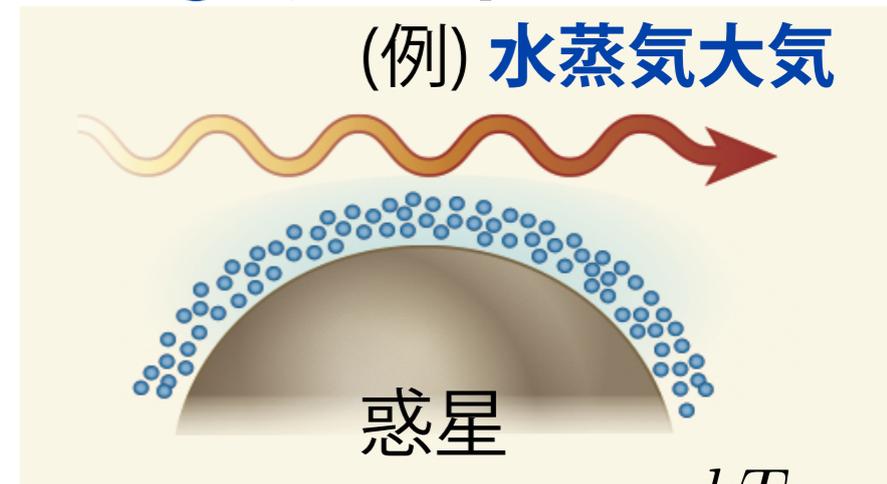
※ 散乱断面積 $\propto 1/\lambda^4$

(2) **low μ (H₂-rich) + 雲**

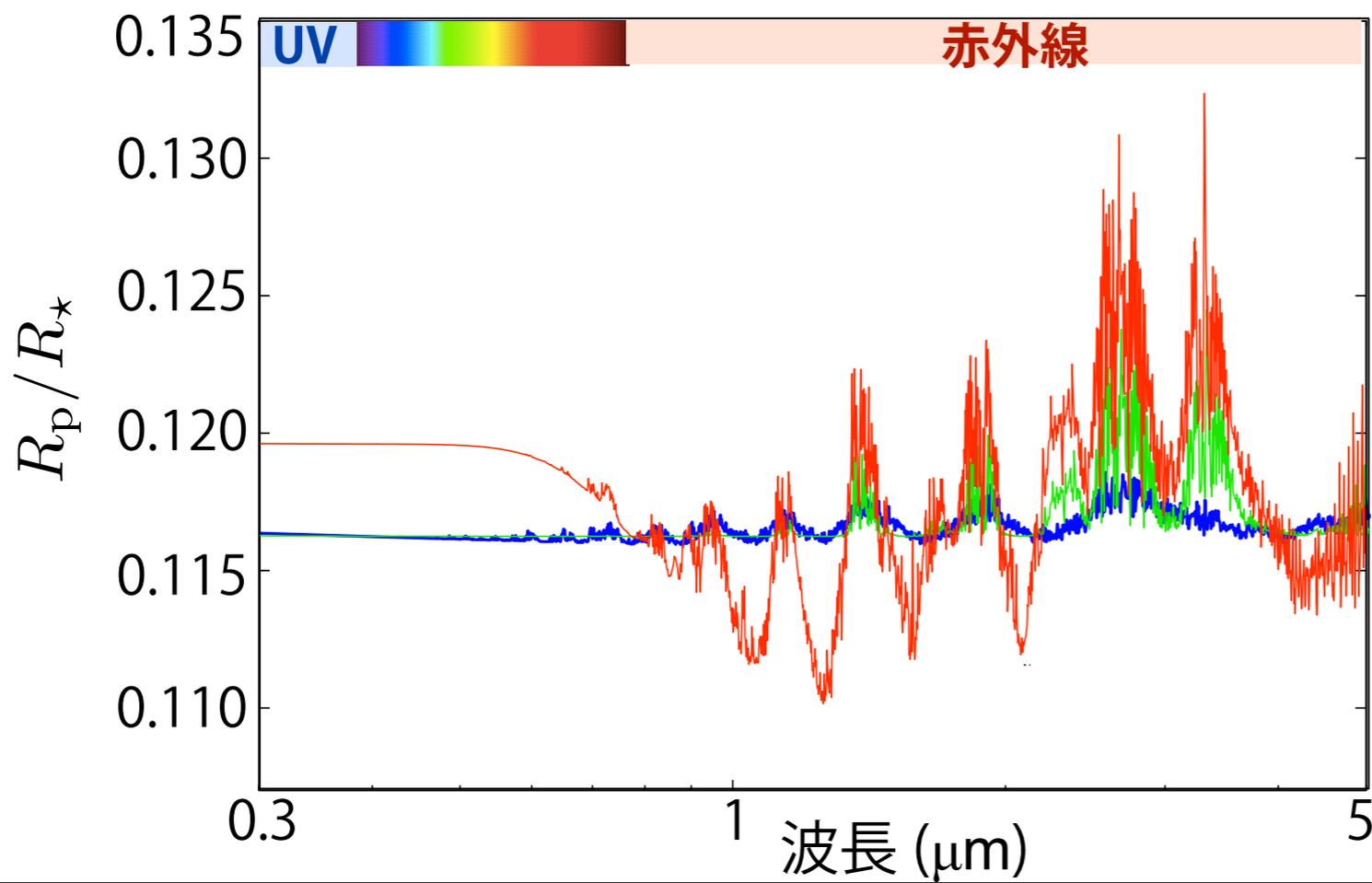


吸収線の特徴：**弱められる**

(3) **high μ (H₂-poor)**な大気



大気の厚み $\downarrow H = \frac{kT}{\mu g}$
平坦な吸収スペクトル



Howe & Burrows (2012)モデル

太陽組成 w/ 0.1 μ m tholin

太陽組成 w/ 雲

H₂Oリッチ大気 (H₂O 1%, N₂ 99%)

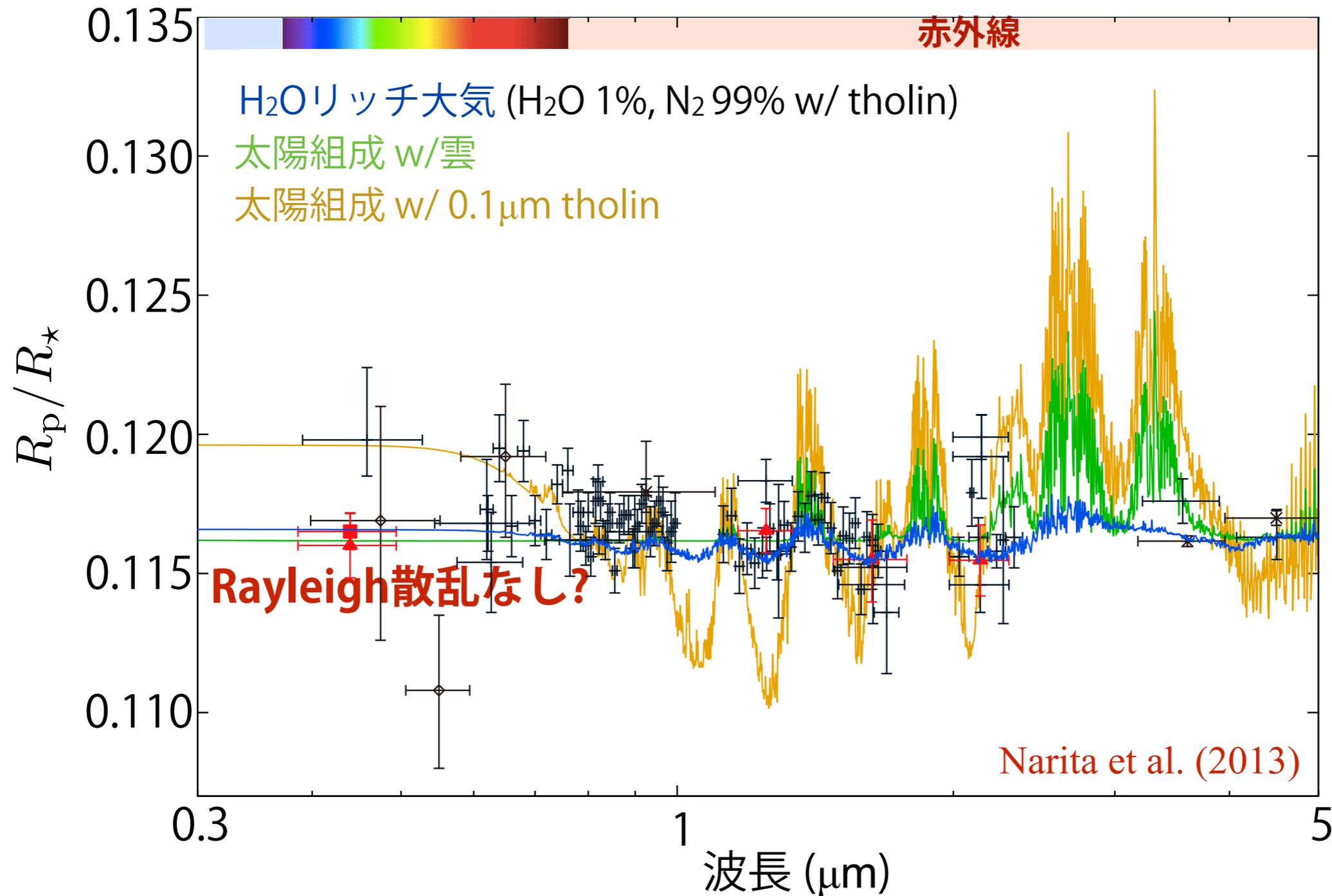
※ 平衡温度 (500-1000K) (Morley+12;13)

KCl, ZnS, Na₂Sの雲生成

(cf) より高温: MnS, Cr, MgSiO₃, Fe

GJ1214bの多波長同時測光観測と大気組成

(Bean+10;11;Desert+11;Croll+11;Crossfield+11;
Berta+11;12;de Mooji+12;13;Fraine+13;Teske+13;Narita+12;13)



