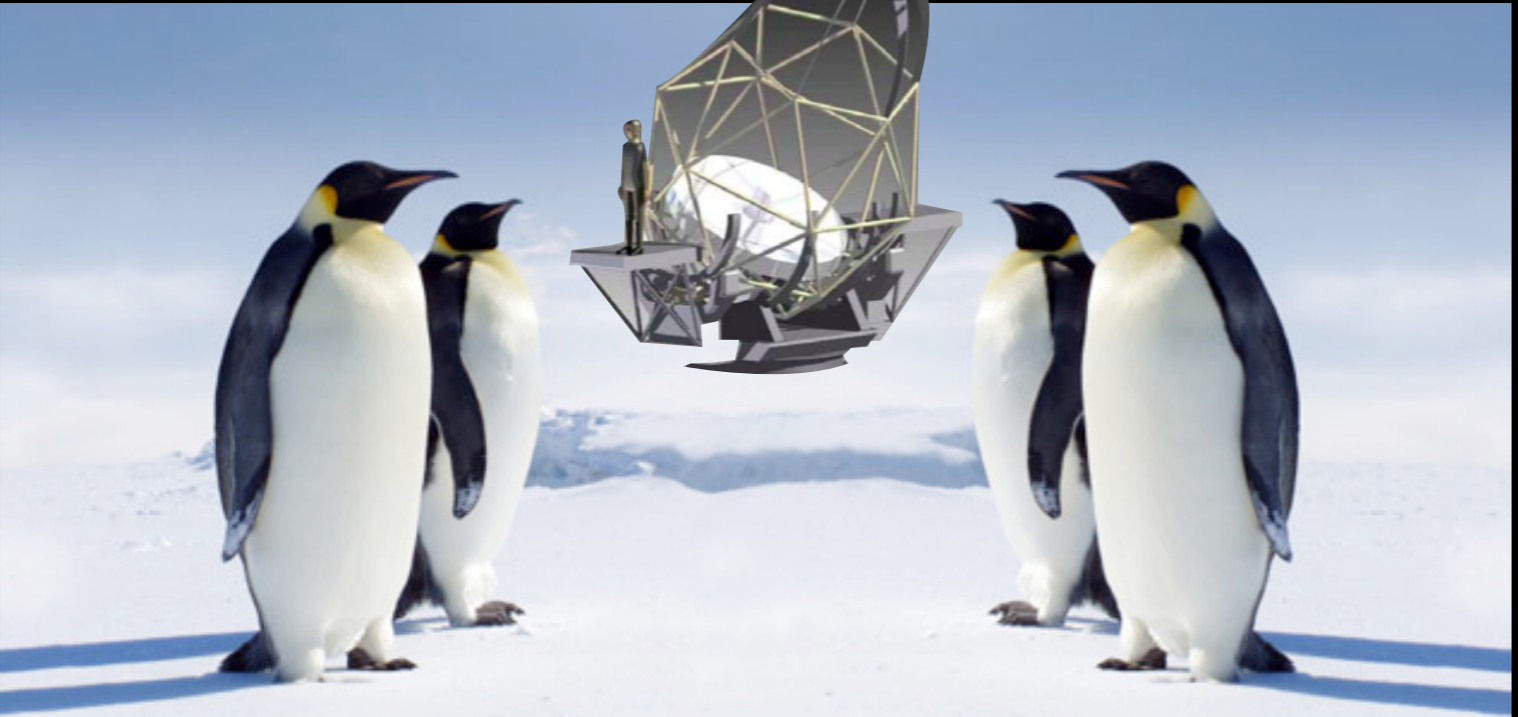
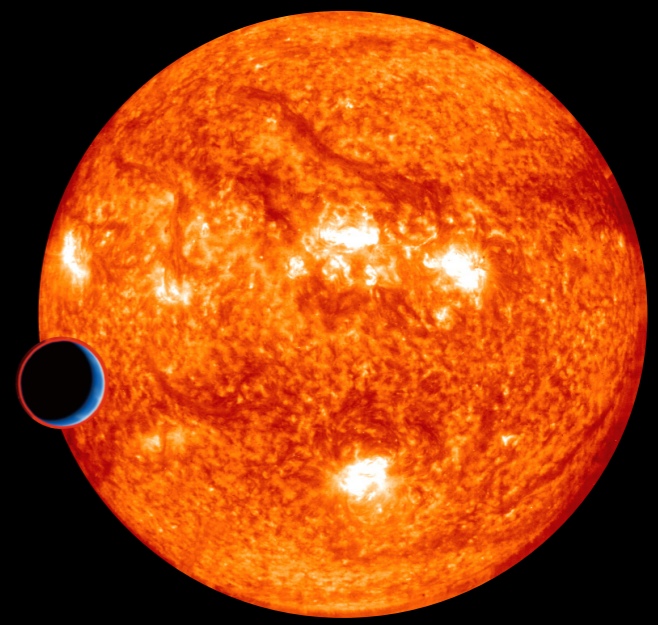
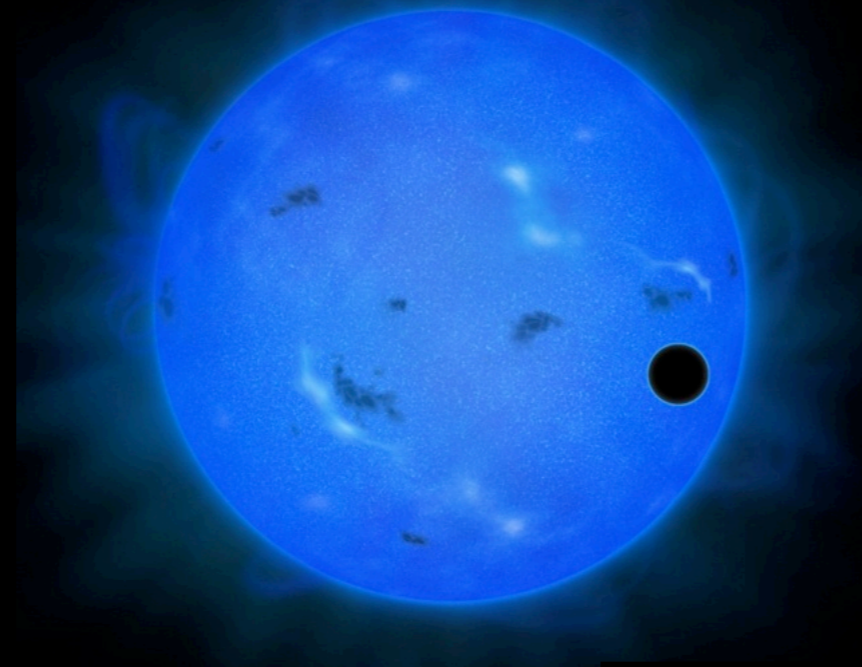
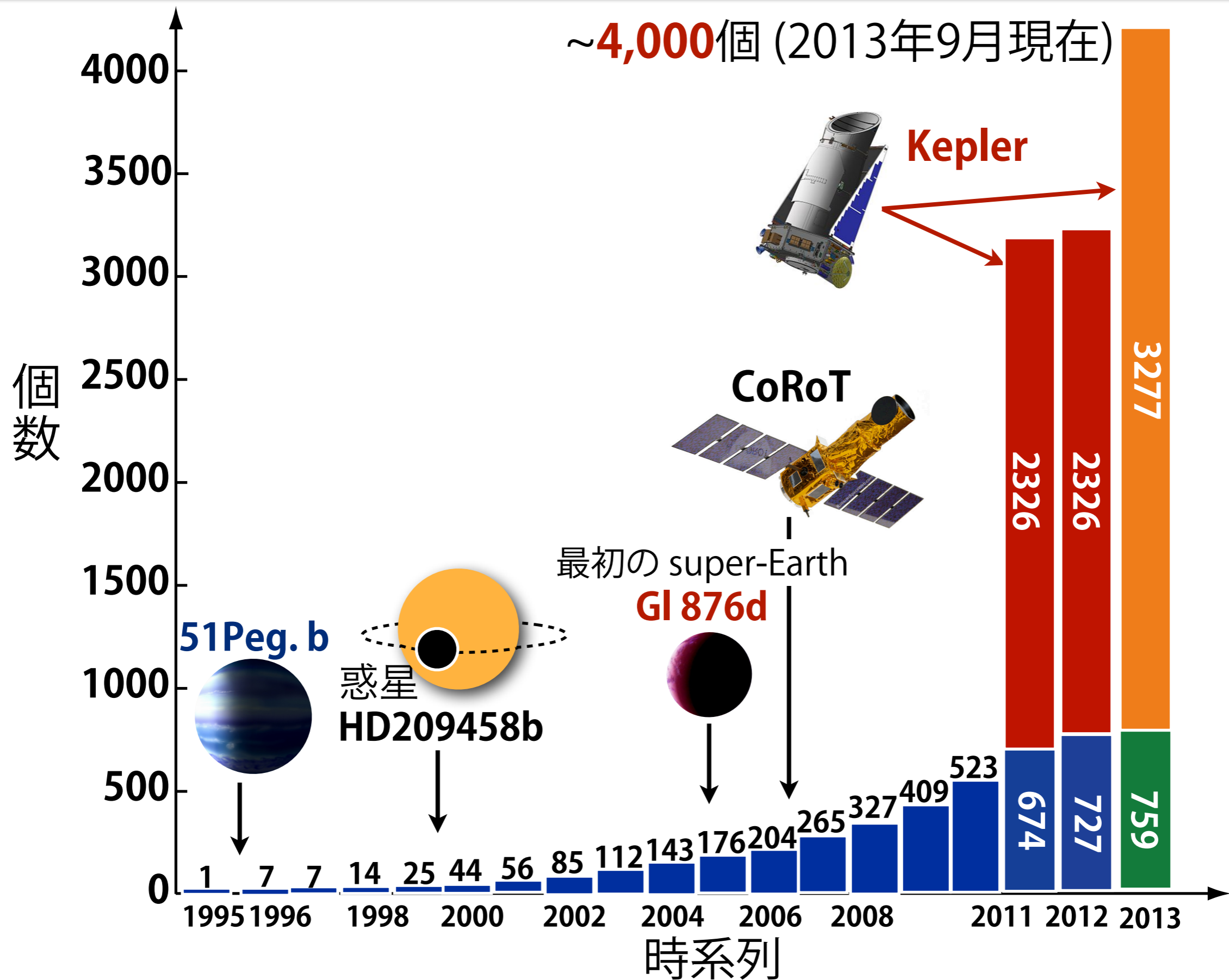