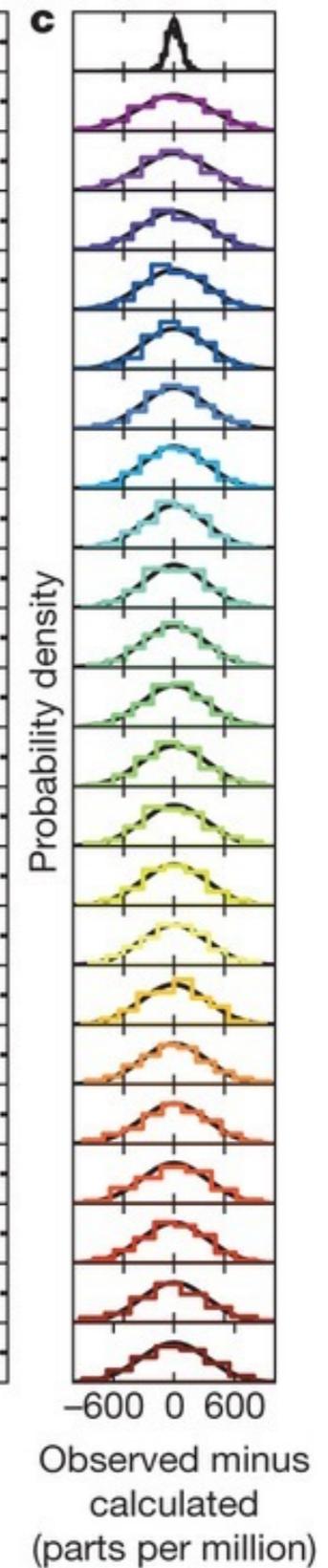
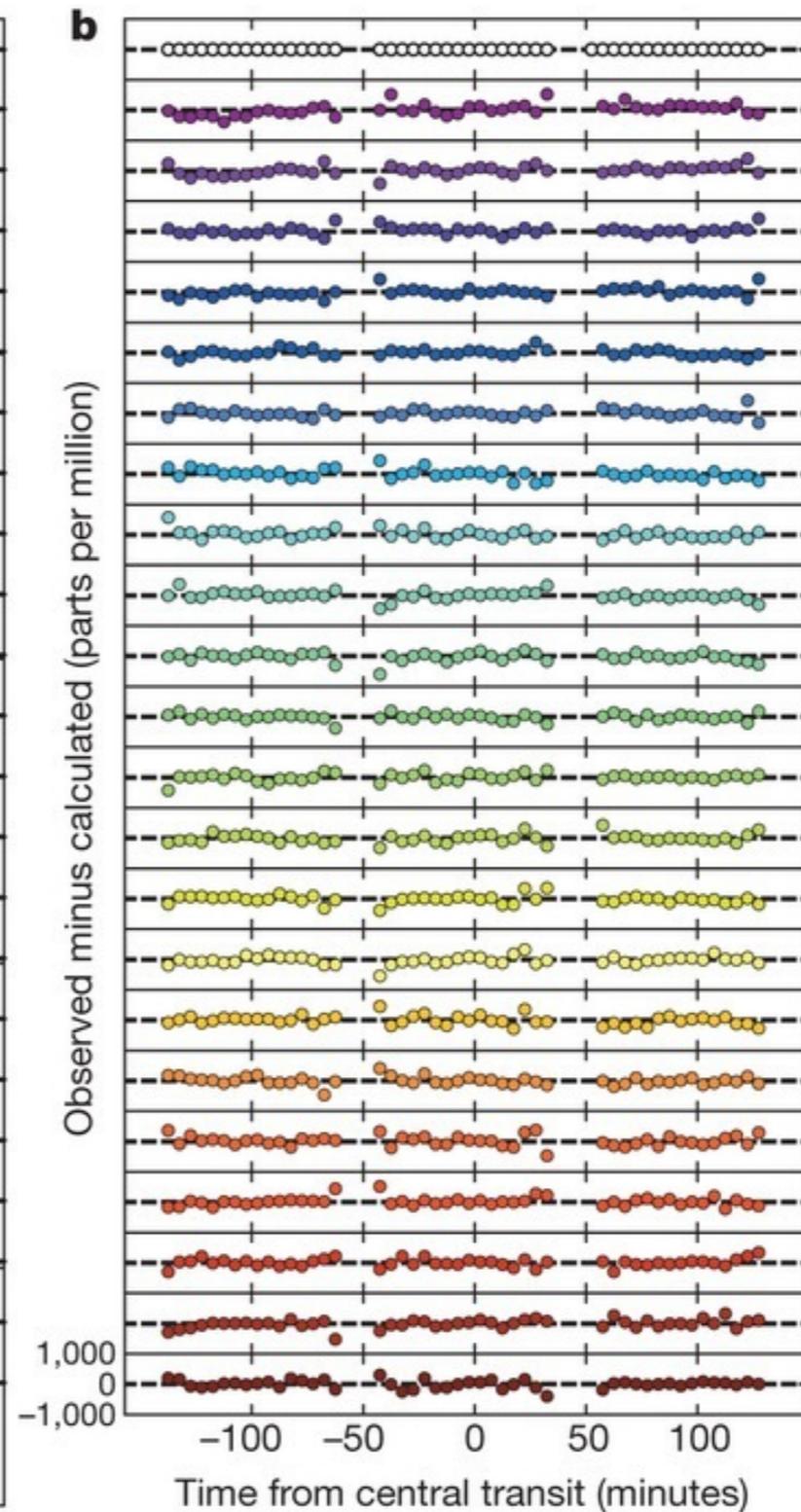
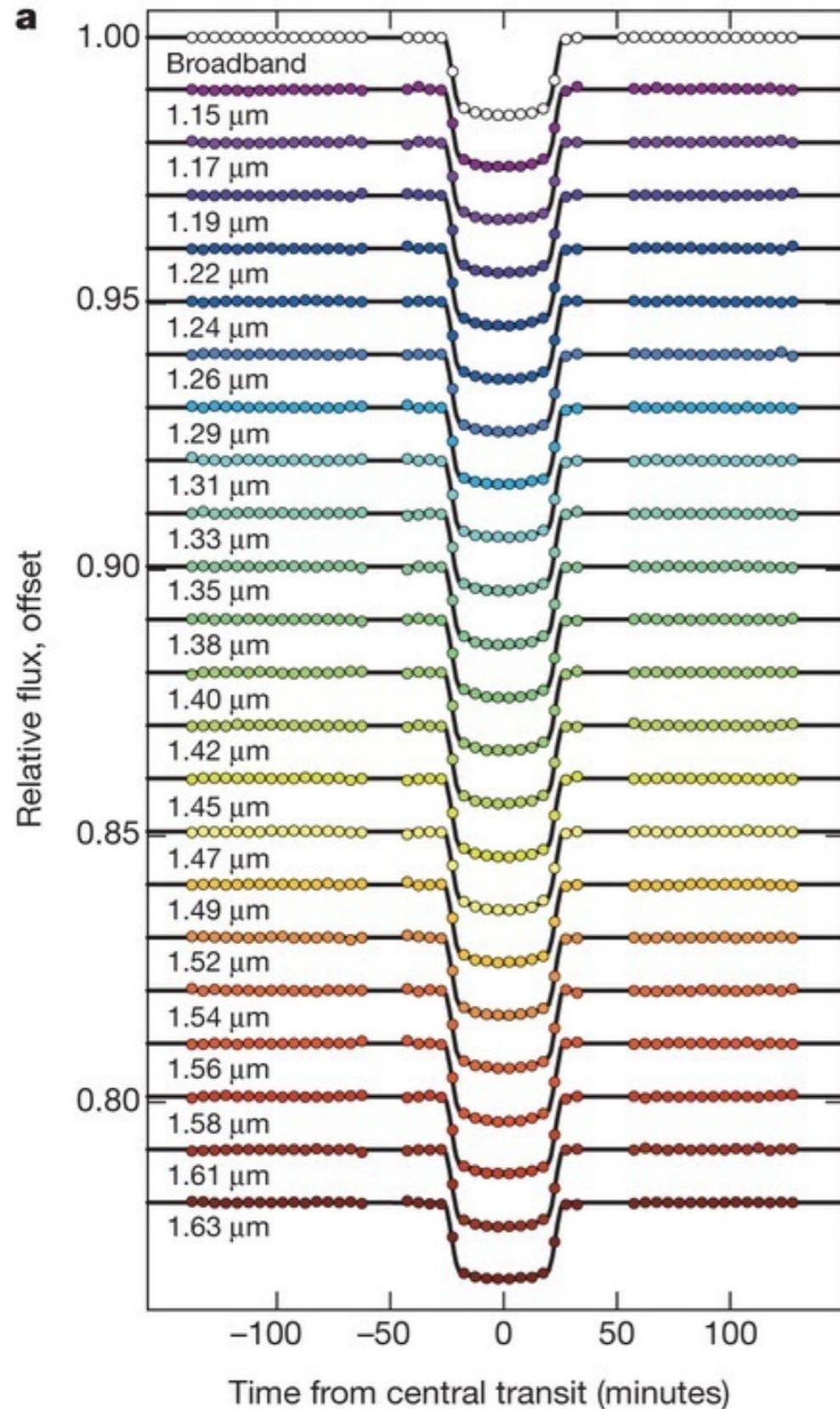
GJ 1214bは **水蒸気リッチな大気**を持つ可能性が高い

(cf) GJ1214b内部構造: 水マントルあり?

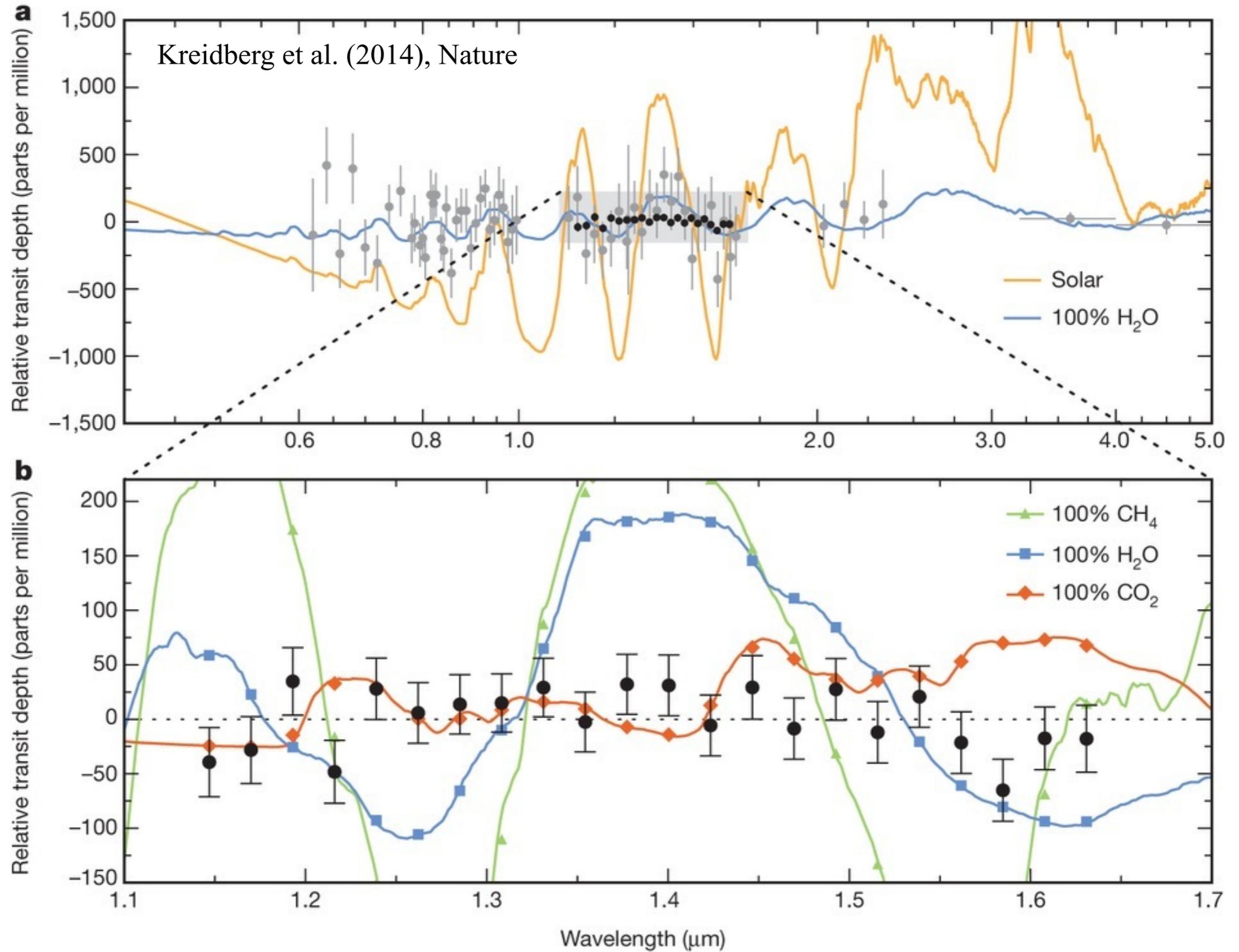
(Nettelmann et al.2011; Valencia et al. 2013)