# 大気スペクトルから探る Super-Earthの内部組成と起源



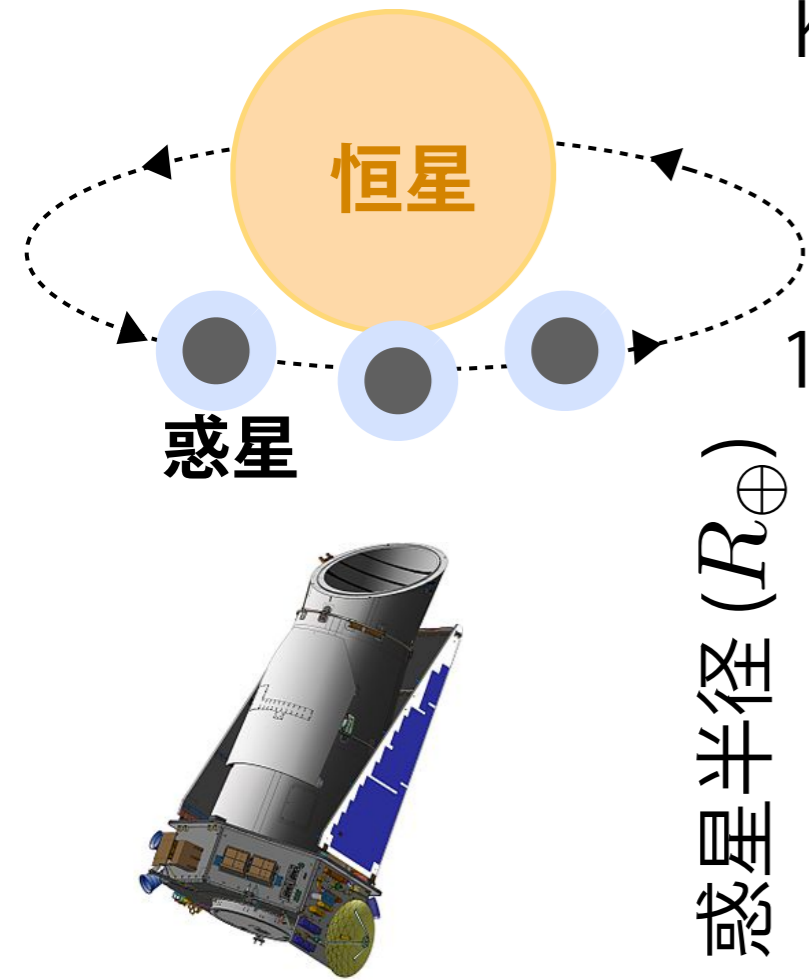
堀 安範  
国立天文台 理論研究部

# 過去18年で発見された太陽系近傍の系外惑星

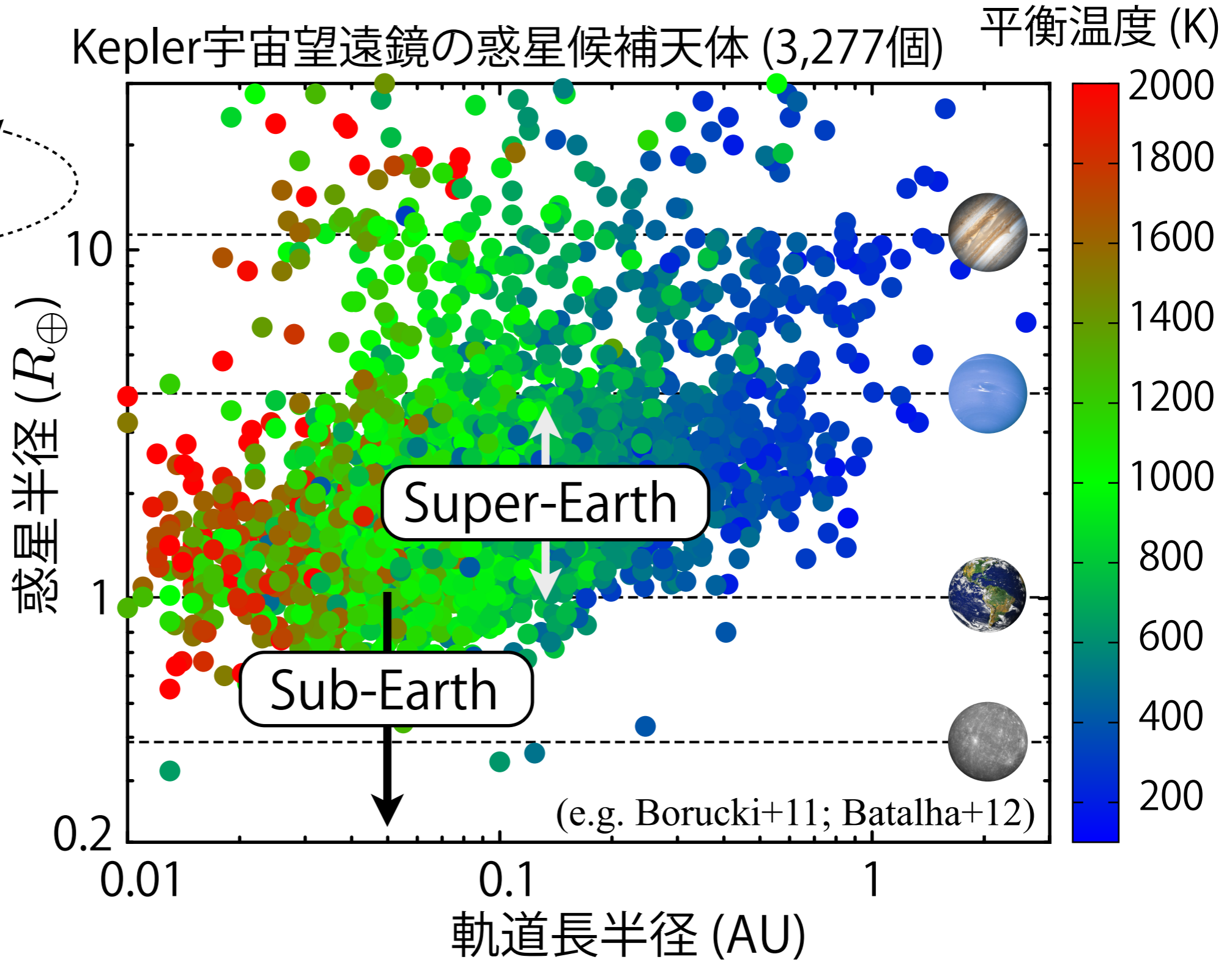


# Super-Earth, そして Sub-Earthの時代へ

Transit観測

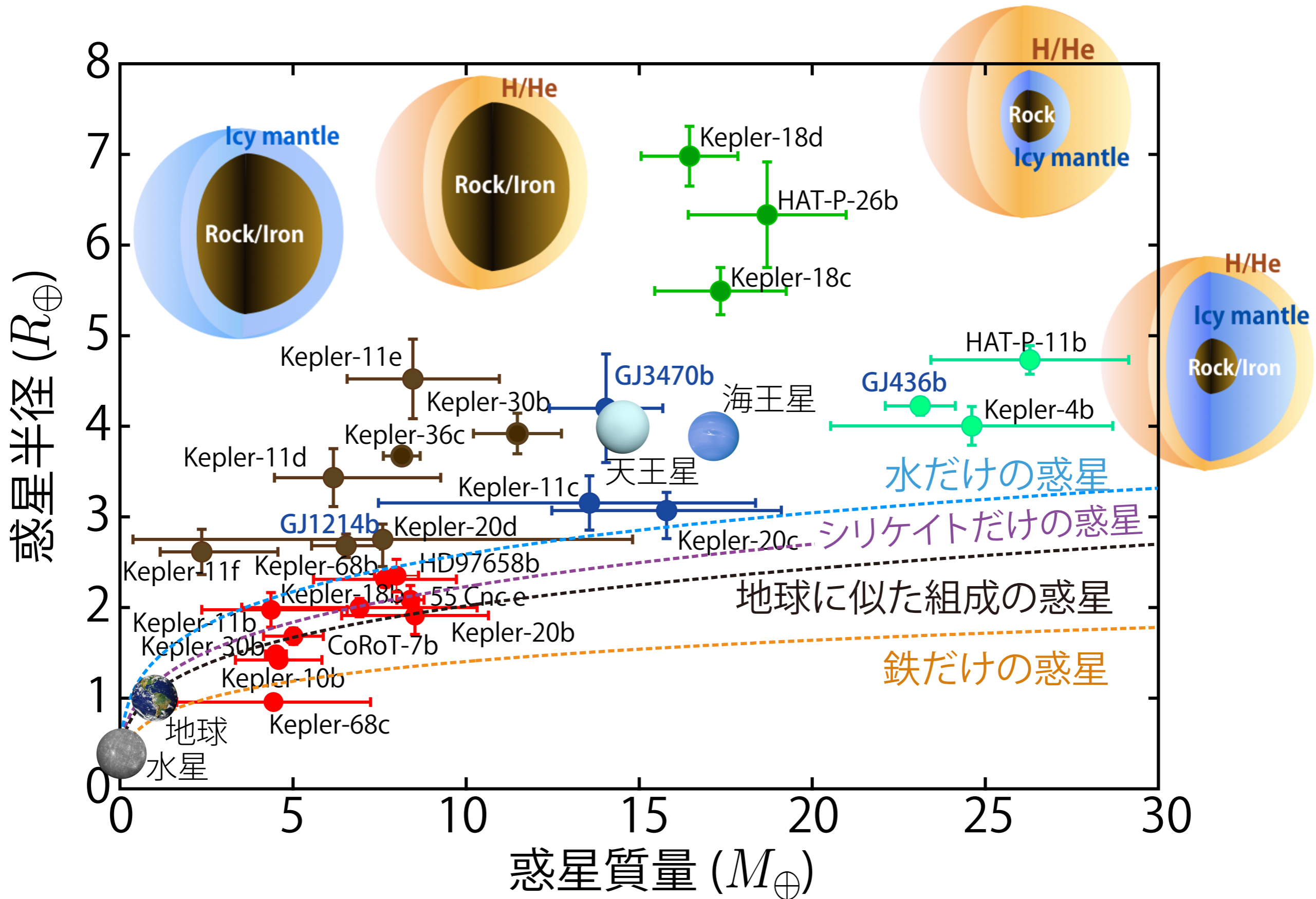


Kepler宇宙望遠鏡の惑星候補天体 (3,277個)



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

# 発見された短周期 Super-Earth (0.5AU以内)



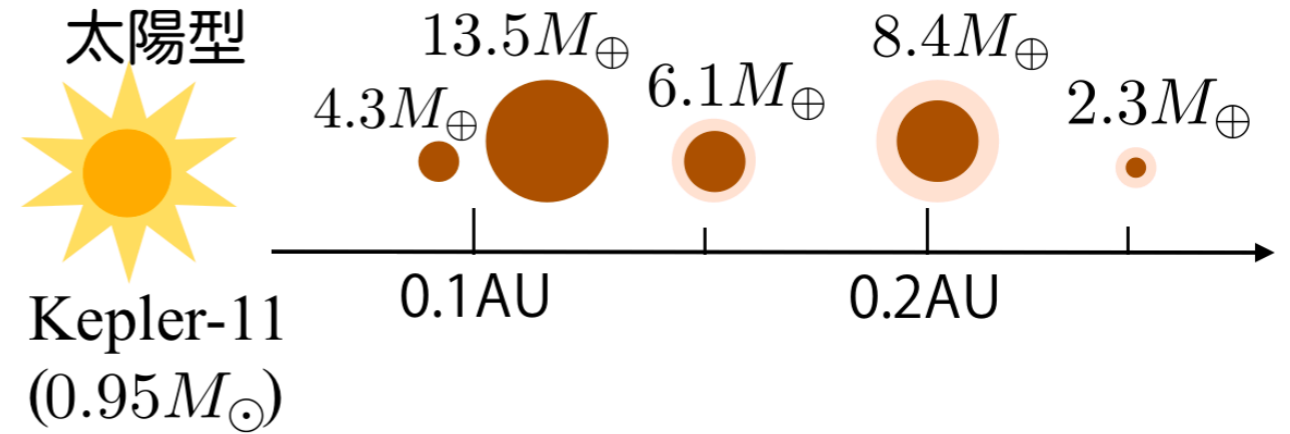
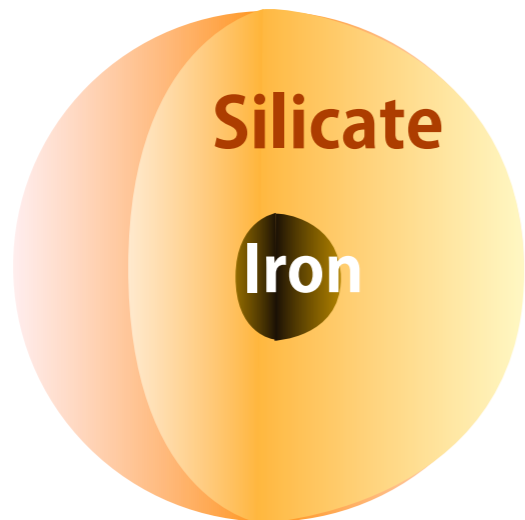
# 発見された高密度・低密度なSuper-Earth



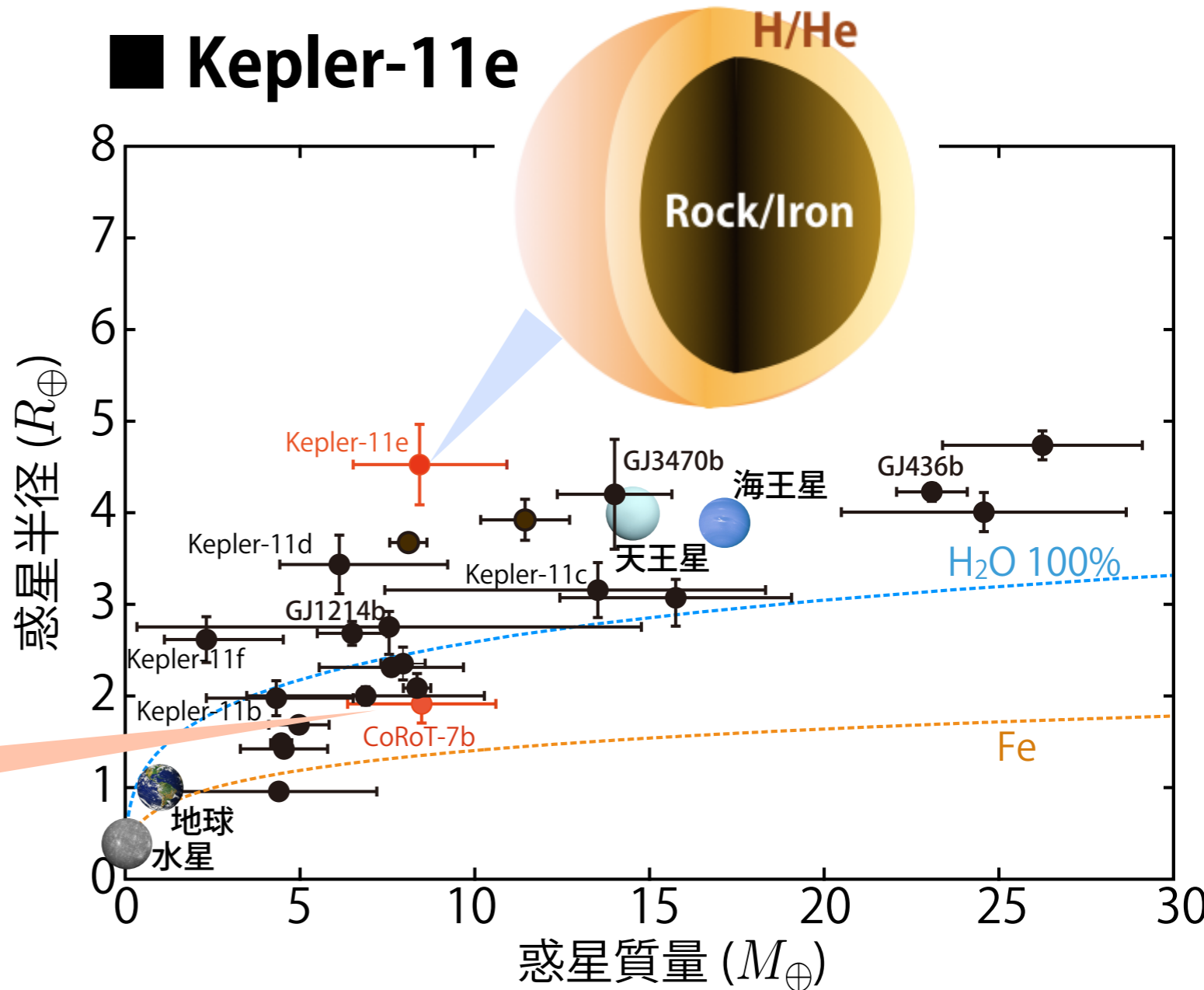
## CoRoT-7b

**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

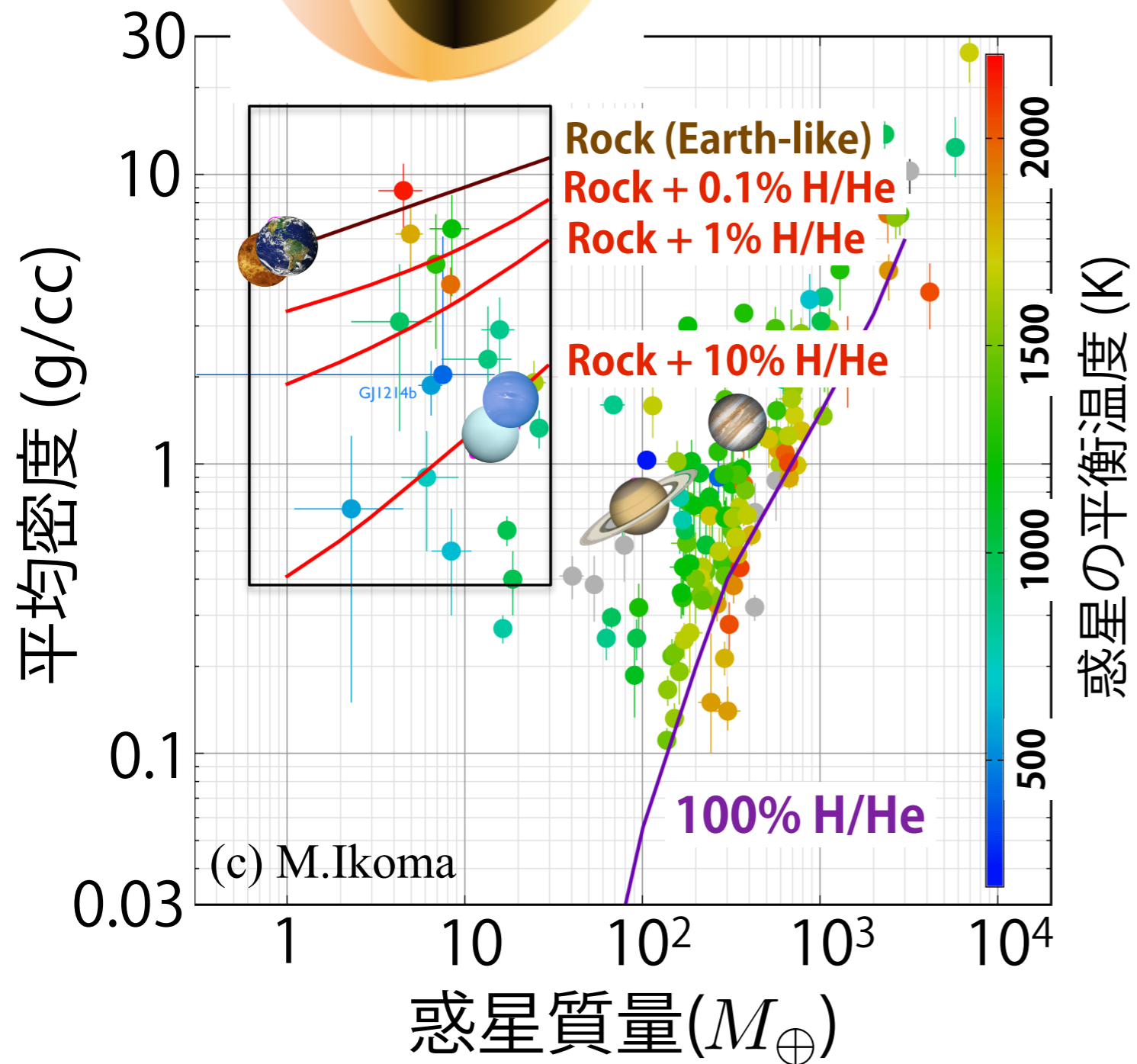
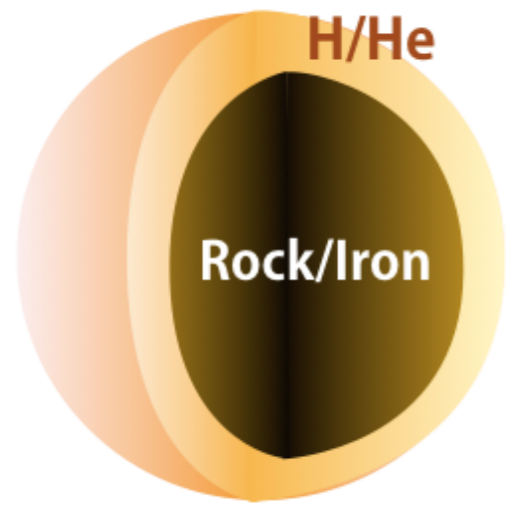
(恒星) K型星:  $0.87R_{\odot}$