HST (WFC)によるGJ1214bの多波長NIR測光観測

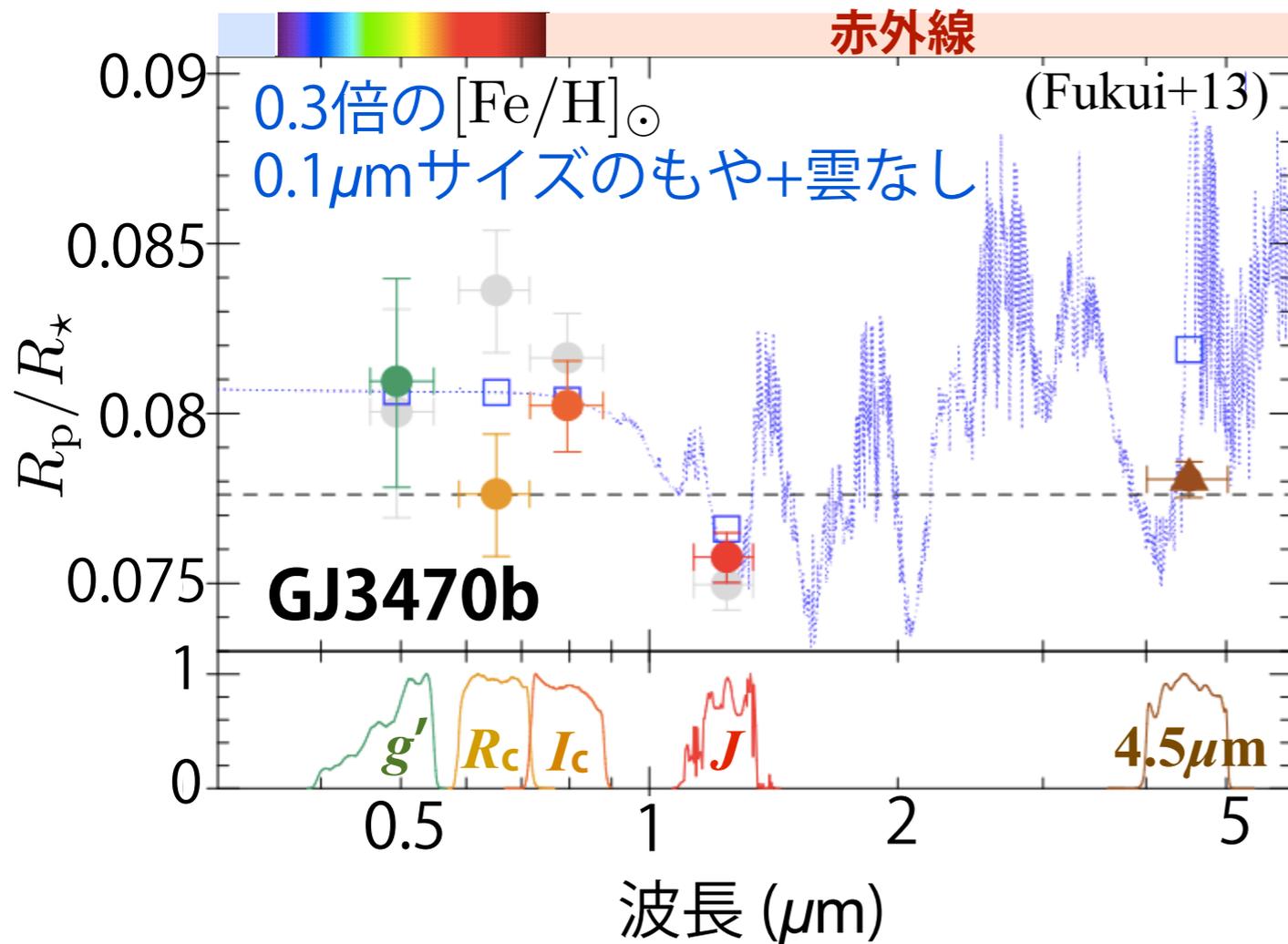
Kreidberg et al. (2014), Nature



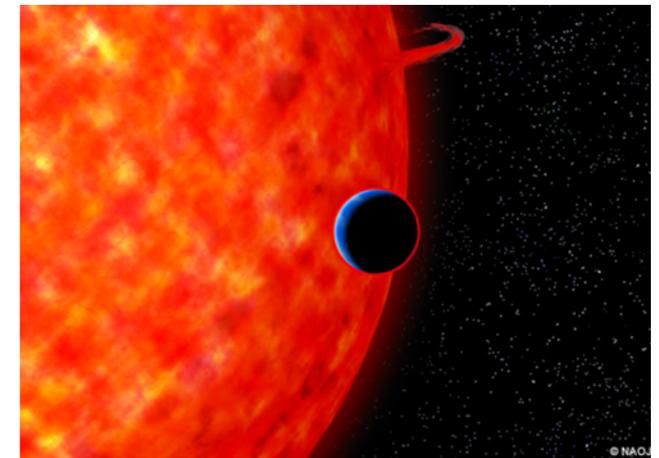
HST (WFC)によるGJ1214bの多波長NIR測光観測



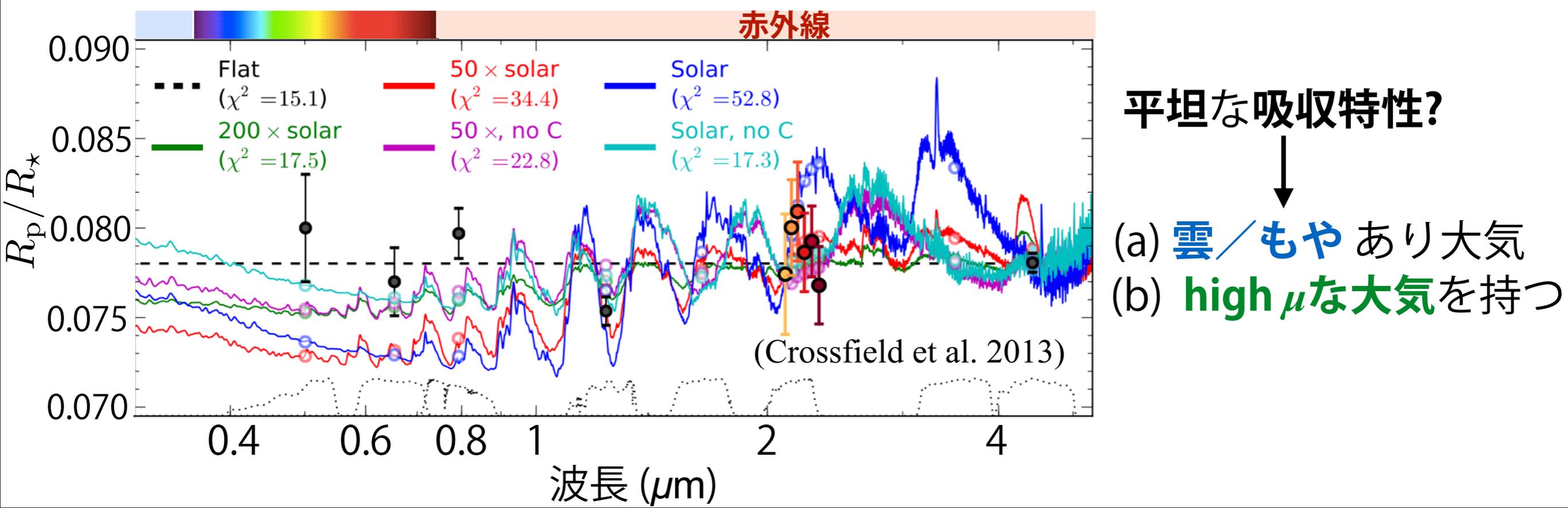
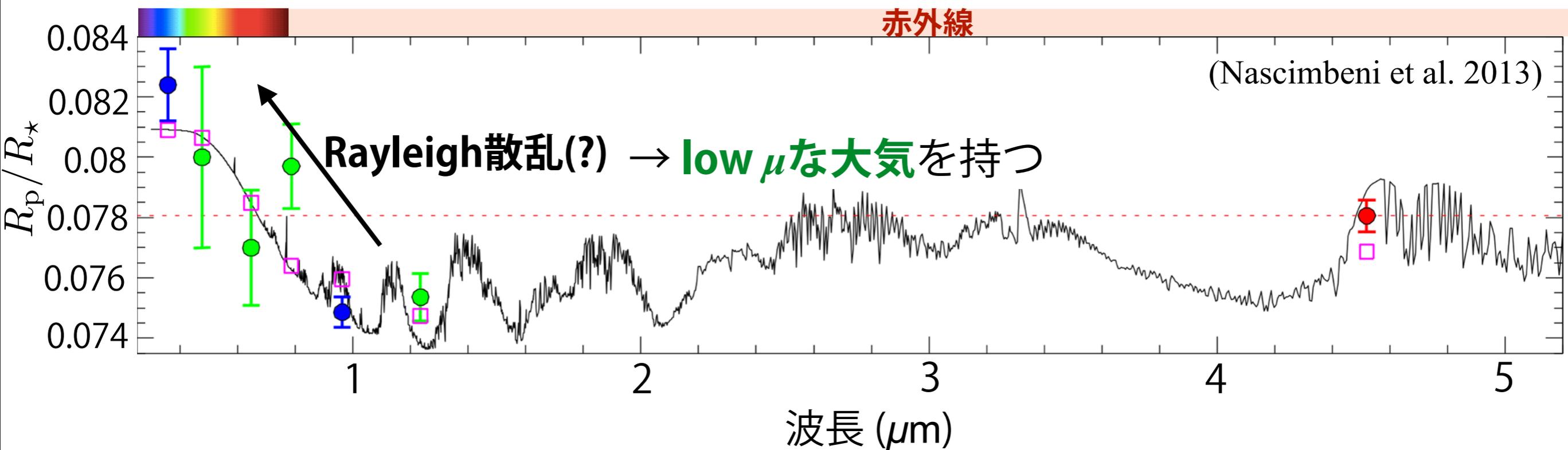
GJ3470bの多波長同時測光観測



分厚い雲はない
10 wt%以下の H_2 -rich大気



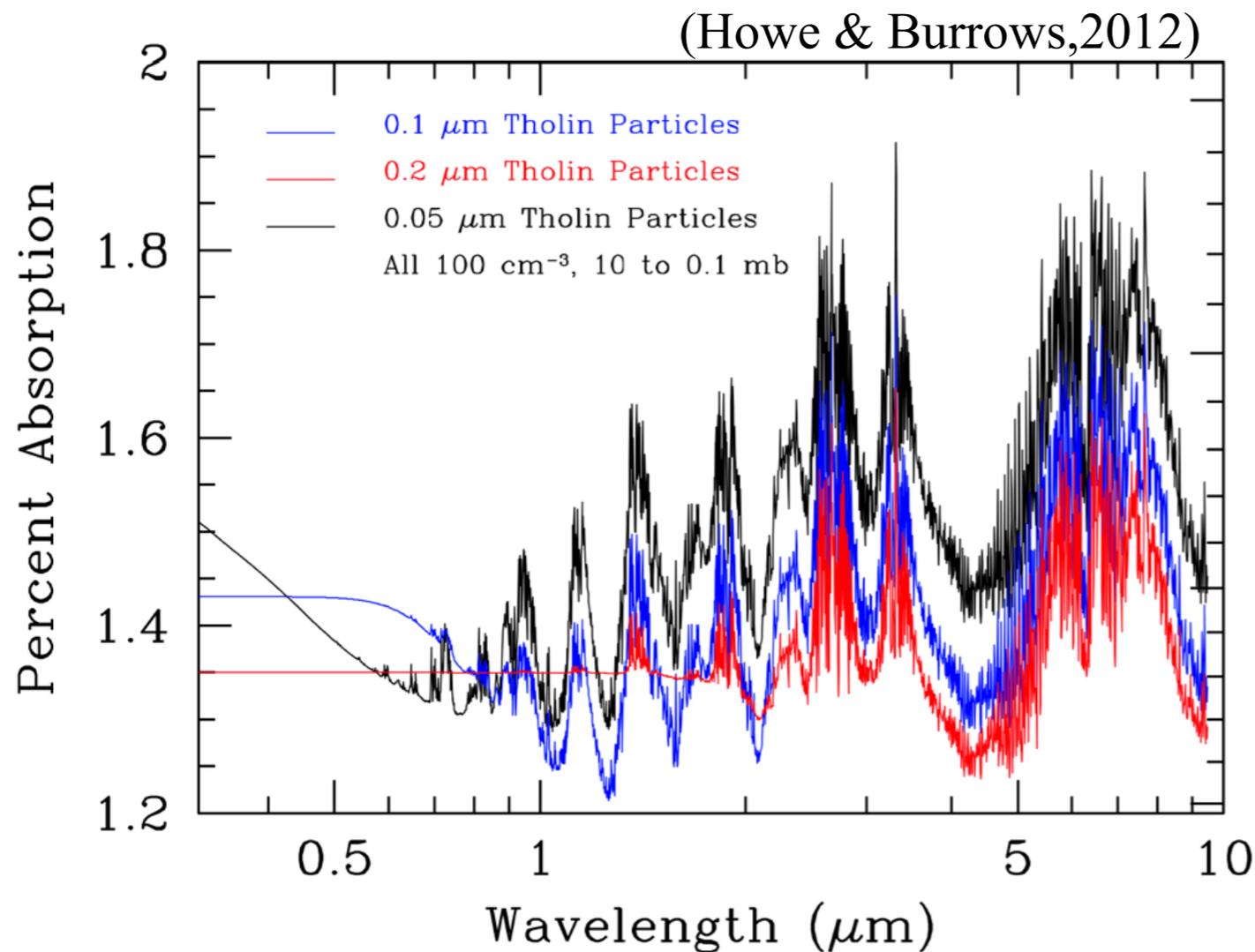
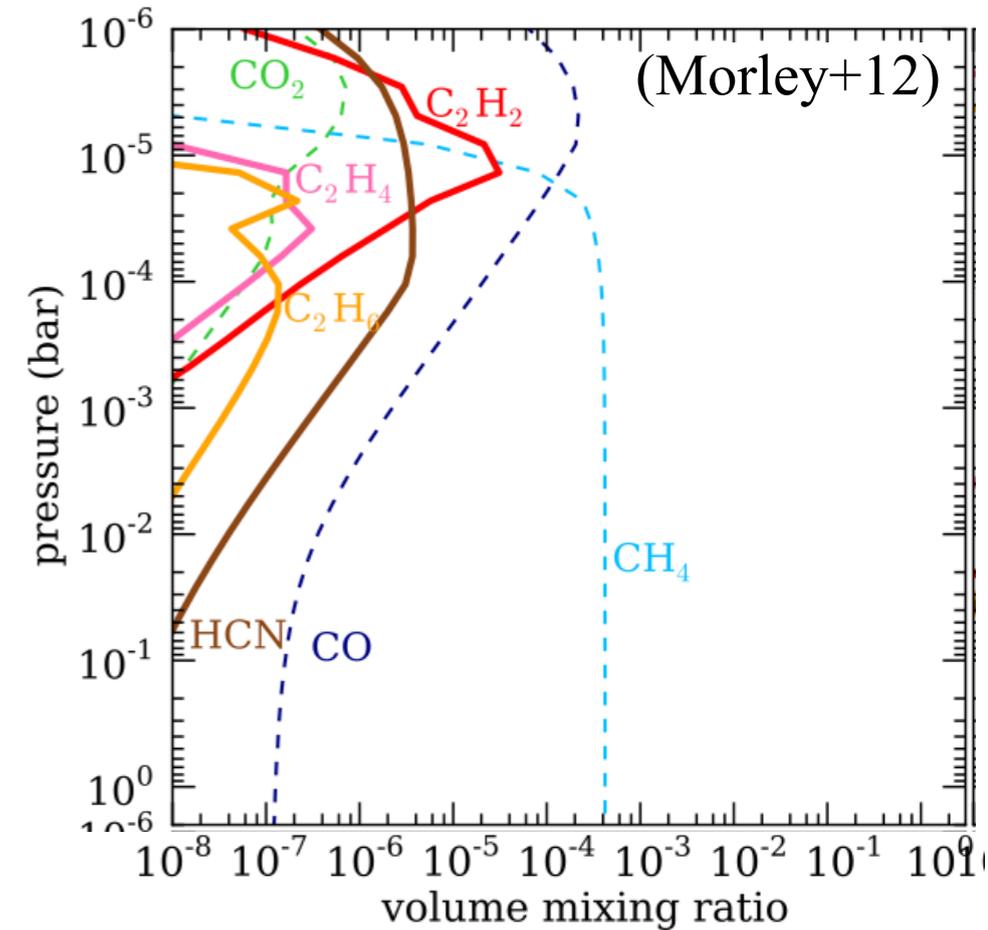
GJ 3470bの多波長測光観測と大気組成