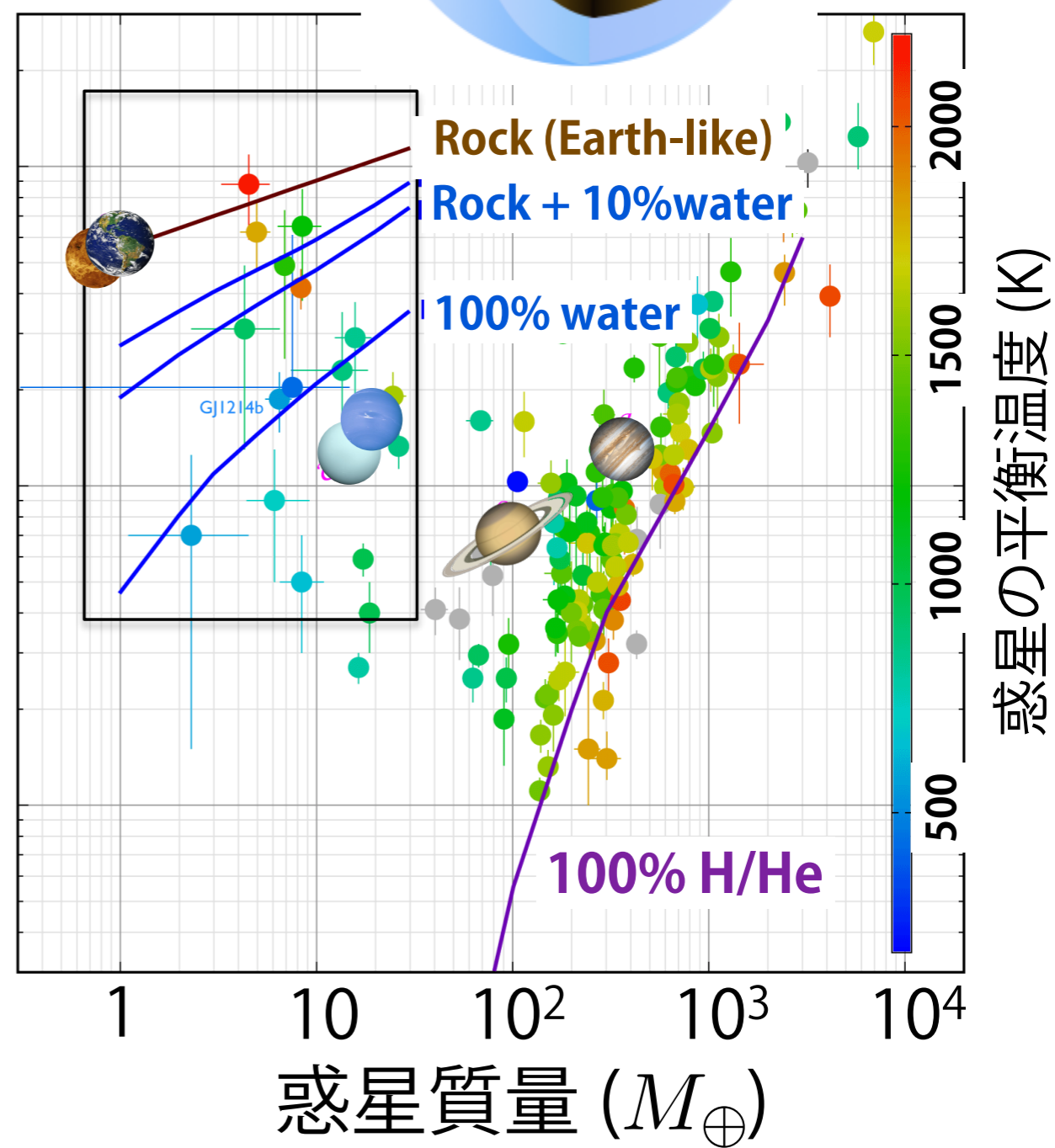
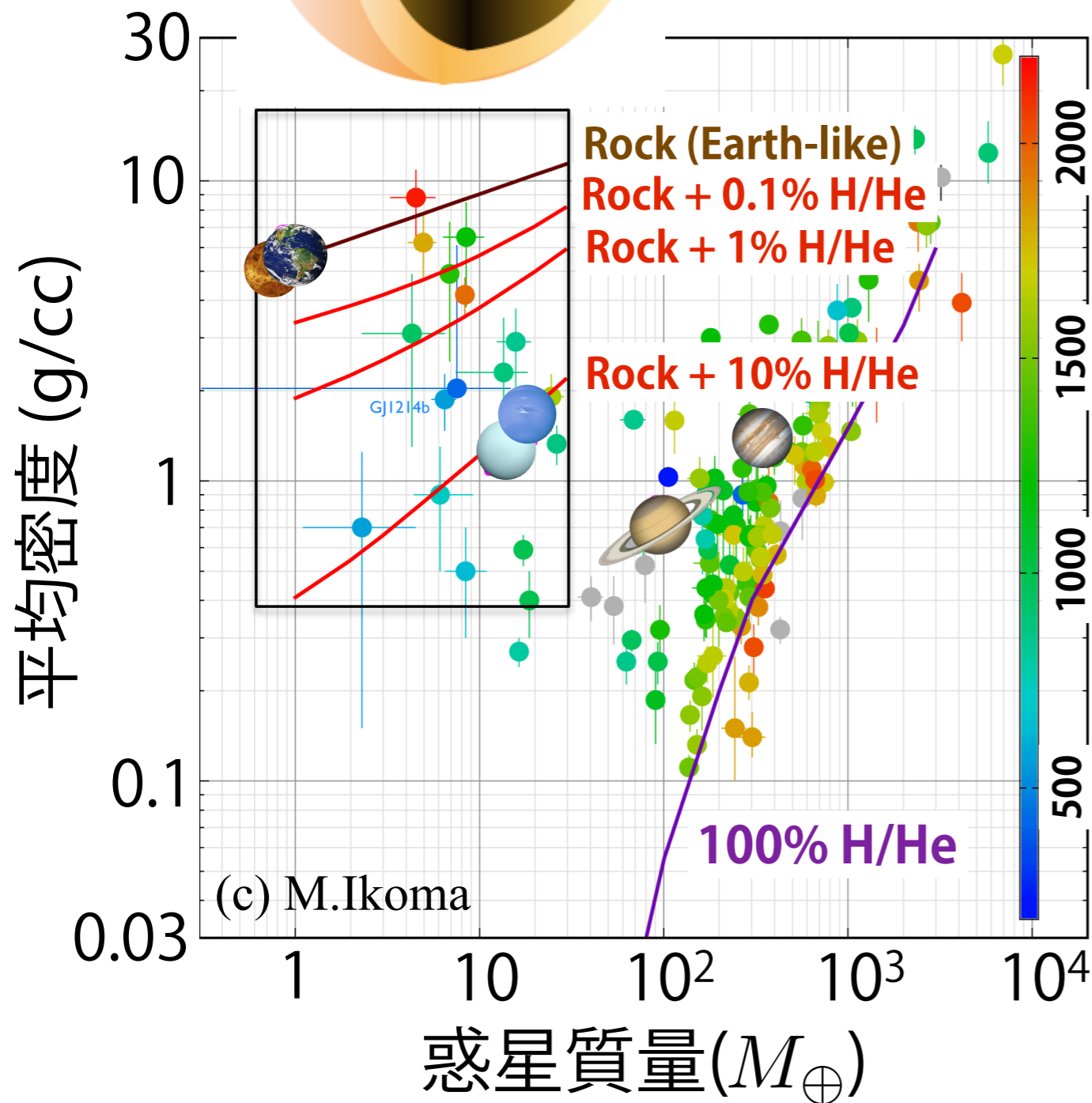
## Kepler-11e



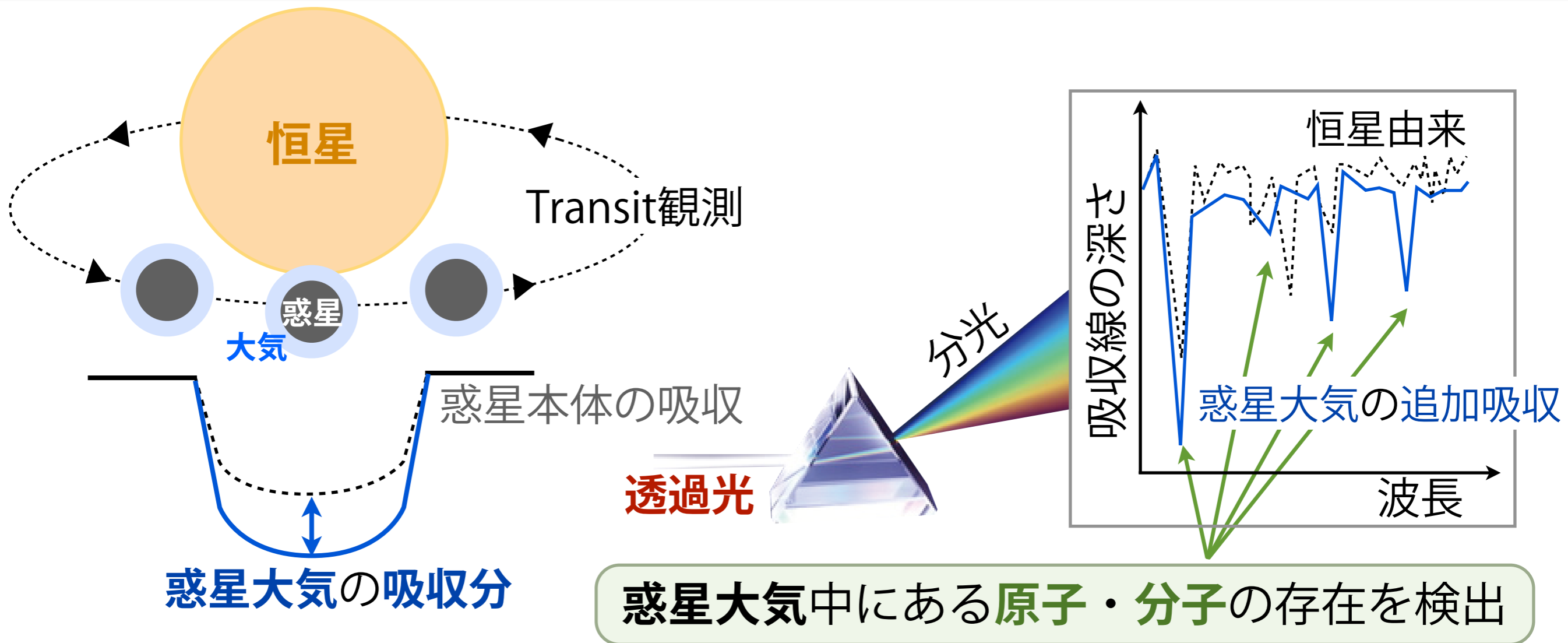
# Super-Earthの内部組成の縮退



# Super-Earthの内部組成の縮退



# 大気スペクトルから「惑星の特徴付け」



## \* GJ436b

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

※ M型星 (V = 10.68, 10.2pc)  
(Butler+04; Gillon+07)

## \* GJ1214b

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

※ M型星 (V = 14.71, 13pc)  
(Charbonneau+09)

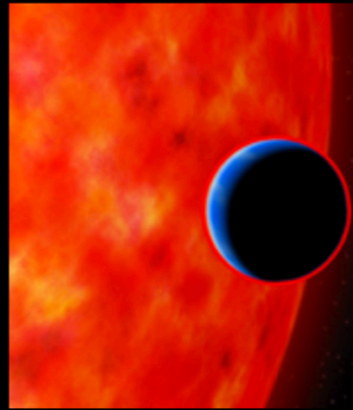
## \* GJ3470b

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

※ M型星 (V = 12.27, 30.7pc)  
(Bonfils+12; Demory+13)



# Super-Earthの大気を探る挑戦



## 晴天のスーパーアース？ — 低質量の太陽系外惑星 GJ3470bの大気を初めて観測 —

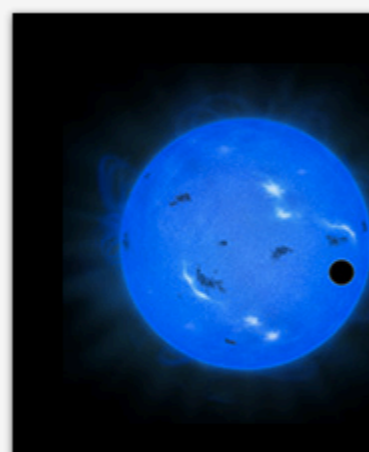
2013年6月12日

岡山天体物理観測所の2台の望遠鏡により、かに座にある巨大地球型惑星GJ3470bの大気が世界で初めて観測され、この惑星には厚い雲がある可能性が高いことが明らかとなりました。

福井さんのご講演

## 2013年6月12日 Press release : GJ 3470b (福井さん他)

国立天文台、東京大学の研究者を中心とする研究チームは、国立天文台・岡山天体物理観測所の2台の望遠鏡を使用して、かに座にあるGJ3470bと呼ばれるスーパーアース（巨大地球型（注）の大気を世界で初めて観測しました。この惑星は質量が地球の約14倍しかなく、大気が調査された太陽系外惑星としては二番目に軽い天体です。観測データの解析結果には厚い雲が無く、晴れている可能性が高いことが明らかとなりました。



## 青い光で見るスーパーアースの空

2013年9月4日

国立天文台と東京大学を中心とする研究チームは、すばる望遠鏡を用いてスーパーアースGJ1214bの空を観測し、この惑星が水蒸気を主成分とする大気を持つ可能性が高いことを明らかにしました。

## 2013年9月4日 Press release : GJ 1214b (成田さん他)

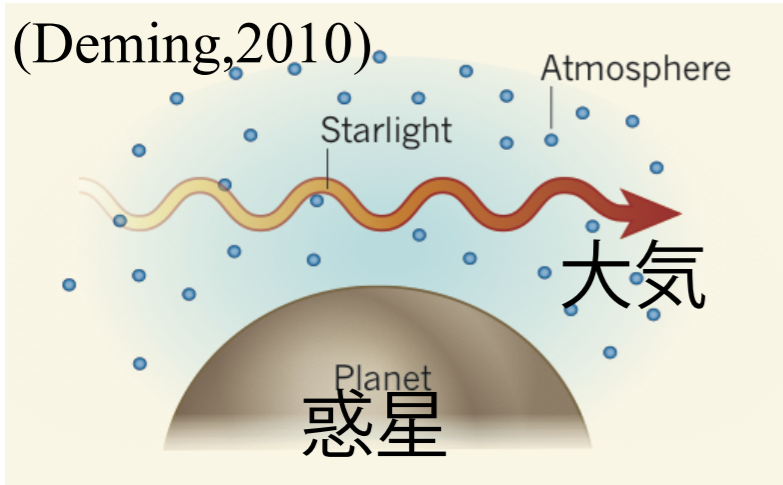
国立天文台と東京大学を中心とする研究チームは、すばる望遠鏡に搭載された2つの可視光カメラSuprime-CamとFOCASに青い光だけを透過するフィルターを装着して、へびつかい座の方向、約40光年のかなたにあるスーパーアースGJ1214bの空を観測しました。

成田さんのご講演

成分が何かをめぐってこれまで議論が続いており、水素あるいは水蒸気であると言われていました。今回の観測の結果、この惑星では晴れた水素大気の空で観測されるはずの「強いレイリー散乱」の特徴が見られないことが明らかとなりました。このことは、これまでのこの惑星に対する観測結果と合わせて、GJ1214bが水蒸気を主成分とする大気を持つ可能性が高いことを示しています。

# 透過スペクトルで見えるSuper-Earthの大気

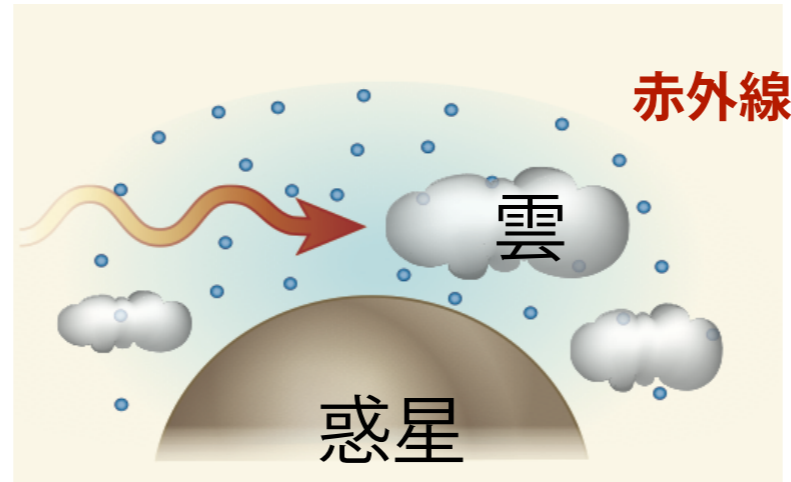
## (1) **low $\mu$ (H<sub>2</sub>-rich)**な大気



(可視光域) **Rayleigh散乱**

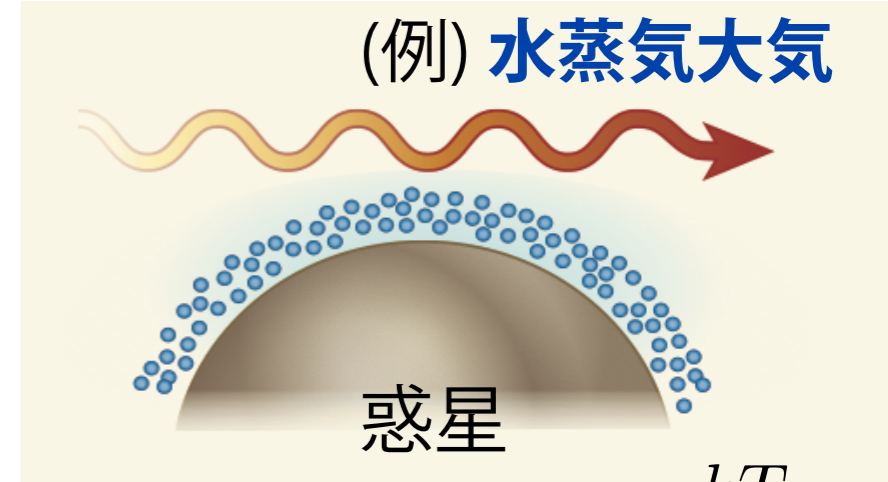
※ 散乱断面積  $\propto 1/\lambda^4$

## (2) **low $\mu$ (H<sub>2</sub>-rich) + 雲**

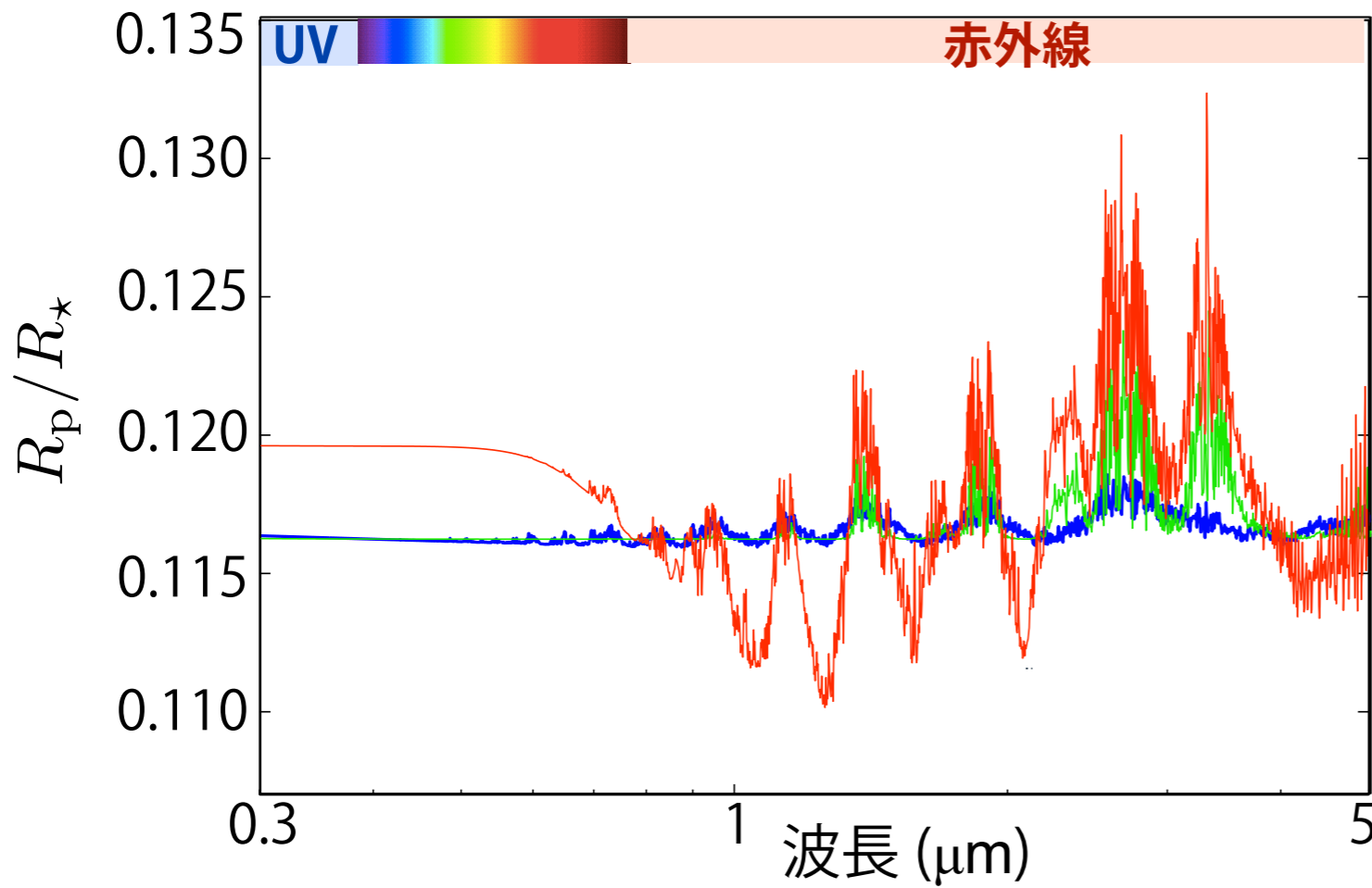


吸収線の特徴：**弱められる**  
雲底と**Na, Kの吸収線**の相関  
(Seager & Sasselov+00)

## (3) **high $\mu$ (H<sub>2</sub>-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 $\mu$ m tholin

太陽組成 w/ 雲

H<sub>2</sub>Oリッチ大気 (H<sub>2</sub>O 1%, N<sub>2</sub> 99%)

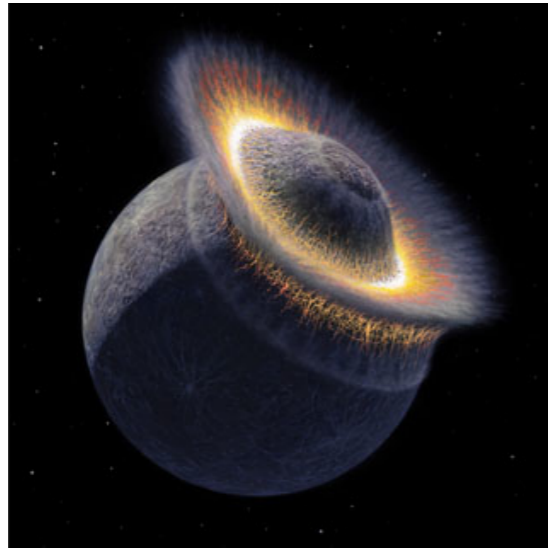
※ 平衡温度 (500-1000K) (Morley+12;13)

**KCl, ZnS, Na<sub>2</sub>Sの雲生成**

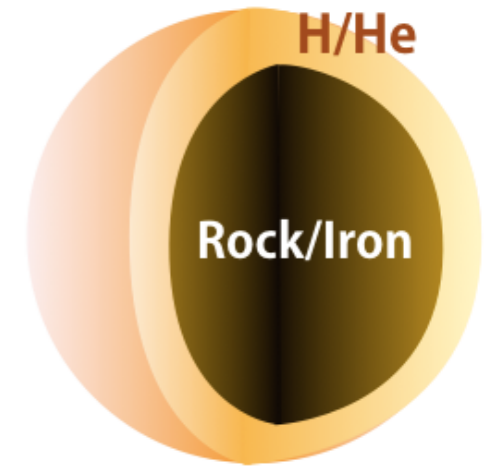
(cf) より高温: MnS, Cr, MgSiO<sub>3</sub>, Fe

# Super-Earthの大気・内部組成と起源

① in situ 形成 (+天体同士の巨大衝突)

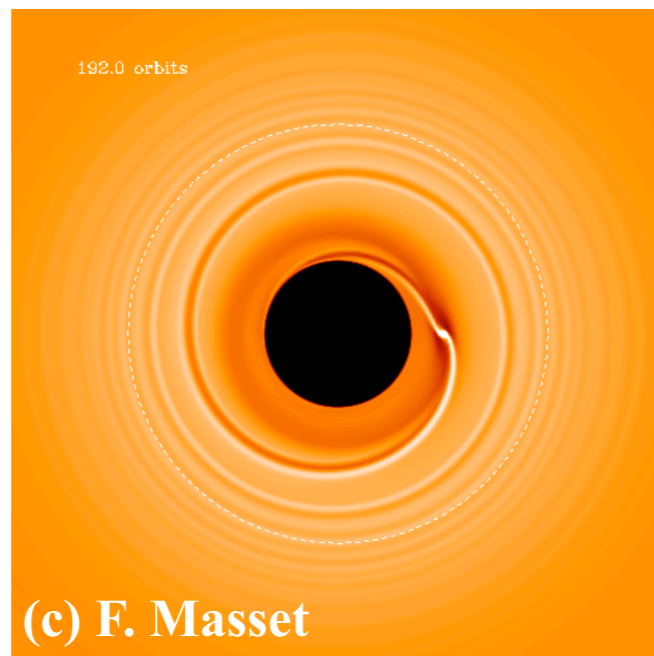
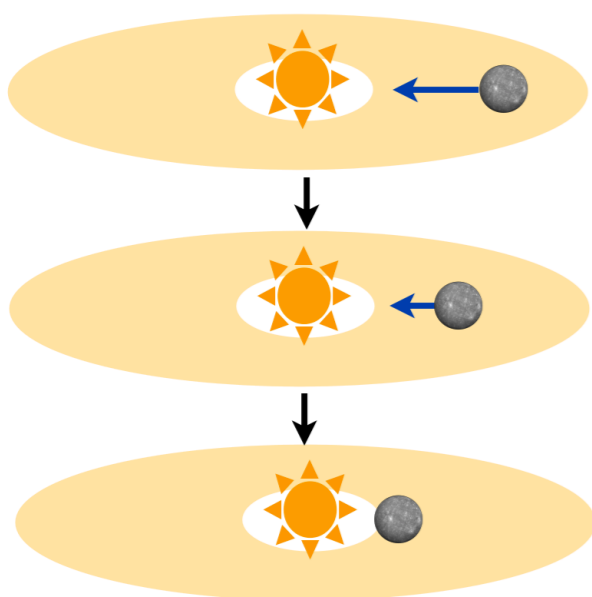


組成の解明  
起源の解明

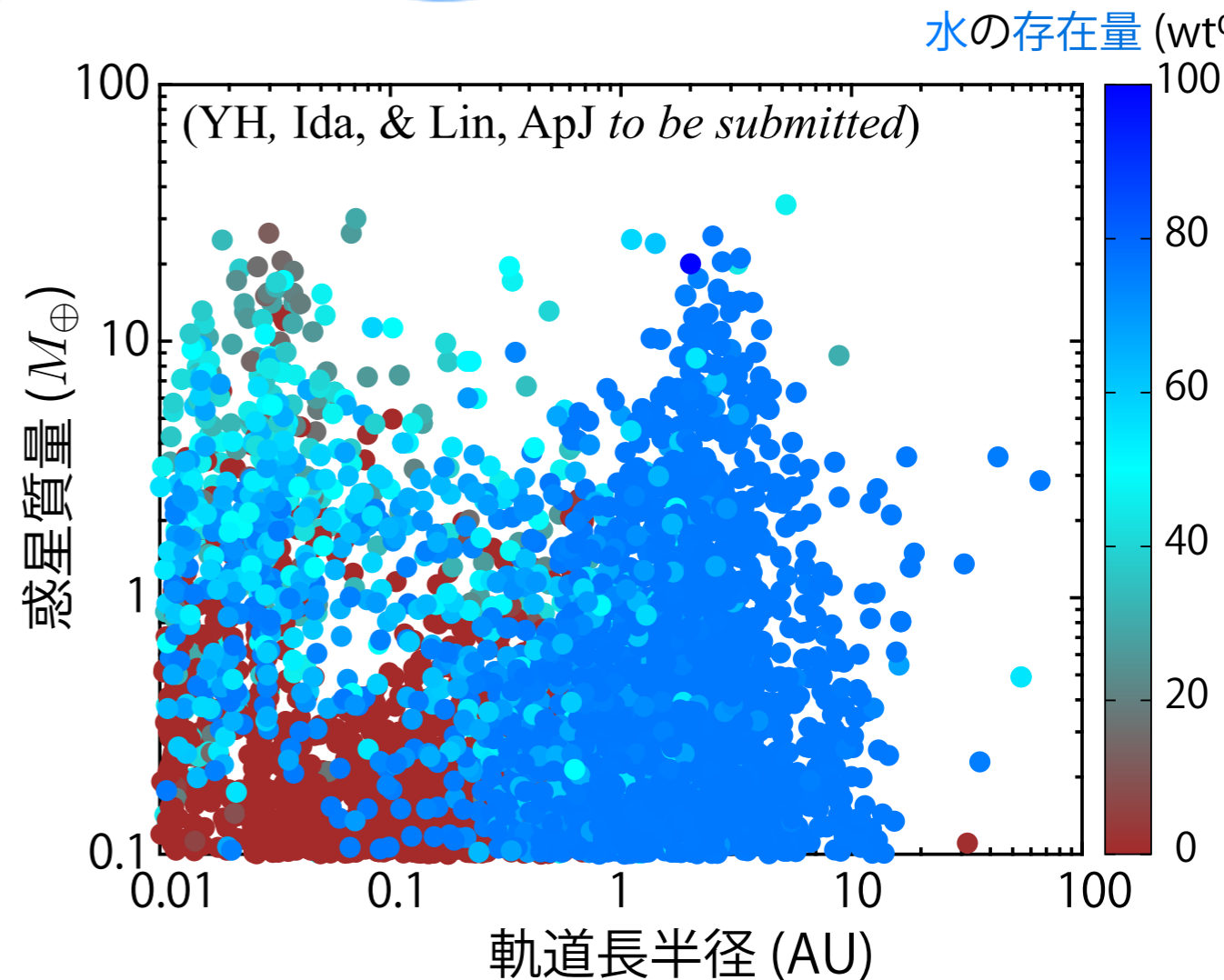


② Type I 惑星移動

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



惑星とガス円盤の潮汐相互作用

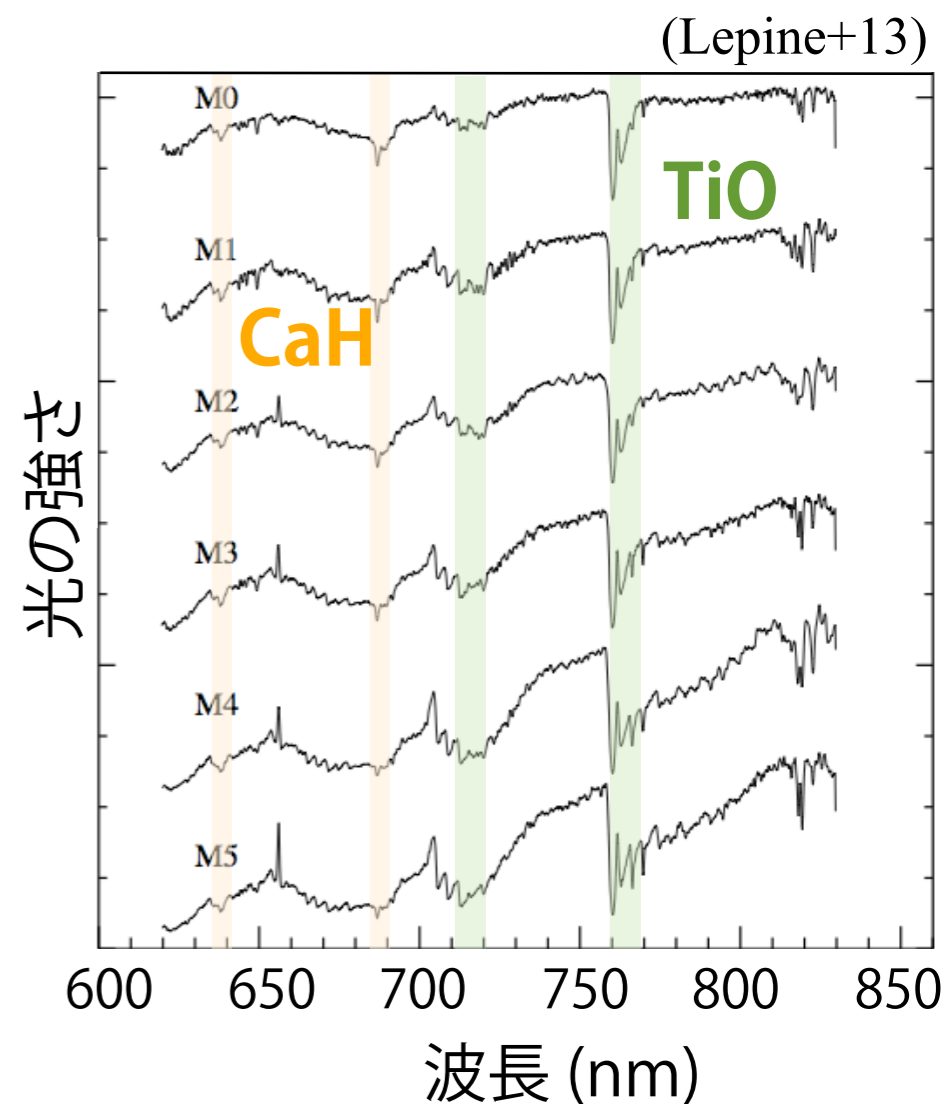
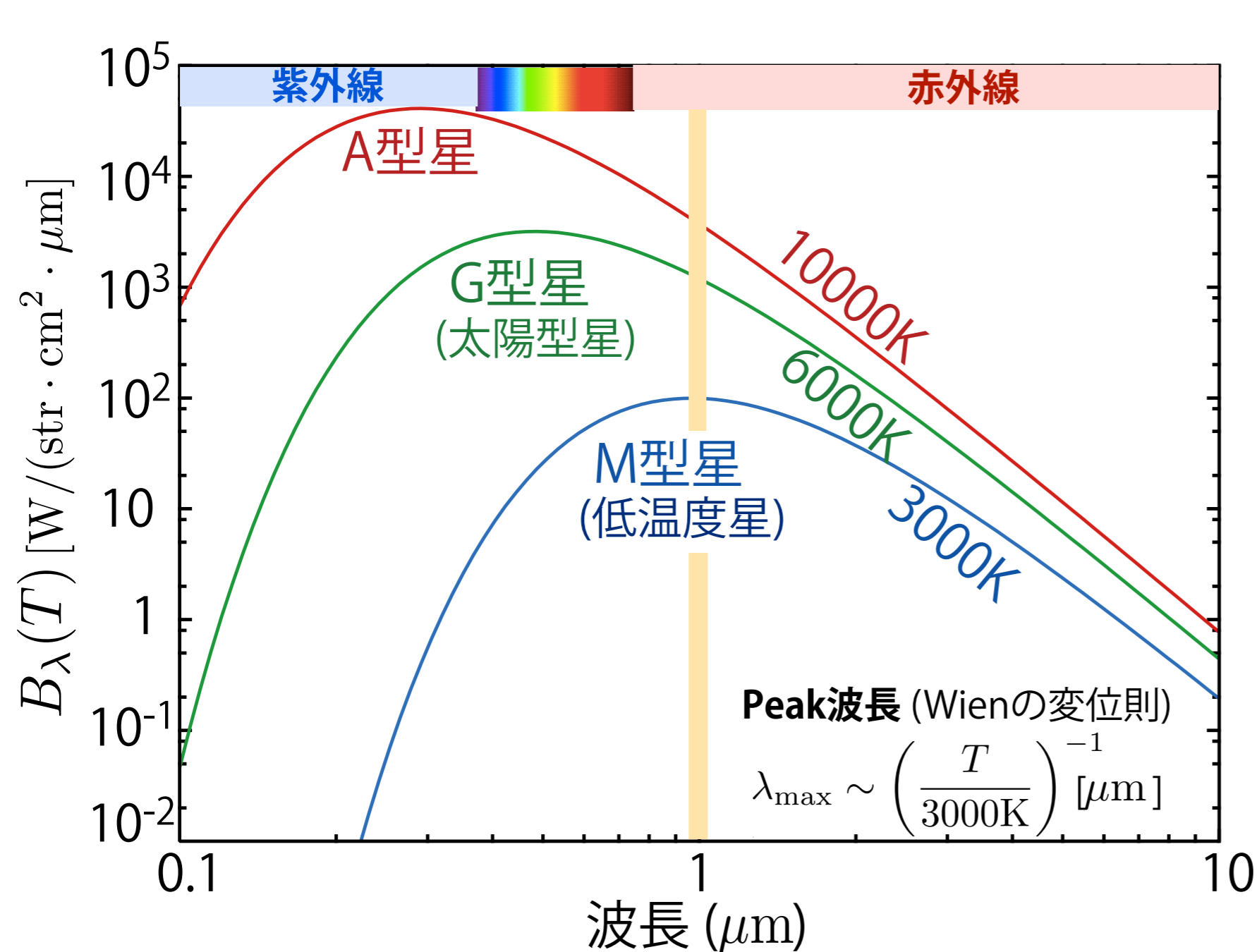


# 低温度星とは...

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)