Hot Neptune大気のhaze生成

もや(炭化水素haze or soot → **tholin**と総称)
→ C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, HCN etc 生成

大気上層(P ≦ 1mbar)でのUVによるCH₄光分解
CH₄ ⇌ CO (主に、T < 1000KでCH₄安定)

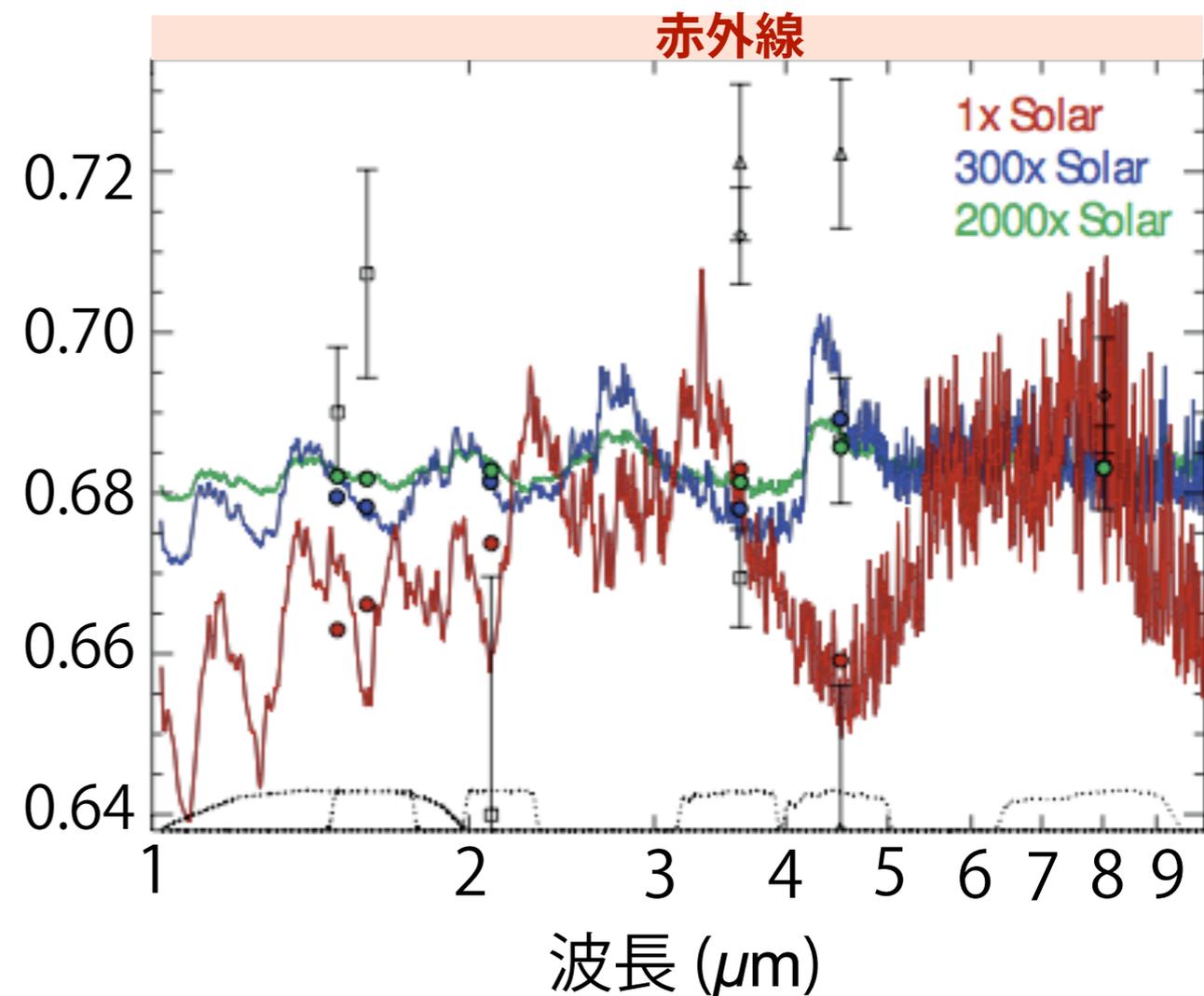
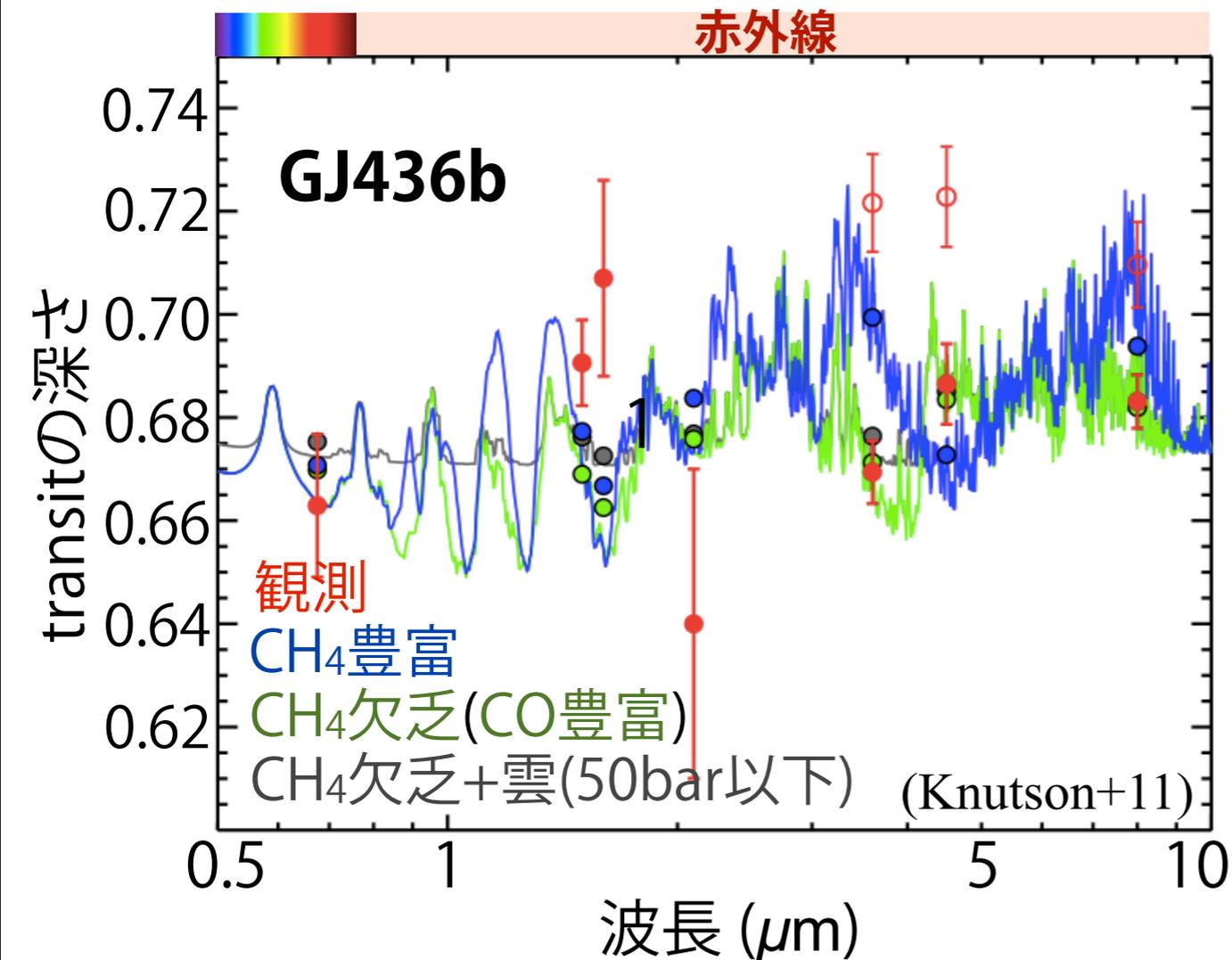


惑星の大気スペクトル

- (1) CH₄ 欠乏の有無
- (2) haze粒子によるRayleigh散乱
(但し、粒子サイズ依存)