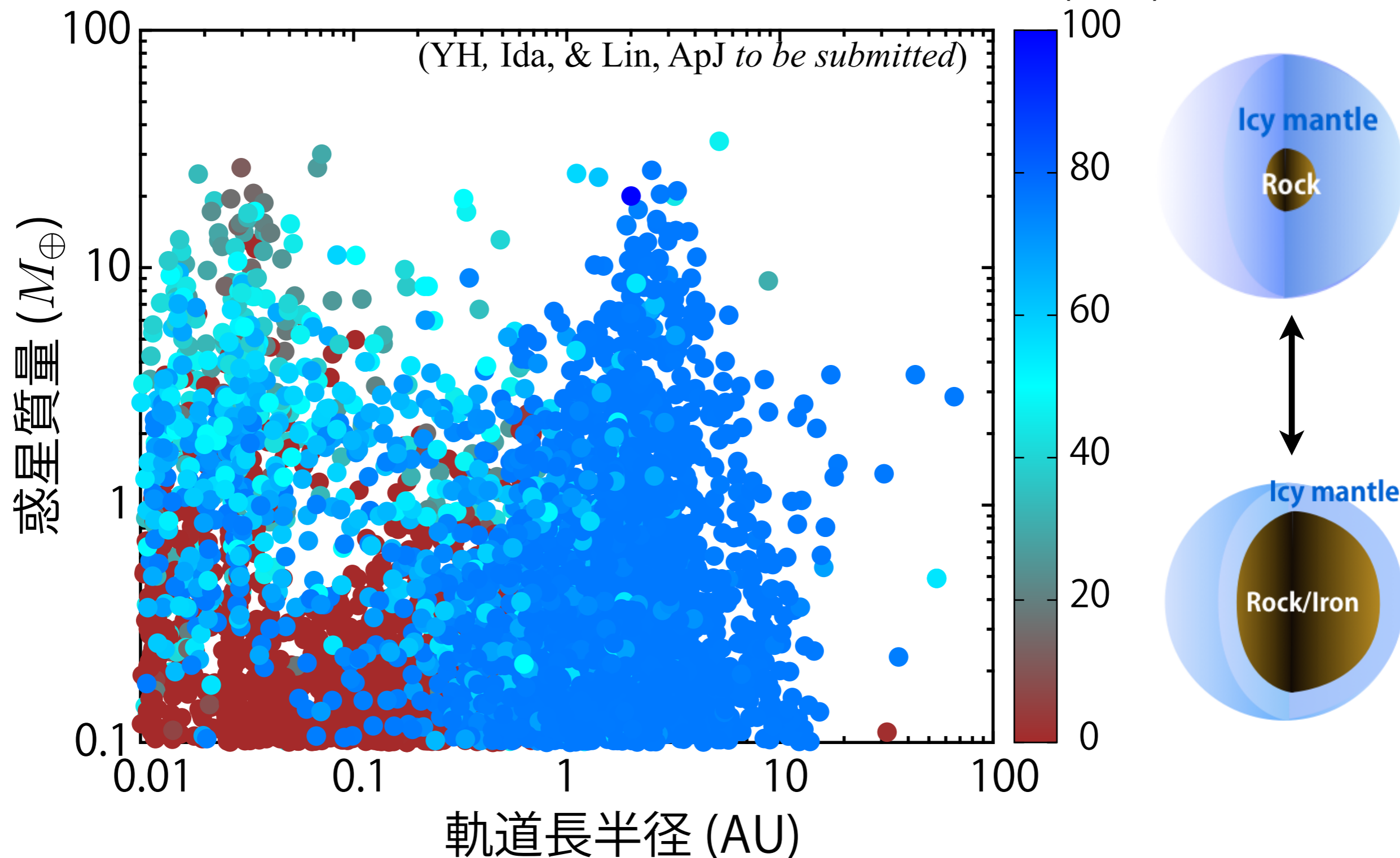
→ **冷たく**, **暗く**, **小さな星**



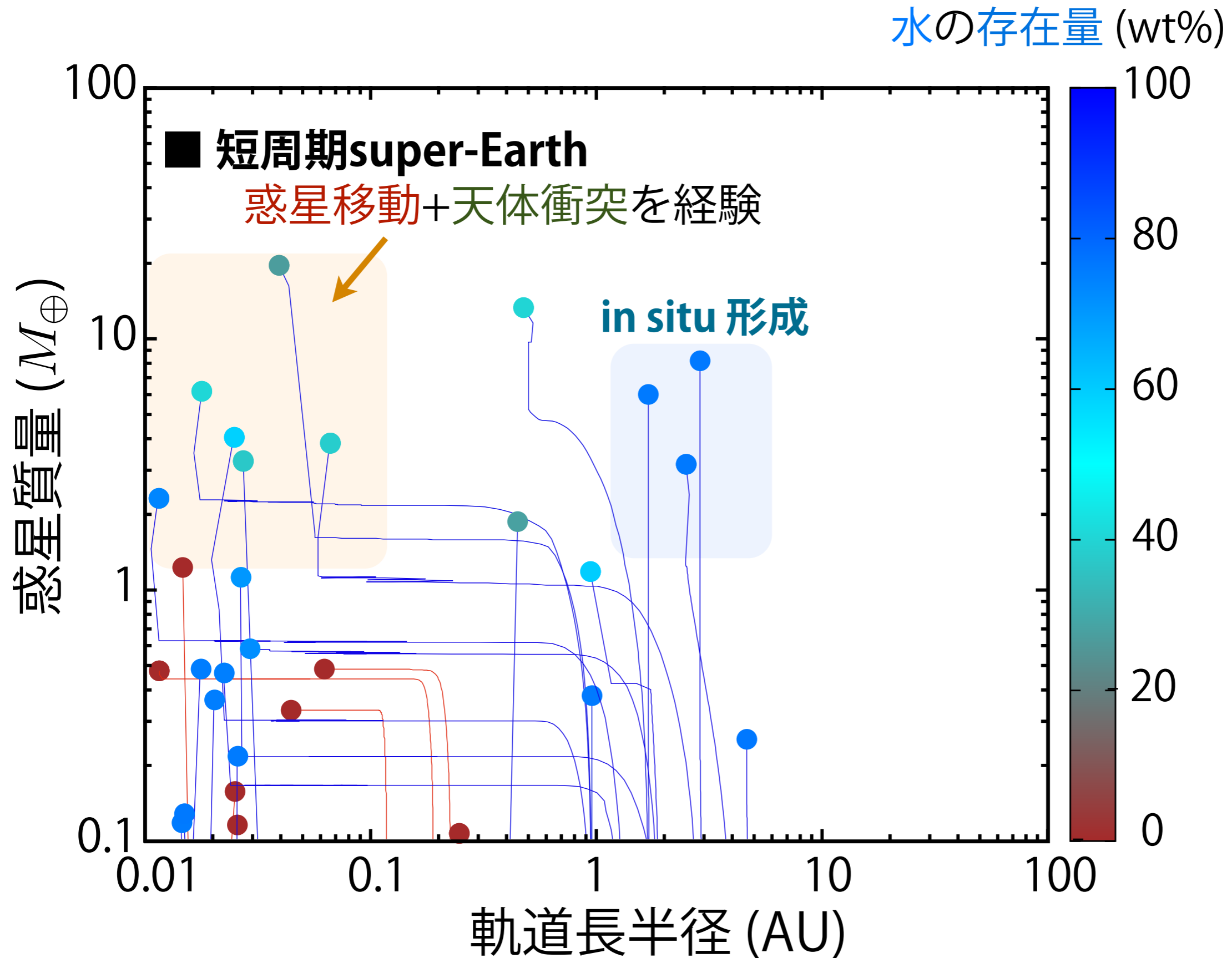
# 低温度星周りの Sub/Super-Earth : Water World

『30倍の地球質量以下の固体惑星(岩石/H<sub>2</sub>O)』

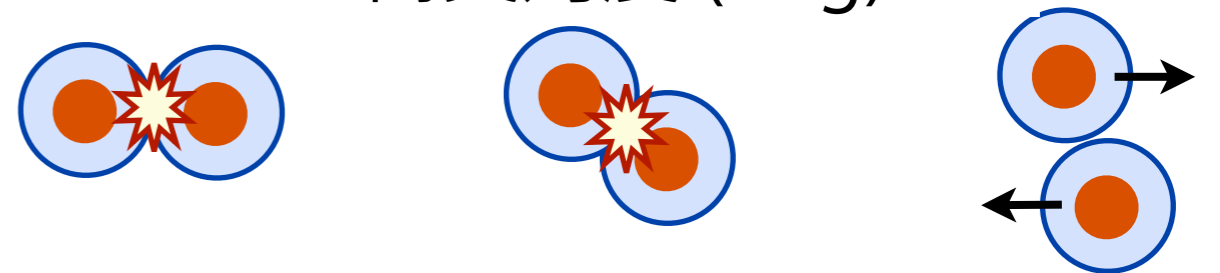
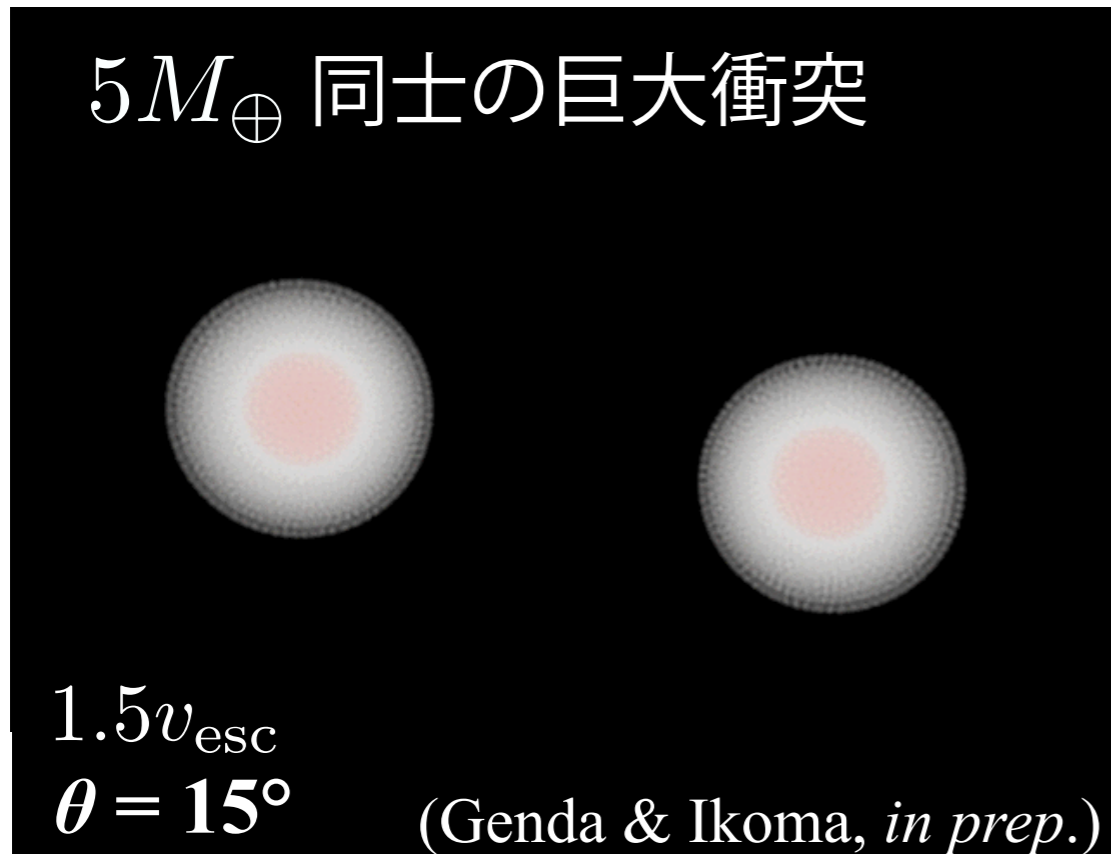
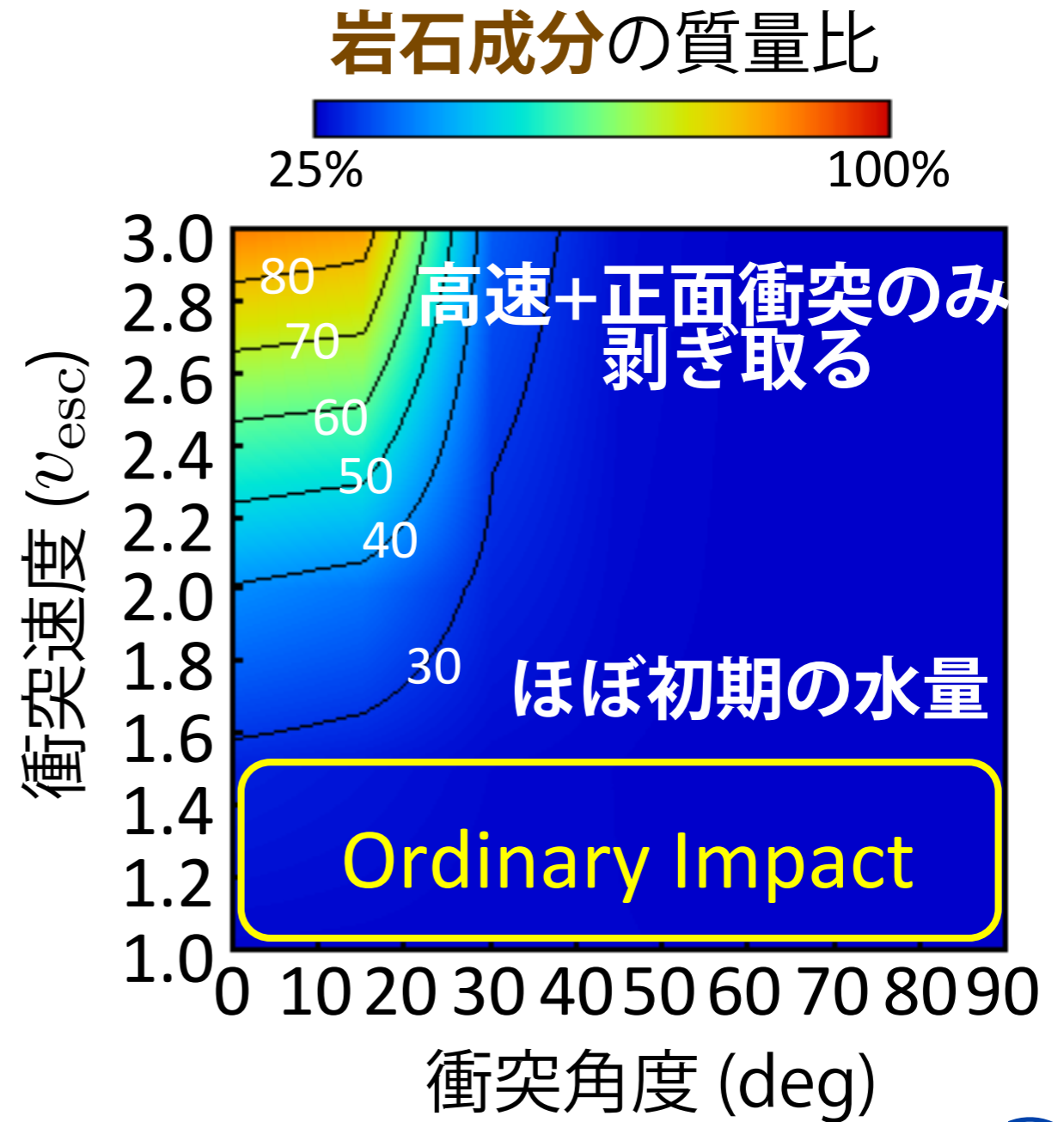
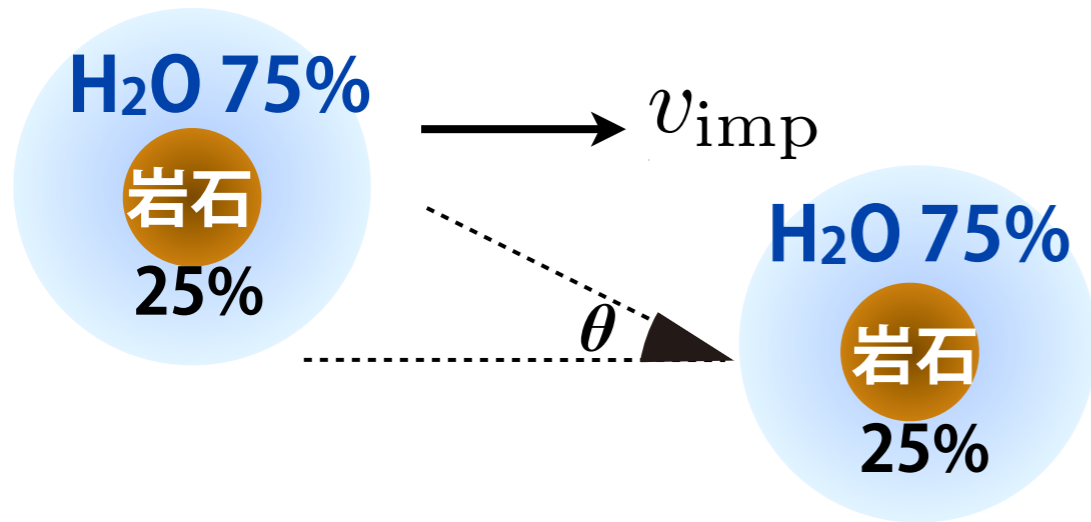
水の存在量 (wt%)



# 水に富む惑星の成り立ち

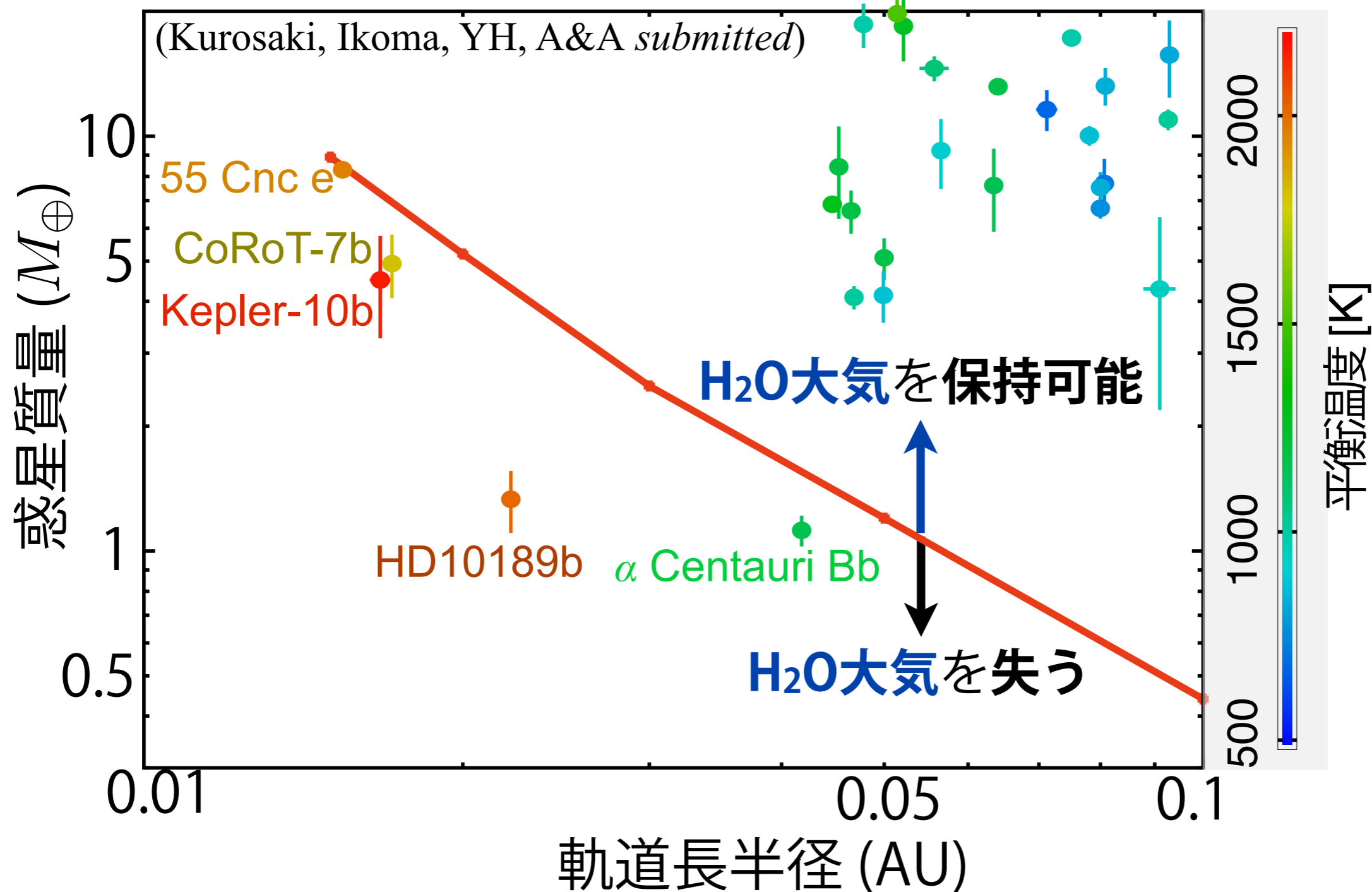
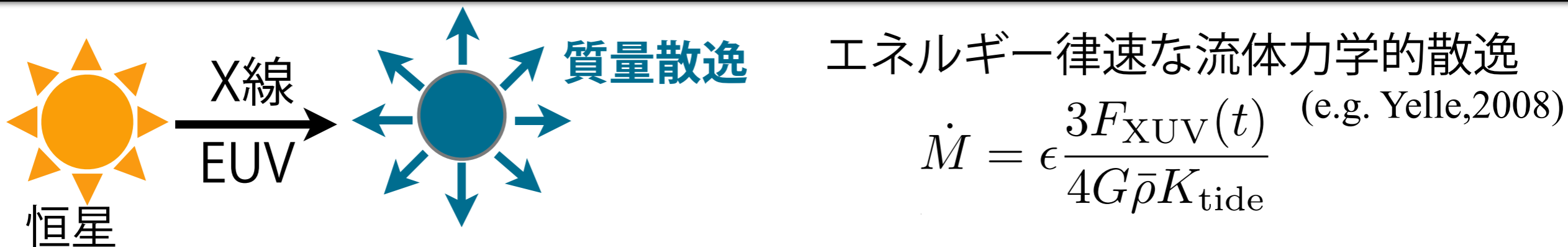


# 天体衝突による水マントルの剥ぎ取り



巨大衝突で水はほとんど失われない

# EUV照射下でH<sub>2</sub>Oを保持出来る惑星の質量限界





# 液体の水を育む惑星：生命居住可能な惑星

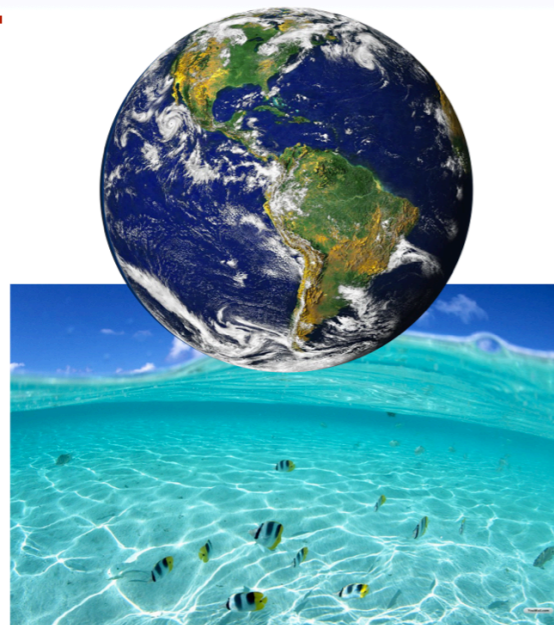
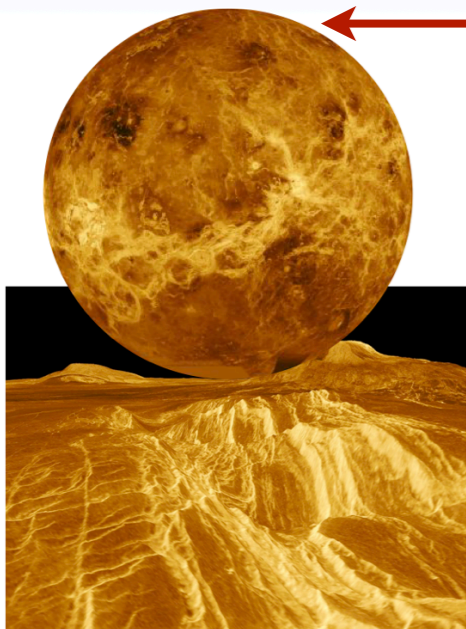


『表面に液体の水を保持』 --- 生命居住可能な惑星  
(habitable planet)

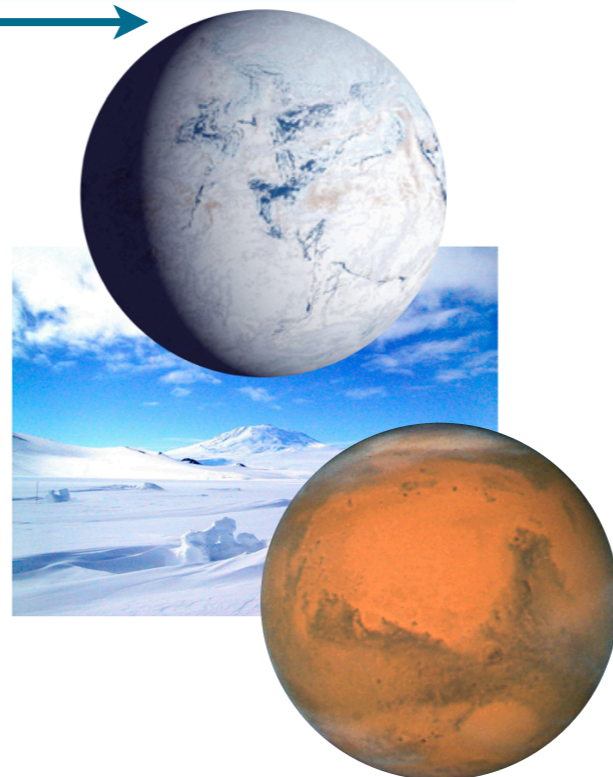
- (1) 恒星からの適度な距離
- (2) 適度な温室効果

■ **habitable zone** (Goldilocks zone)  
(Kasting+93;Selsis+07;Kopparapu+13)

(例) 太陽系  
暴走温室状態

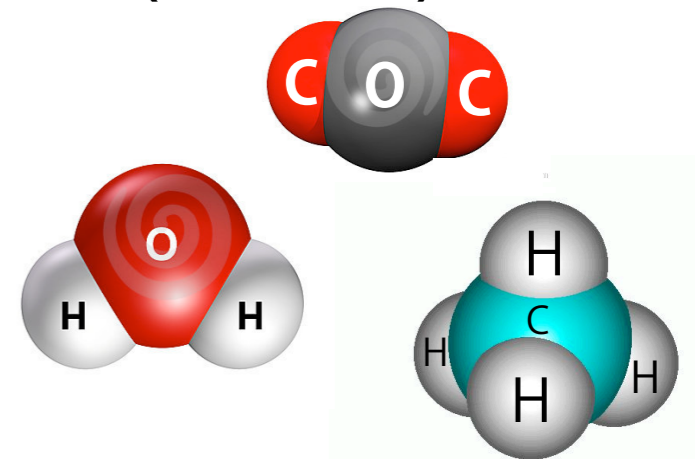


CO<sub>2</sub>凝縮 (全球凍結)



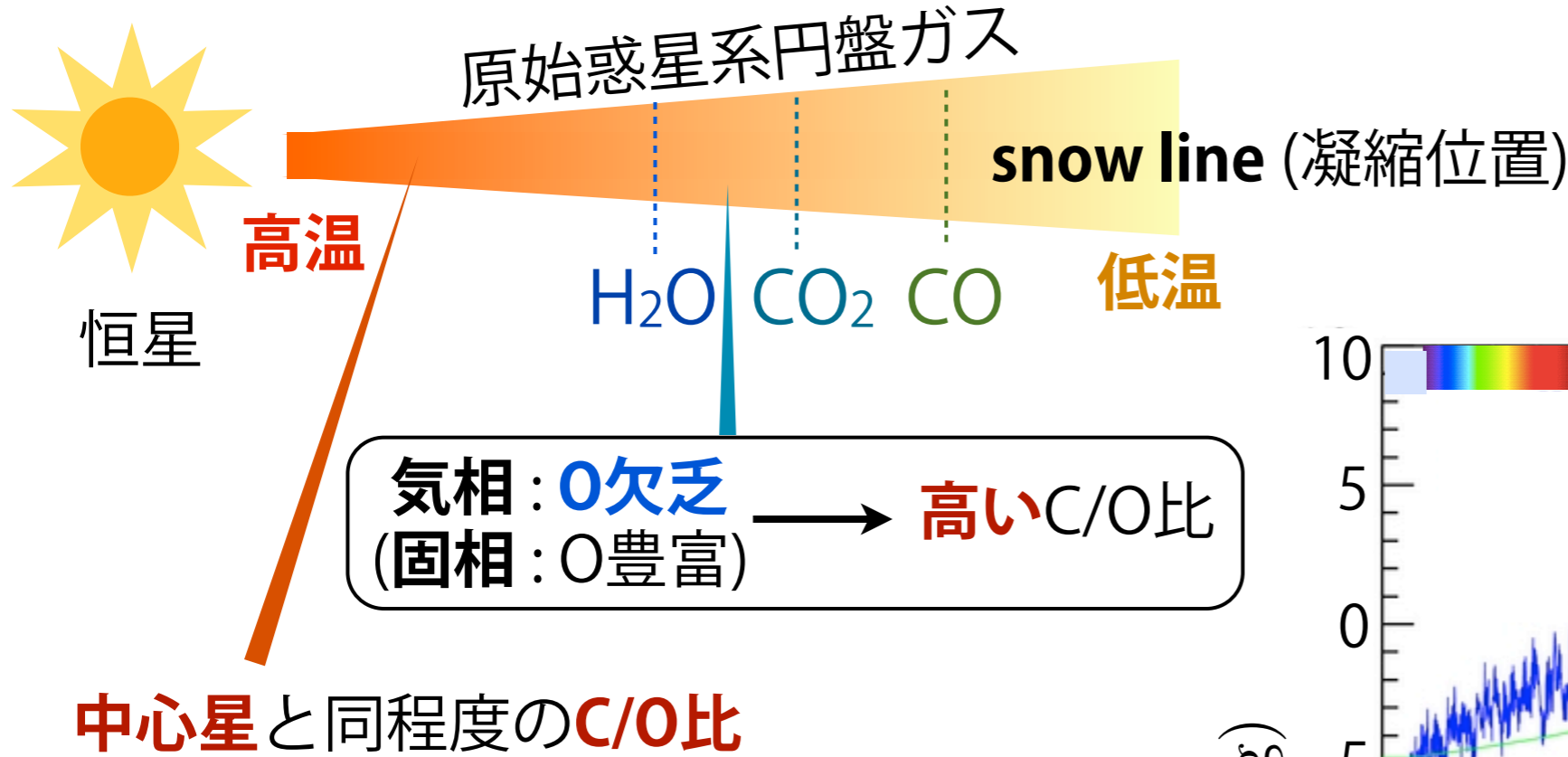
温室効果ガス

H<sub>2</sub>O (水蒸気)  
CO<sub>2</sub> (二酸化炭素)  
CH<sub>4</sub> (メタン)



※ H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> 衝突誘起吸収  
(Pierrehumbert & Gaidos 2011;  
Wordsworth,2012)

# 揮発性分子のC/O比と惑星の形成環境



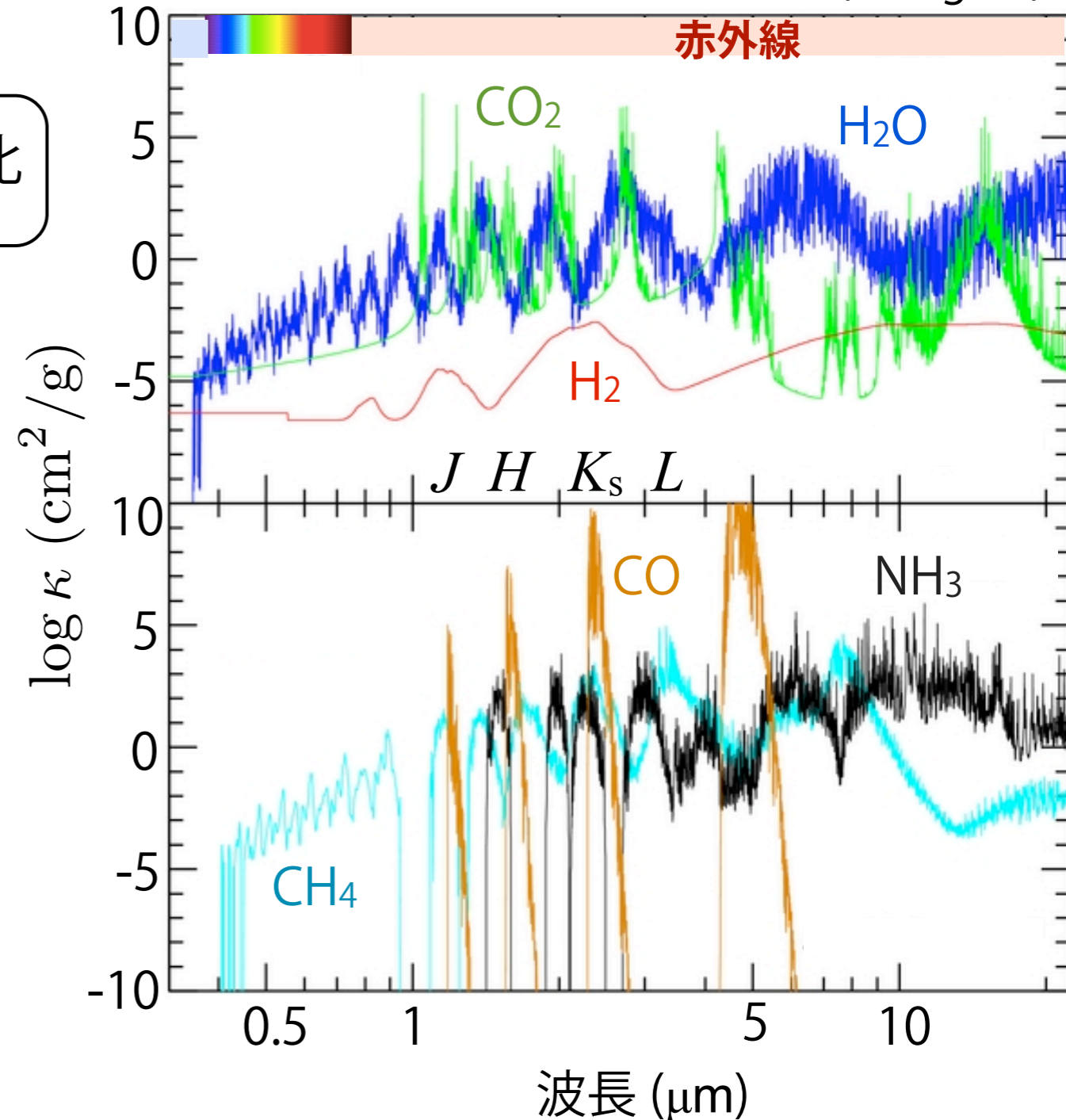
## ■ 惑星大気中のC/O比

→ 形成環境を反映

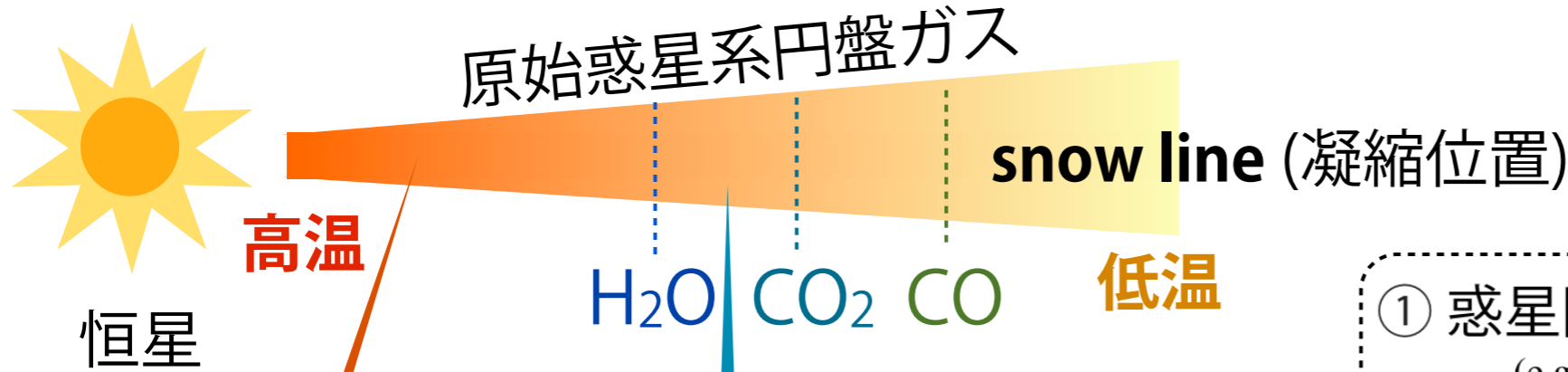
- (1) CO (CO<sub>2</sub>) / H<sub>2</sub>Oの混合比
- (2) H<sub>2</sub>Oの存在量