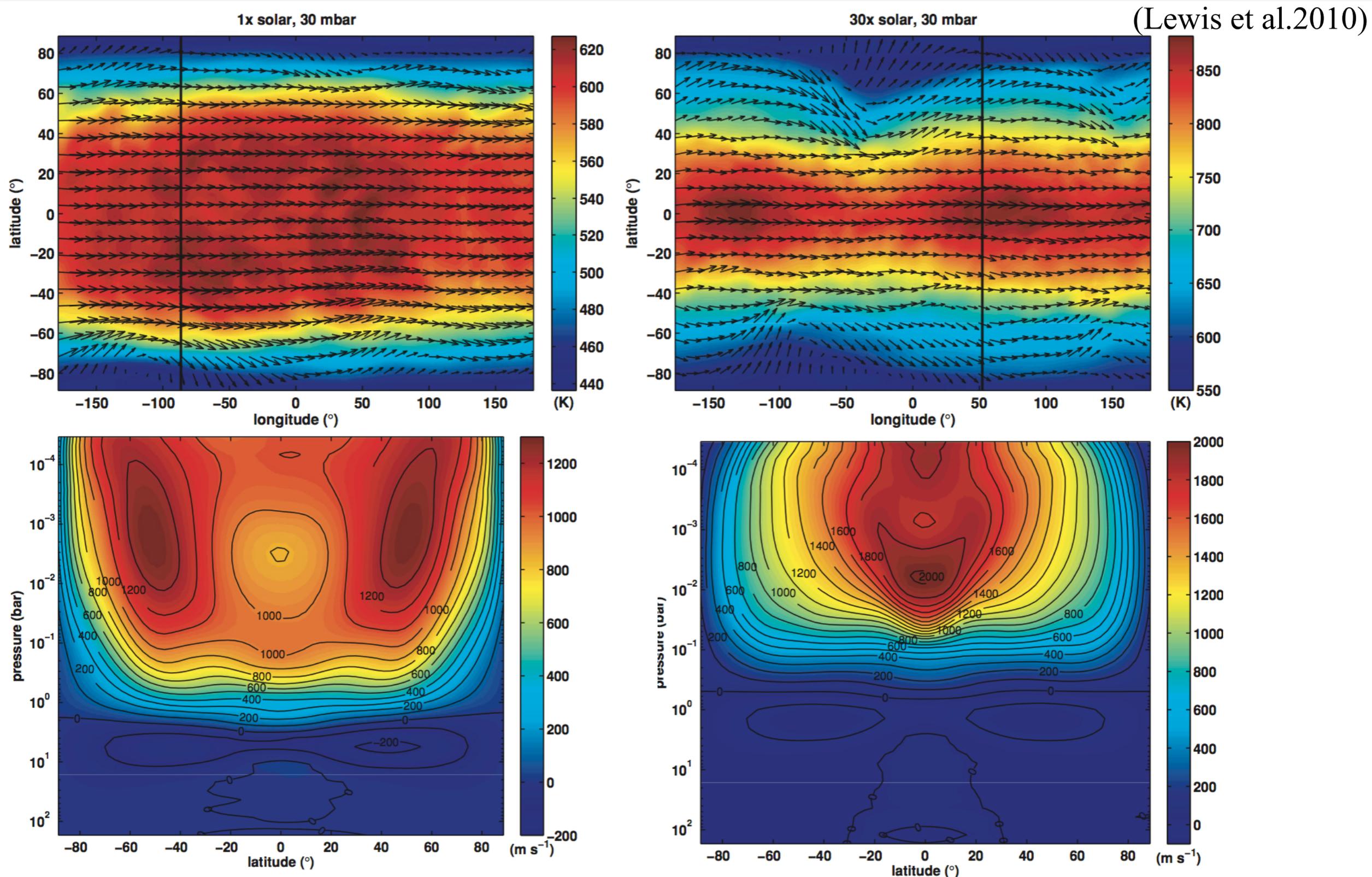
hazeサイズ
haze生成率とUV fluxの関係

eccentricなhot Neptune, GJ 436b



- (1) J-band付近 : **CH₄-poor, richの有無**
- (2) 可視光域の**強い分子吸収** : **高い[Fe/H]**かどうか
- (3) 可視光域の**Rayleigh散乱** : **haze**(光化学) / **雲**の有無

GJ 436bの3D大気循環：Jetと温度分布

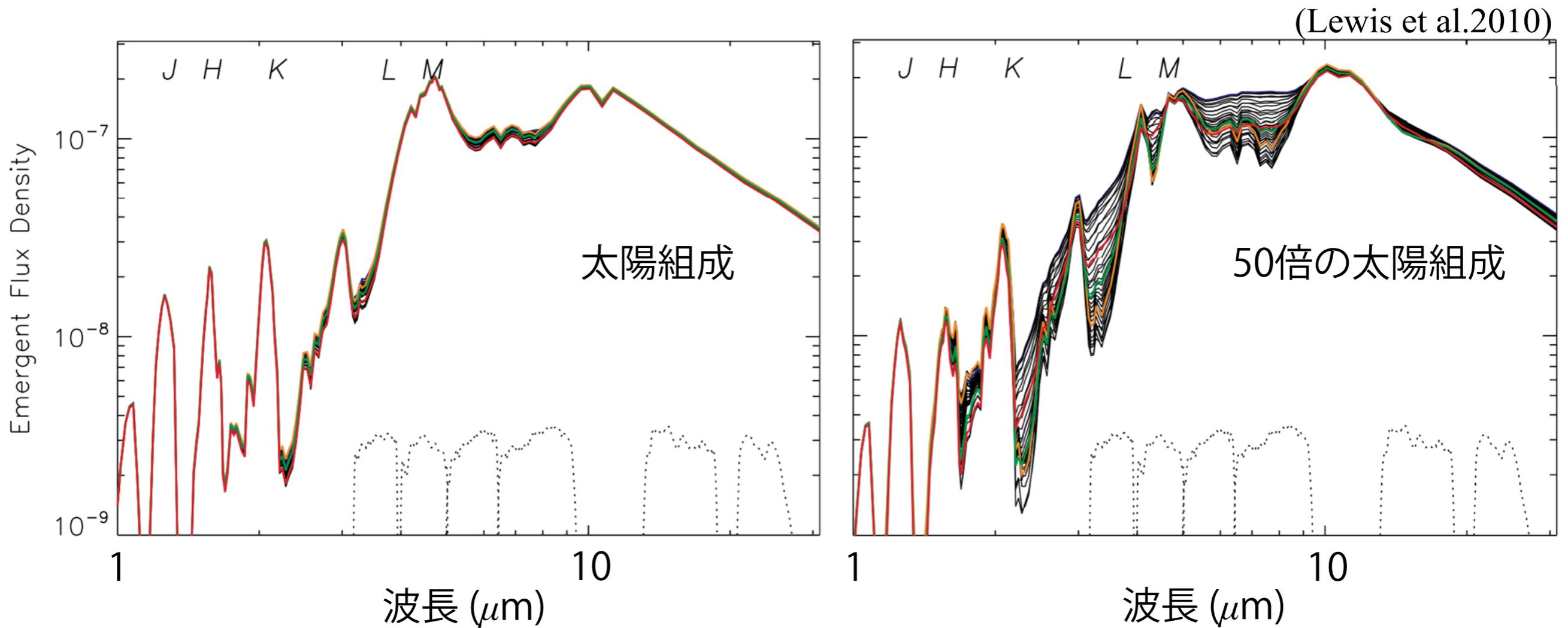


※ GJ1214bの場合 (Menou, 2012)

※ 地球likeな潮汐固定された惑星の場合 (Joshi+97, Joshi,03; Edson+11;Merlis & Schneider, 2010)

GJ 436bのMIR観測：Fluxの位相変化

- 高い $[Fe/H]$: (a) 赤道面付近はより **高温**
(b) **東向き赤道方向に波状の高速ジェット**
(→ **位相毎で風速に大きな違い**)



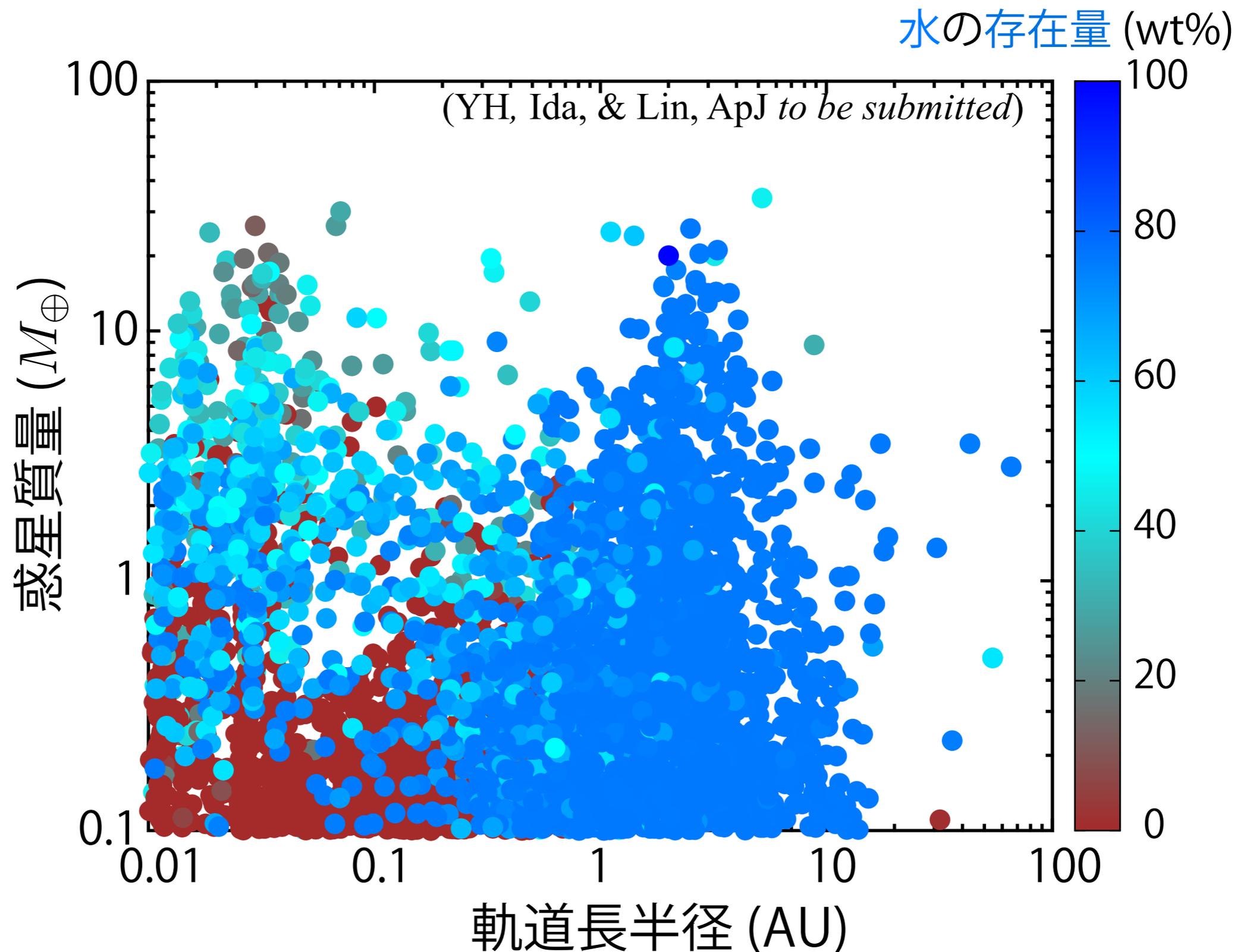
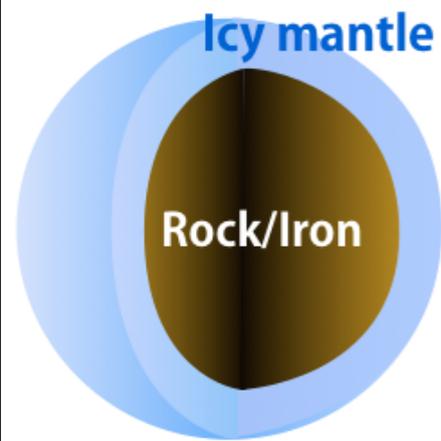
$[Fe/H]$ への制限