(低温環境下) CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O 安定  
(高温環境下) CO 安定

(Howe & Burrows, 2012)  
500K@1mbar (10<sup>-5</sup> 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

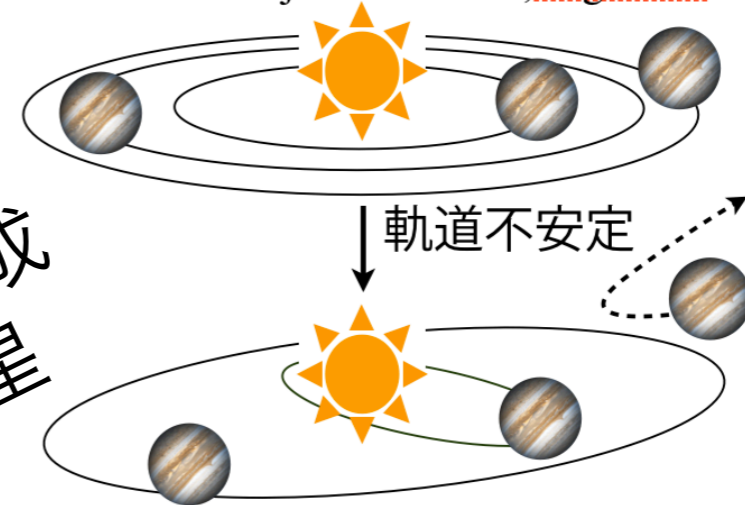
→ 形成環境を反映

- (1) CO (CO<sub>2</sub>) / H<sub>2</sub>Oの混合比
- (2) H<sub>2</sub>Oの存在量

hot Jupiterの形成  
遠方ガス惑星

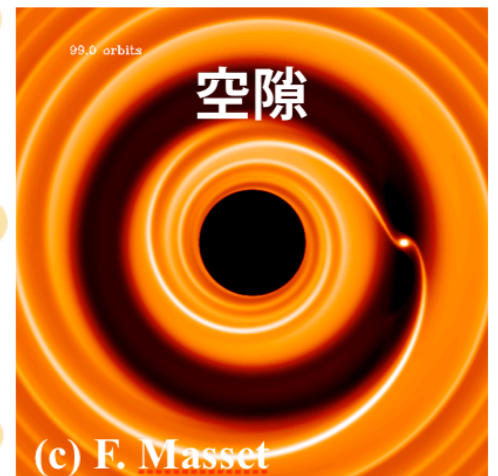
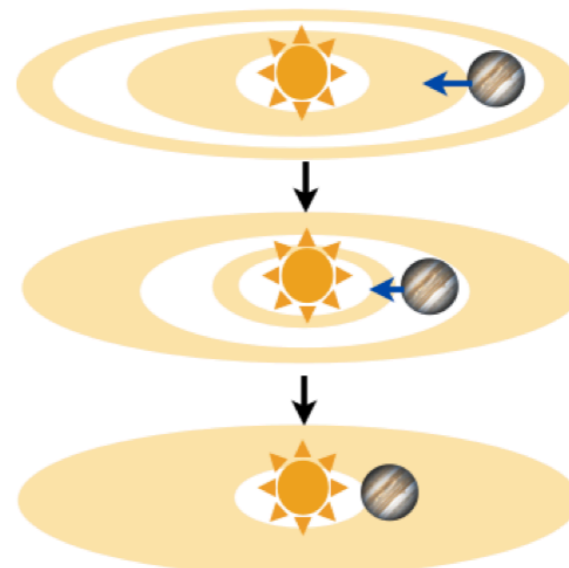
### ① 惑星同士の重力散乱

(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)



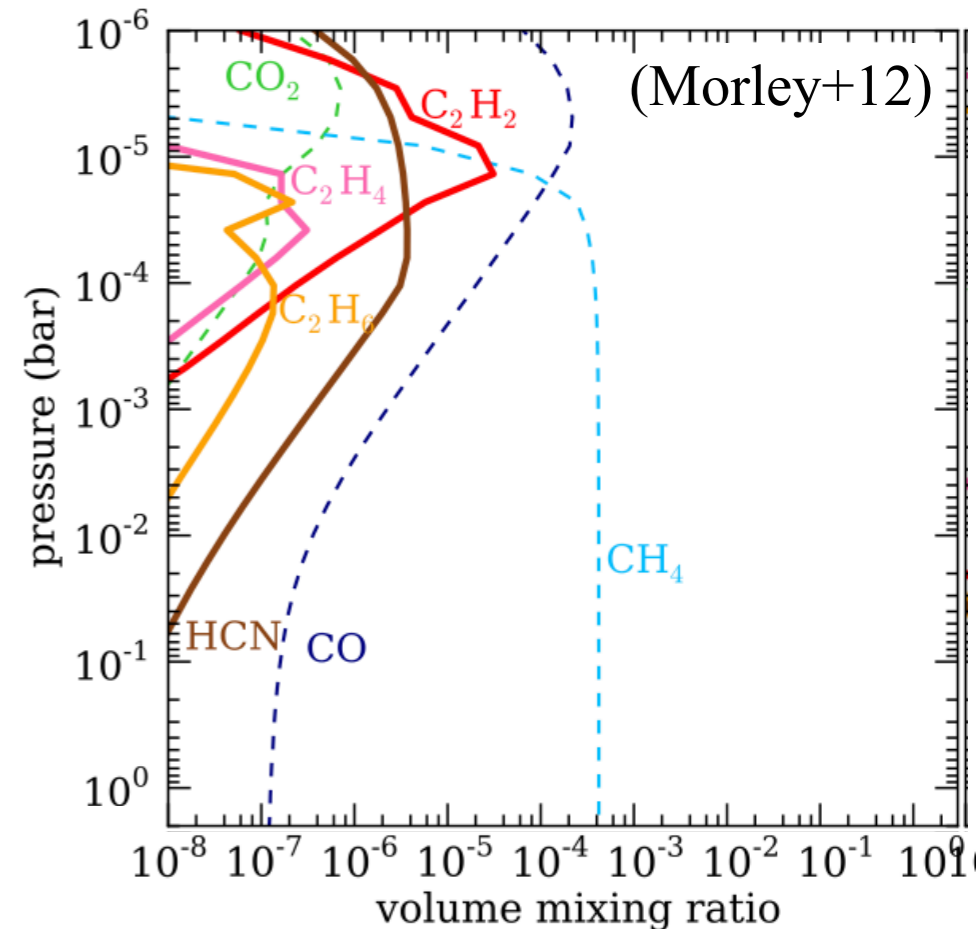
# Haze Chemistryと大気的光化学

## 短周期 Super-Earthの大気化学

- (a) 中心星からの強烈なX線, UV照射
- (b) 高い平衡温度

もや(炭化水素haze or soot → tholinと総称)  
→ C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, HCN etc 生成

大気上層( $P \leq 1\text{mbar}$ )でのUVによるCH<sub>4</sub>光分解  
CH<sub>4</sub> ⇌ CO (主に、 $T < 1000\text{K}$ でCH<sub>4</sub>安定)



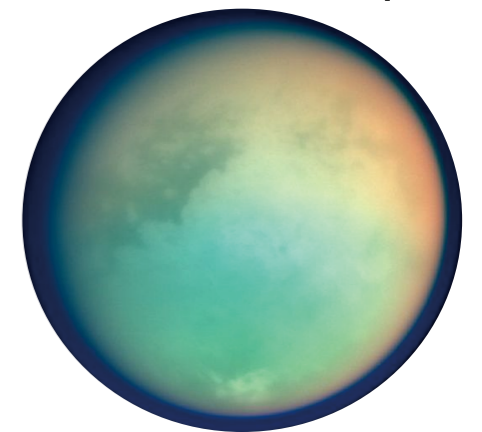
(例) Titan大気中の有機物ヘイズ (McKay+91)

暗い太陽パラドックスと初期地球での有機物ヘイズ? Titanのもや(橙色)

→ habitabilityと密接に関係 (Sagan & Chyba, 1997)

super-Earth GJ 3470b, GJ436bでも?

hot Jupiter HD189733bでhaze存在? (Pont+08)

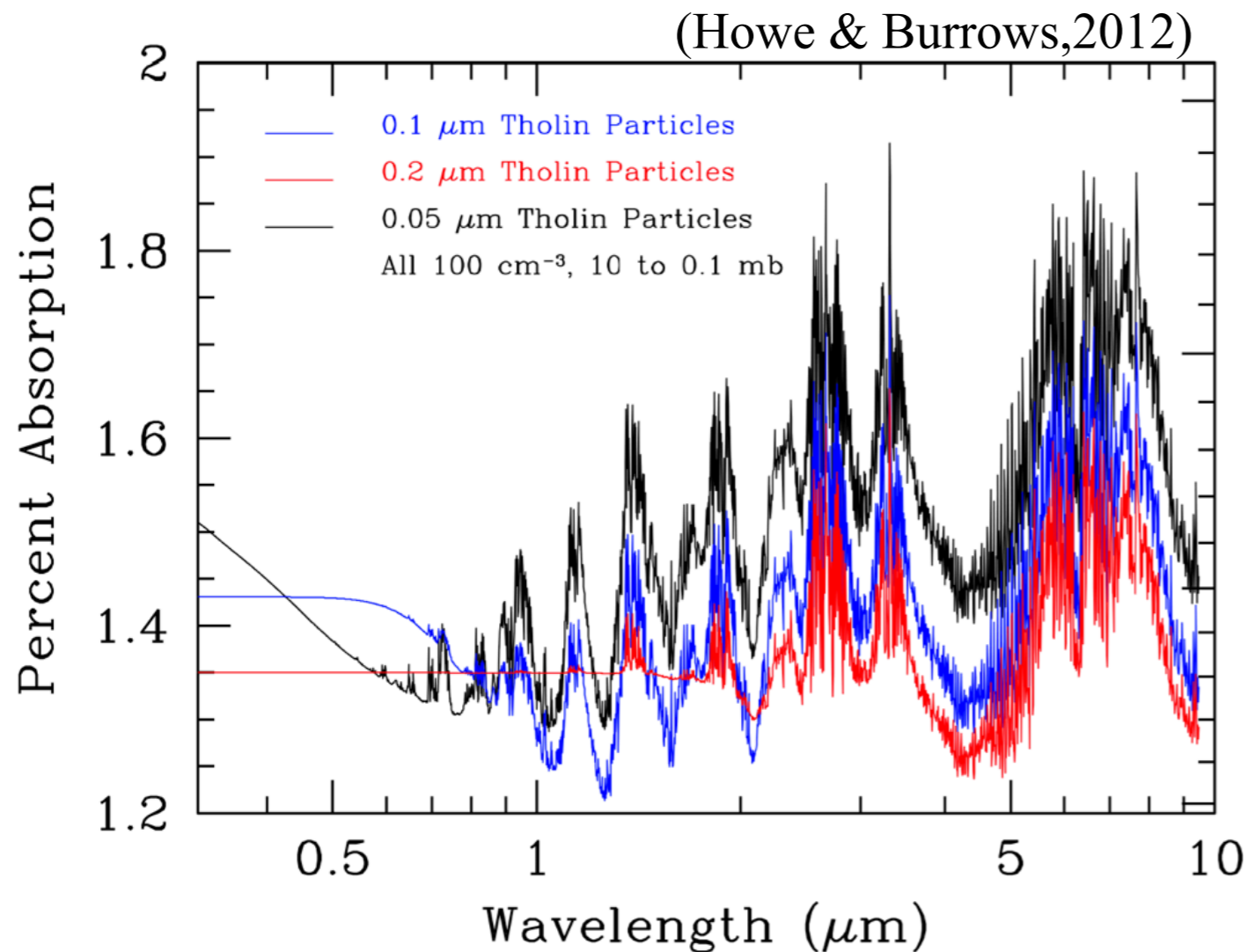
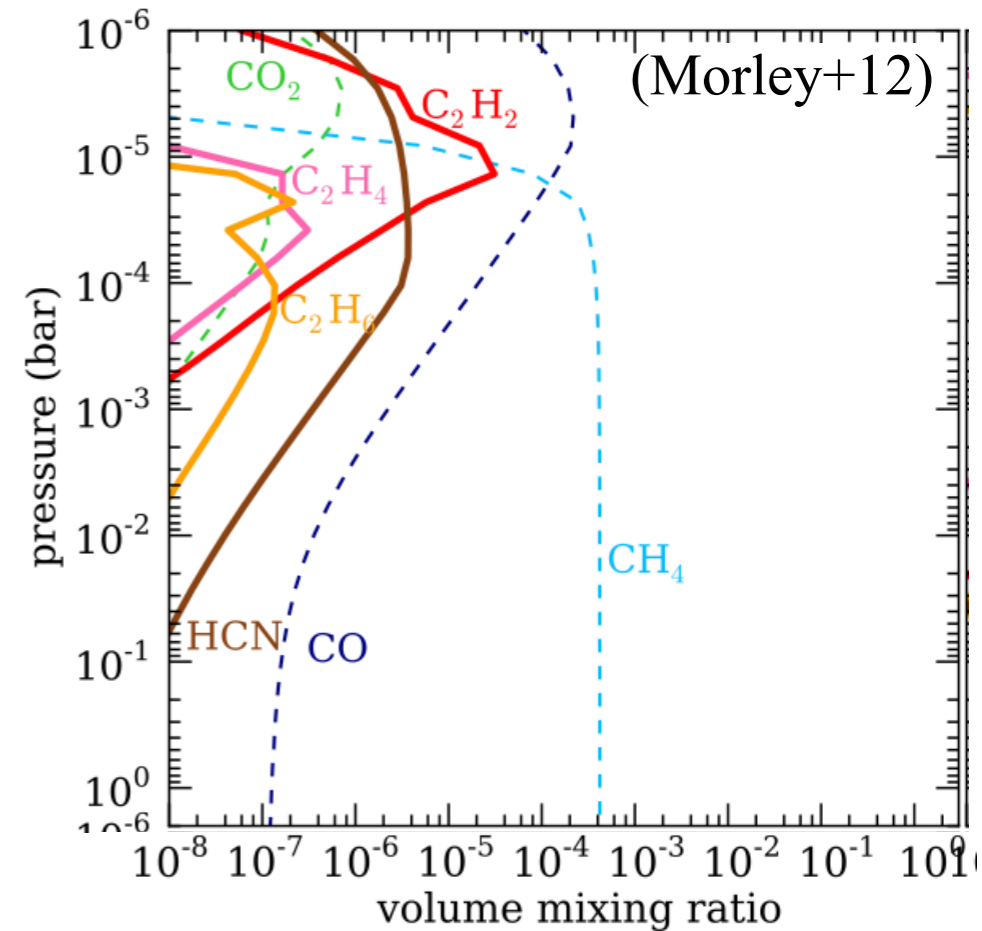


haze層

# Haze Chemistryと大気的光化学

もや(炭化水素haze or soot → **tholin**と総称)  
 → C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, HCN etc 生成

大気上層(P ≦ 1mbar)でのUVによるCH<sub>4</sub>光分解  
 CH<sub>4</sub> ⇌ CO (主に、T < 1000KでCH<sub>4</sub>安定)



## 惑星の大気スペクトル

- (1) CH<sub>4</sub> 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

# 最後に可視光・近赤外線による惑星探査

すばる望遠鏡  
(NIR RV  $\sim 1\text{m/s}$ )



Keck



ESO HARPS-N



岡山観測所



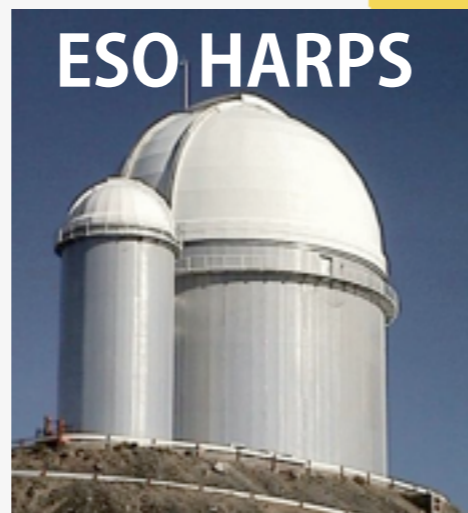
IRSF



MEarth



ESO HARPS

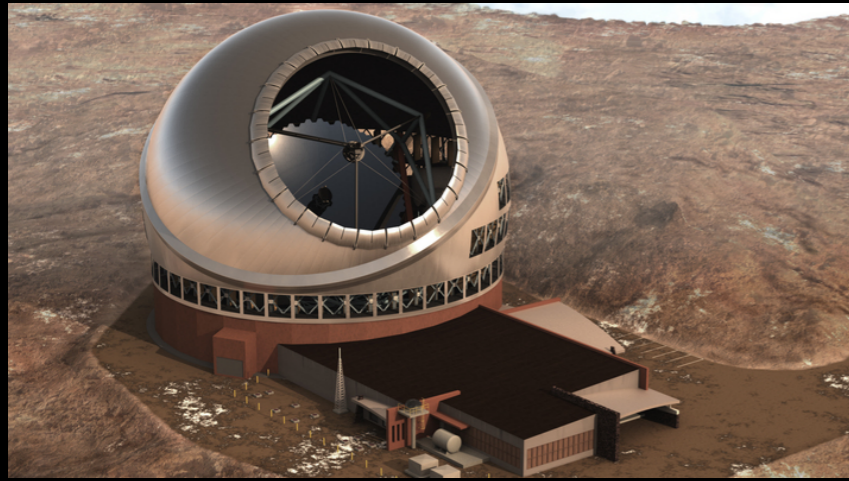


CRILES (NH<sub>3</sub>: NIR RV  $\sim 5\text{m/s}$ )

ESO VLT



# 超大型 地上望遠鏡から惑星探査へ



## Thirty Meter Telescope (TMT)

日本, USA, カナダ, インド, 中国

2014年 建設開始 (2021年 完成予定)

Mauna Kea 山頂@Hawaii

※ Great Magellan Telescope (GMT) @Chile (2020?)