Secondary eclipse, transit
近点, 遠点

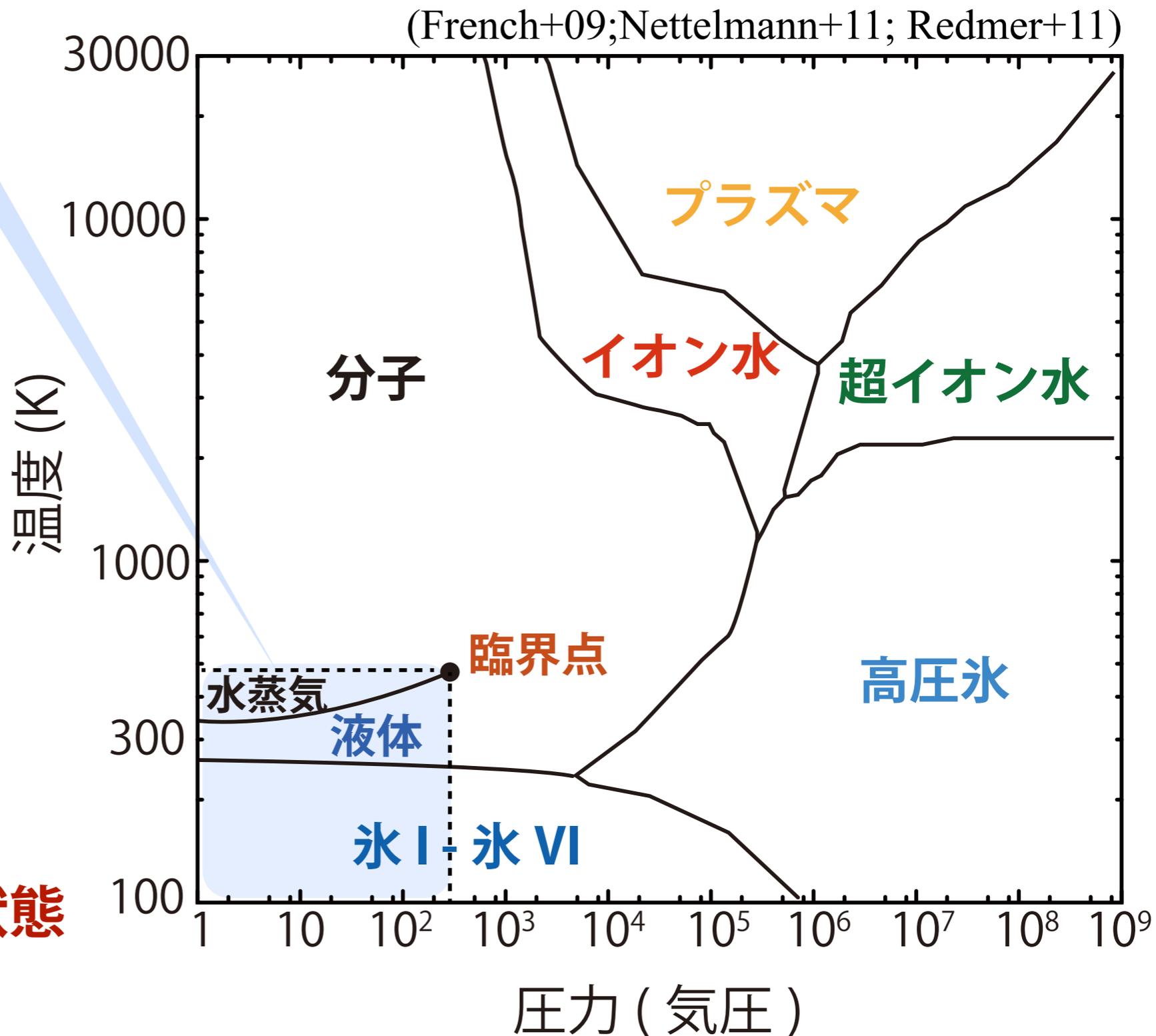
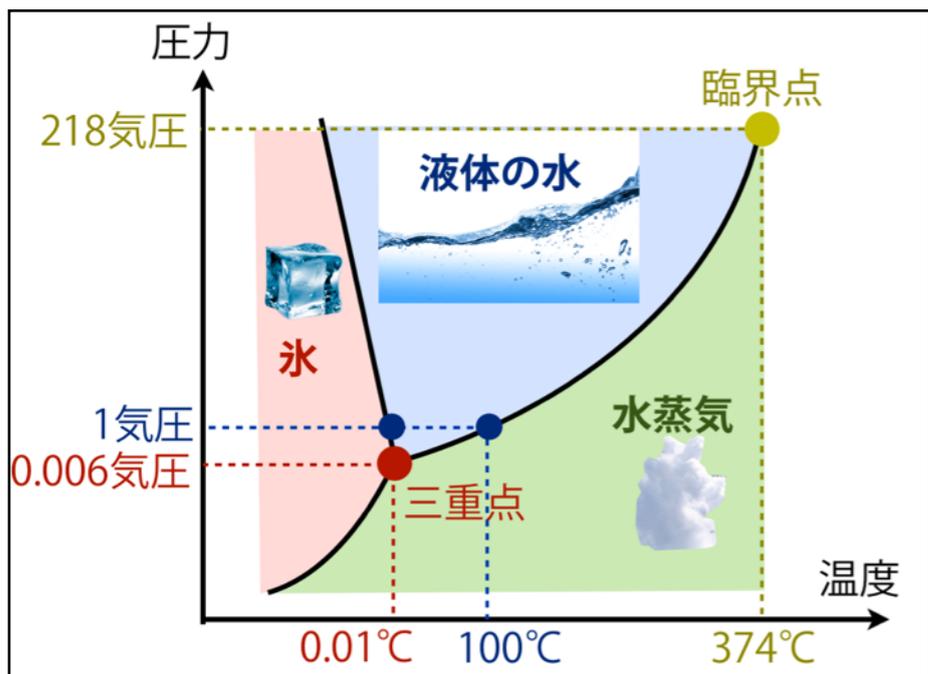
MIRで Fluxの位相変化観測

低温度星周りの Sub/Super-Earth : Water World

『30倍の地球質量以下の固体惑星(岩石/H₂O)』



高圧・高温下での水の状態図



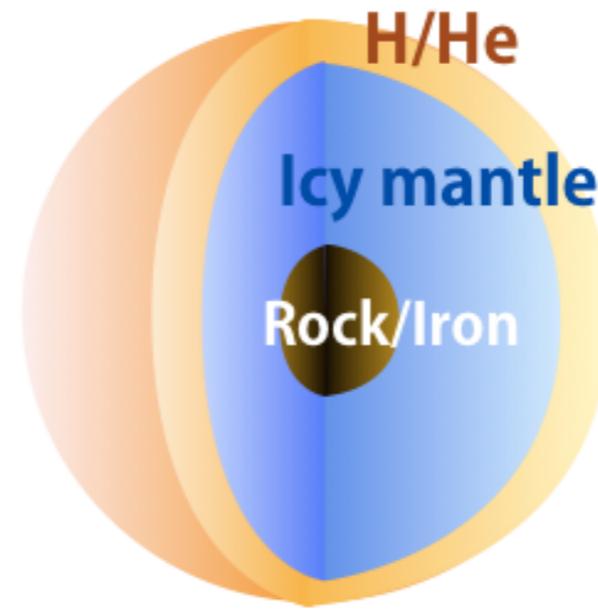
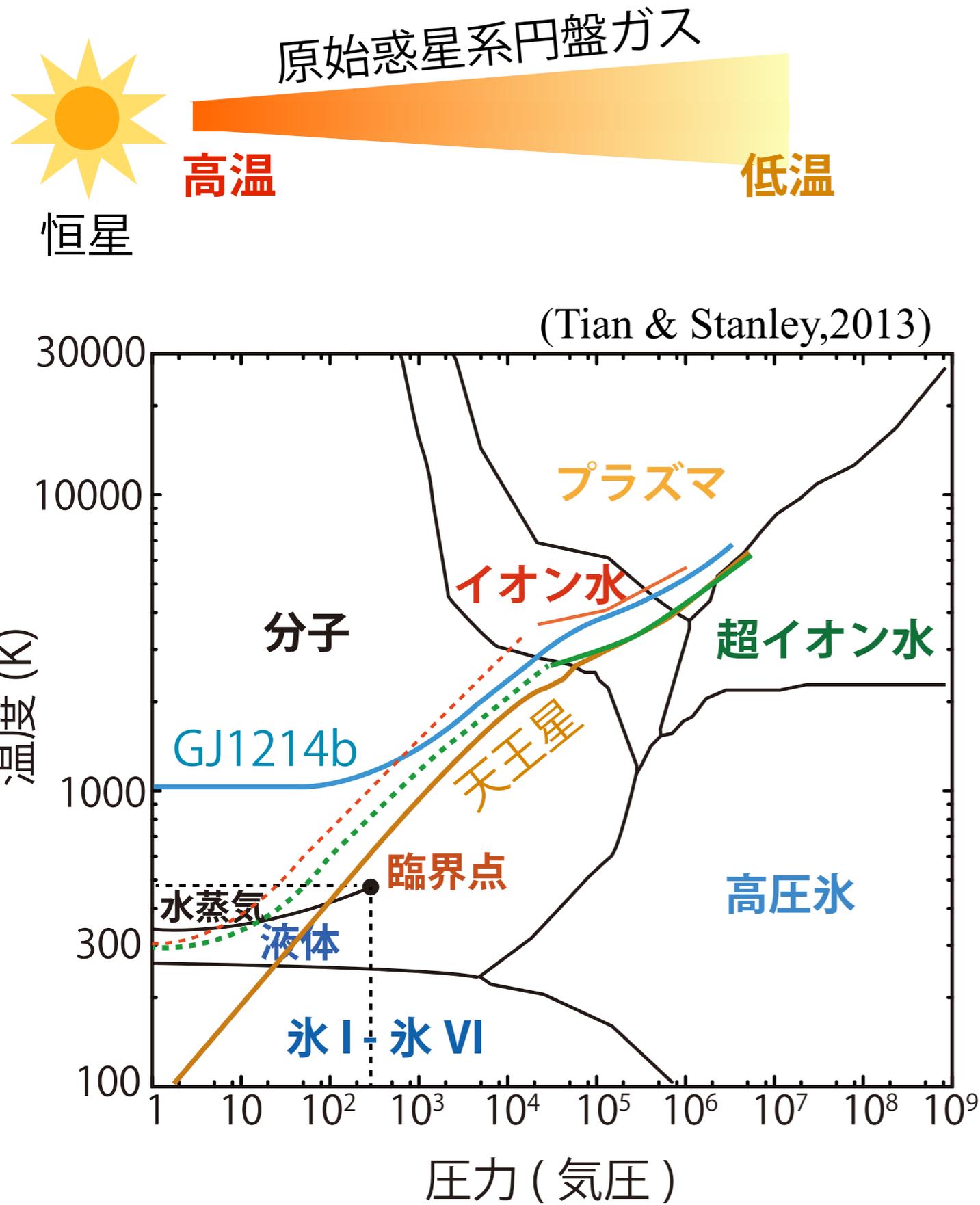
液体の水の存在条件

$P = 0.006-218$ 気圧

$T = 273.1-647$ K

惑星内部の水 ~ 超臨界状態

Super-Earth内部の水の状態は？



惑星の平衡温度 300K
(H/He大気 0.1wt%)

3倍の地球質量
10倍の地球質量

液体の水を育む惑星：生命居住可能な惑星



『表面に液体の水を保持』 --- 生命居住可能な惑星
(habitable planet)

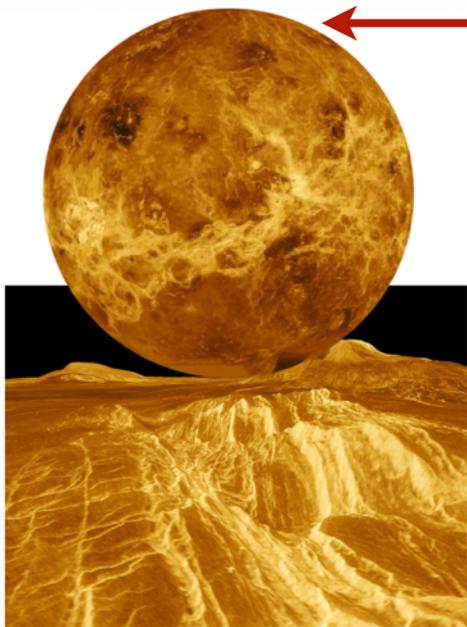
- (1) 恒星からの適度な距離
- (2) 適度な温室効果

■ **habitable zone** (Goldilocks zone)

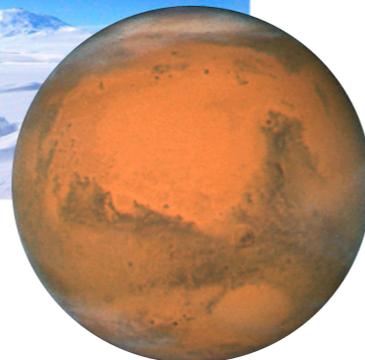
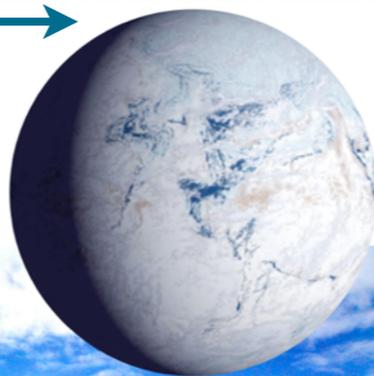
(Kasting+93; Selsis+07; Kopparapu+13)

(例) 太陽系

暴走温室状態



CO₂凝縮 (全球凍結)

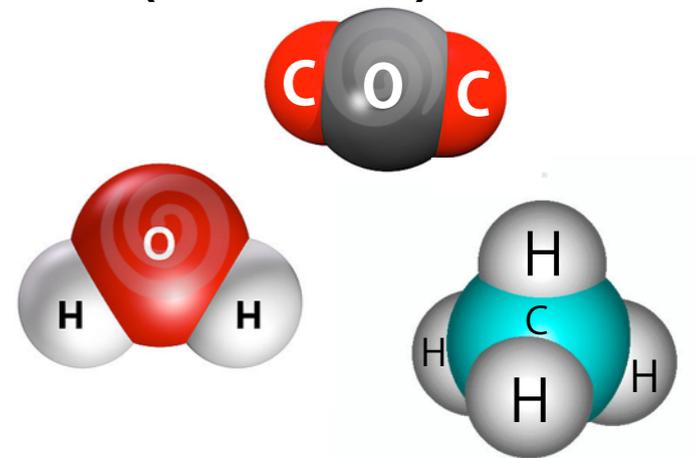


温室効果ガス

H₂O (水蒸気)

CO₂ (二酸化炭素)

CH₄ (メタン)



※ H₂-H₂ 衝突誘起吸収

(Pierrehumbert & Gaidos 2011;
Wordsworth, 2012)

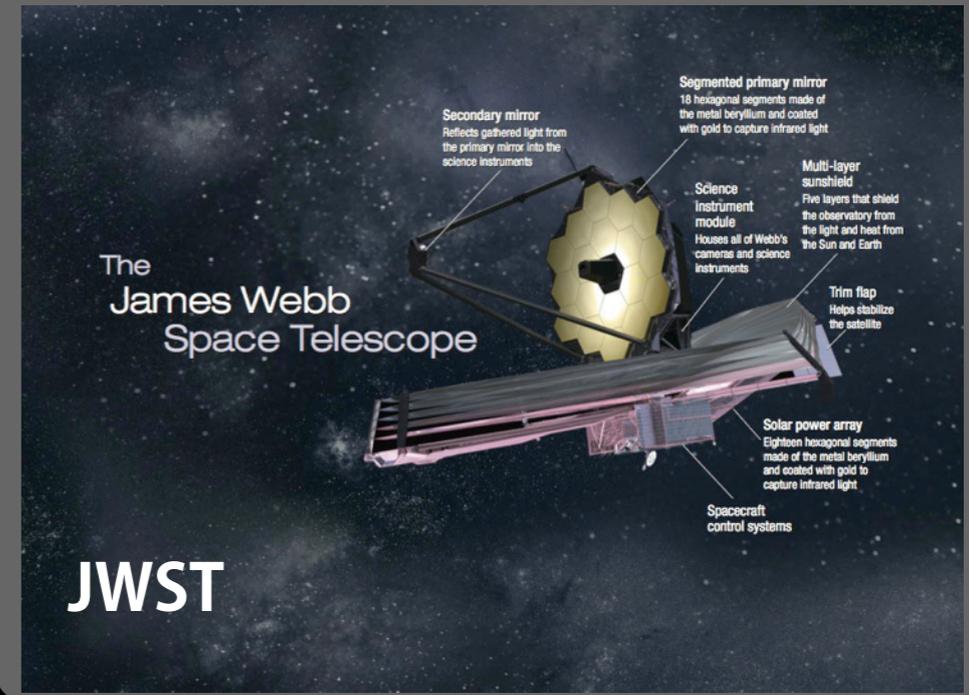
低温度星周りの宇宙望遠鏡 将来計画

30cm 望遠鏡 (可視光・近赤外)
2017 打ち上げ (Bern Univ.)

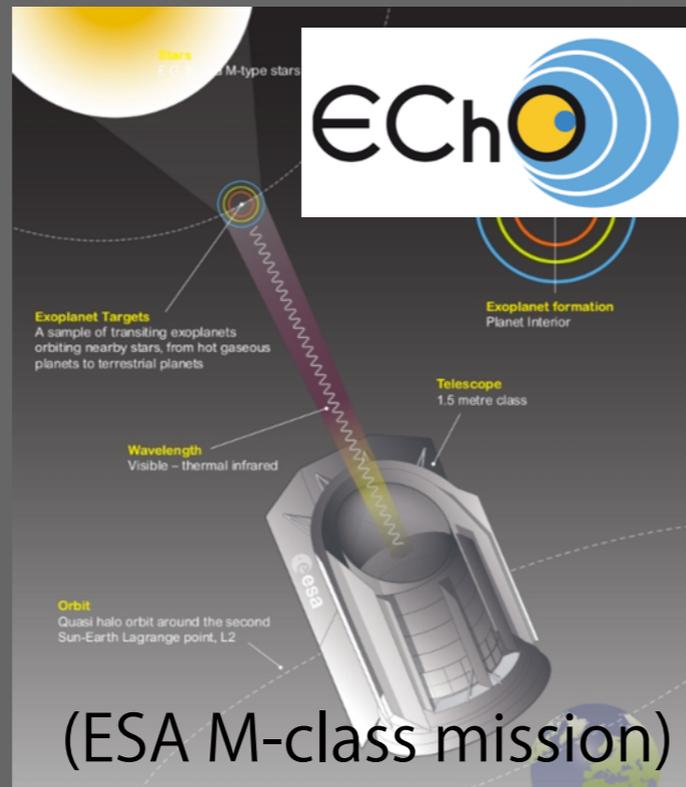


4x望遠鏡 (可視・近赤外)
2017 打ち上げ (MIT)
TESS

6.5m 宇宙望遠鏡 (赤外線観測)
2018 打ち上げ? (NASA)



1.2m 望遠鏡(可視-中間赤外)
2022 打ち上げ?
(Max-Planck Institute)



3.5m望遠鏡 (中間赤外線)
2022 打ち上げ? (JAXA)



ご清聴ありがとうございました