7 x 8.4m mirror (USA, Australia, 韓国)

European Extremely Large Telescope (E-ELT) @Chile (2020年代初め)

直径 39m (ヨーロッパ宇宙機関)

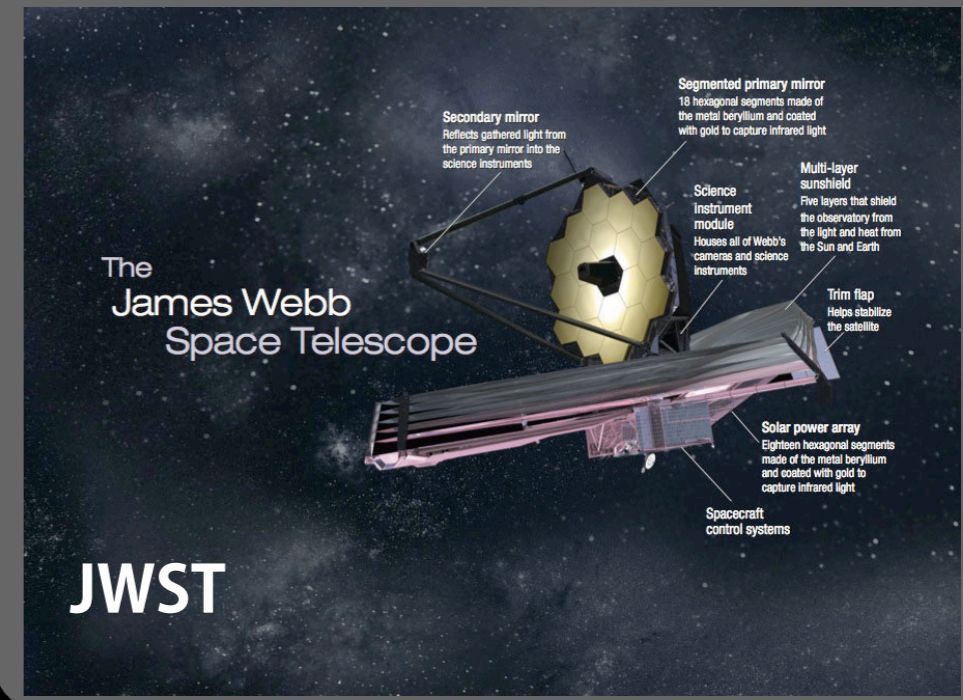
For the Next Generation of Astronomy

# 低温度星周りの宇宙望遠鏡 将来計画

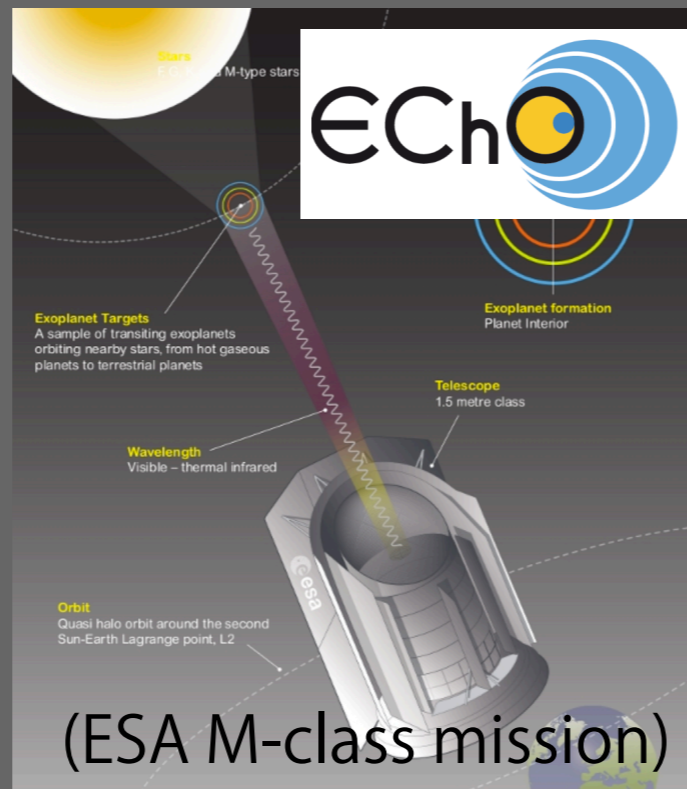
30cm 望遠鏡 (可視光・近赤外)  
2017 打ち上げ (Bern Univ.)



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)

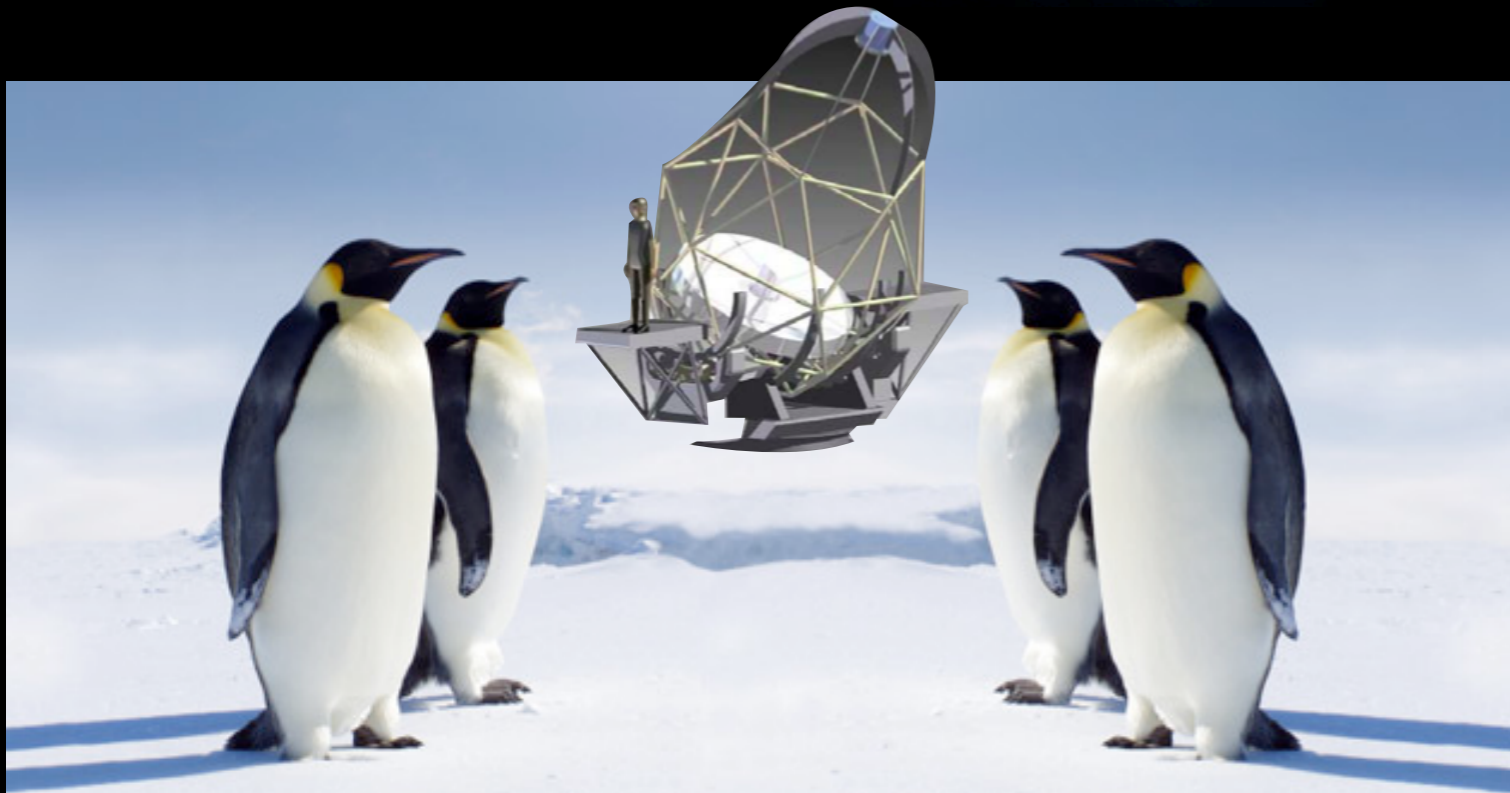
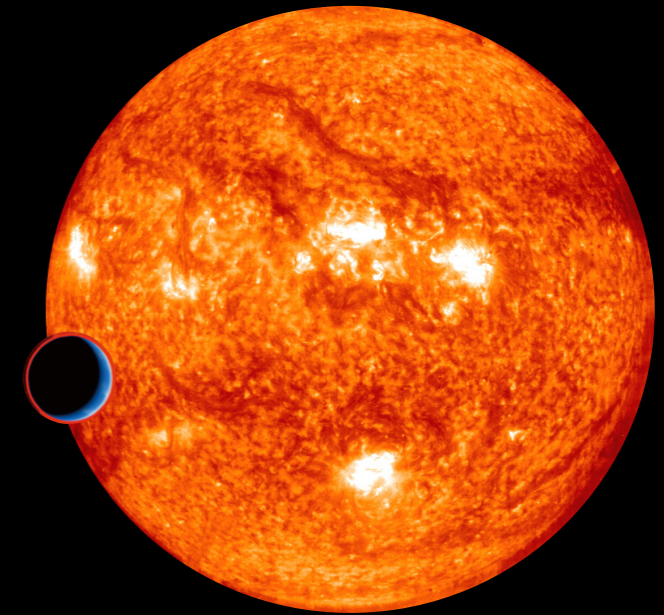
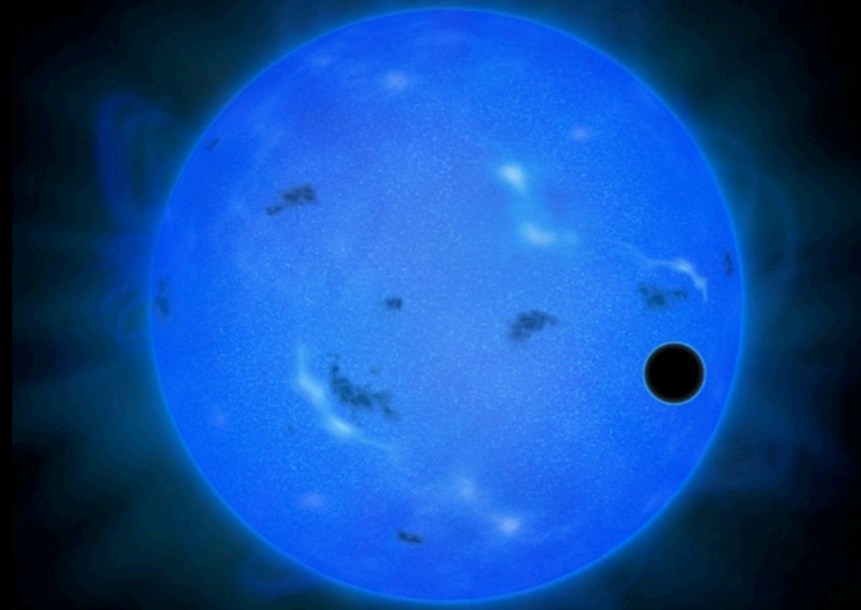


3.5m望遠鏡 (中間赤外線)  
2022 打ち上げ? (JAXA)



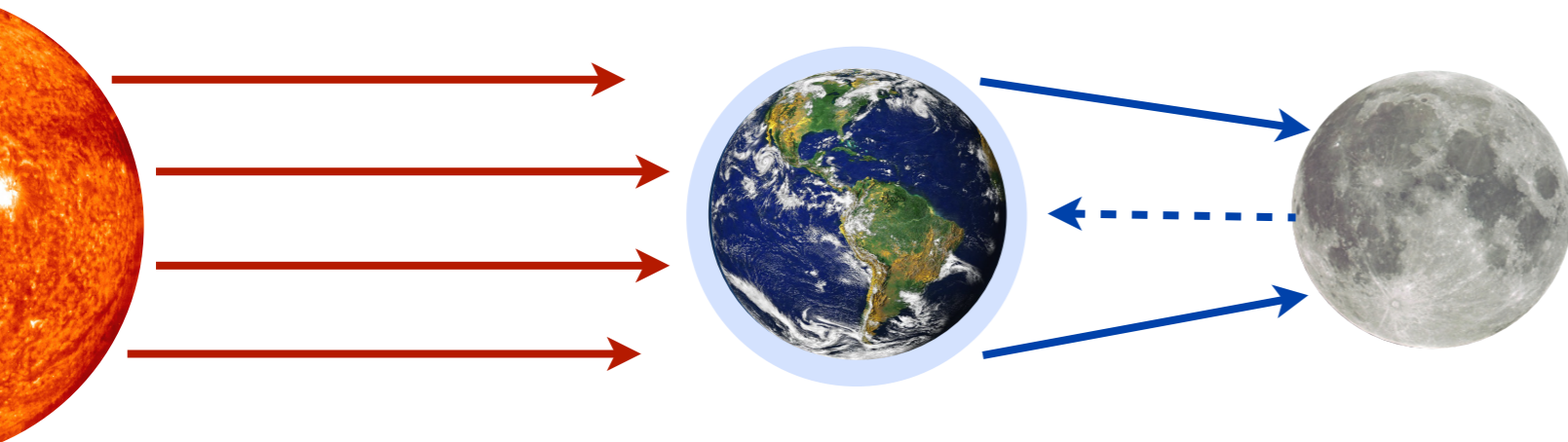


ご清聴ありがとうございました

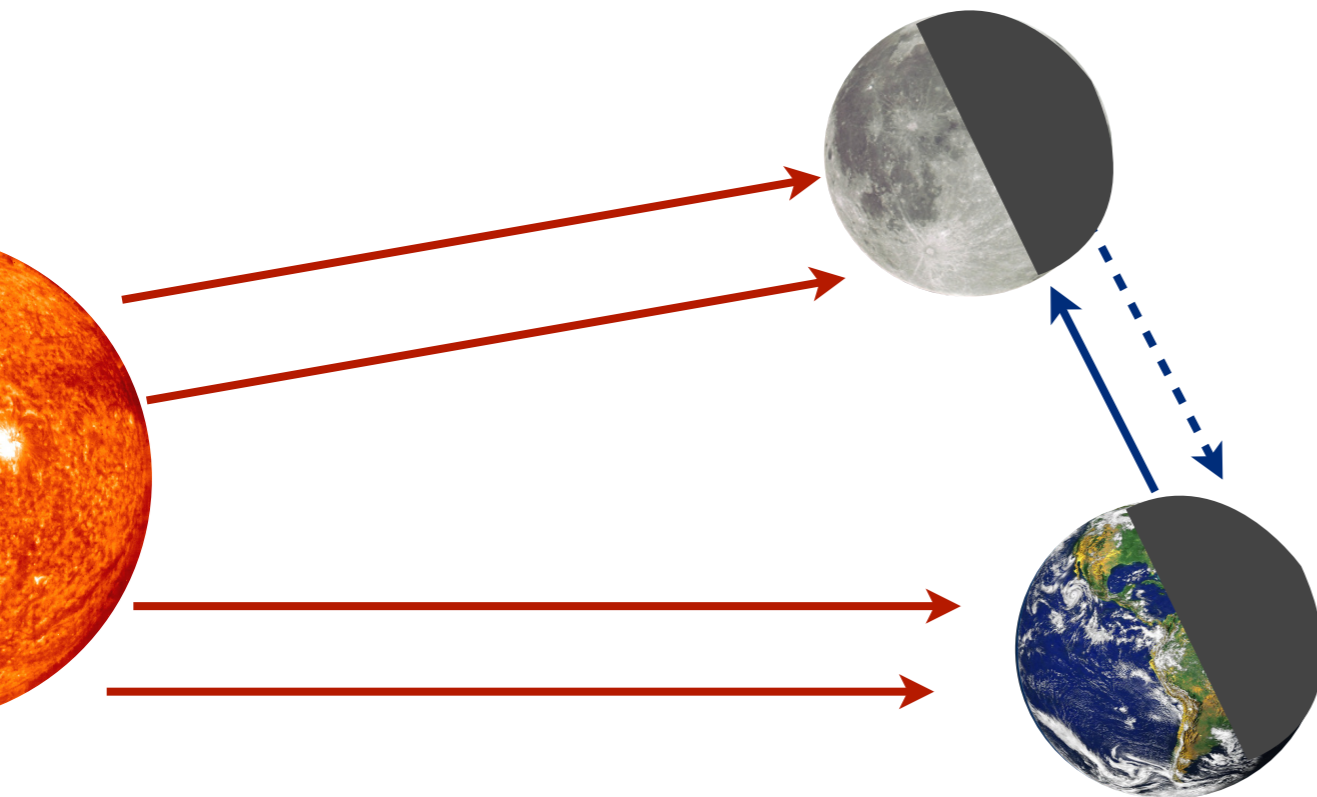


# 地球大気の吸収スペクトル

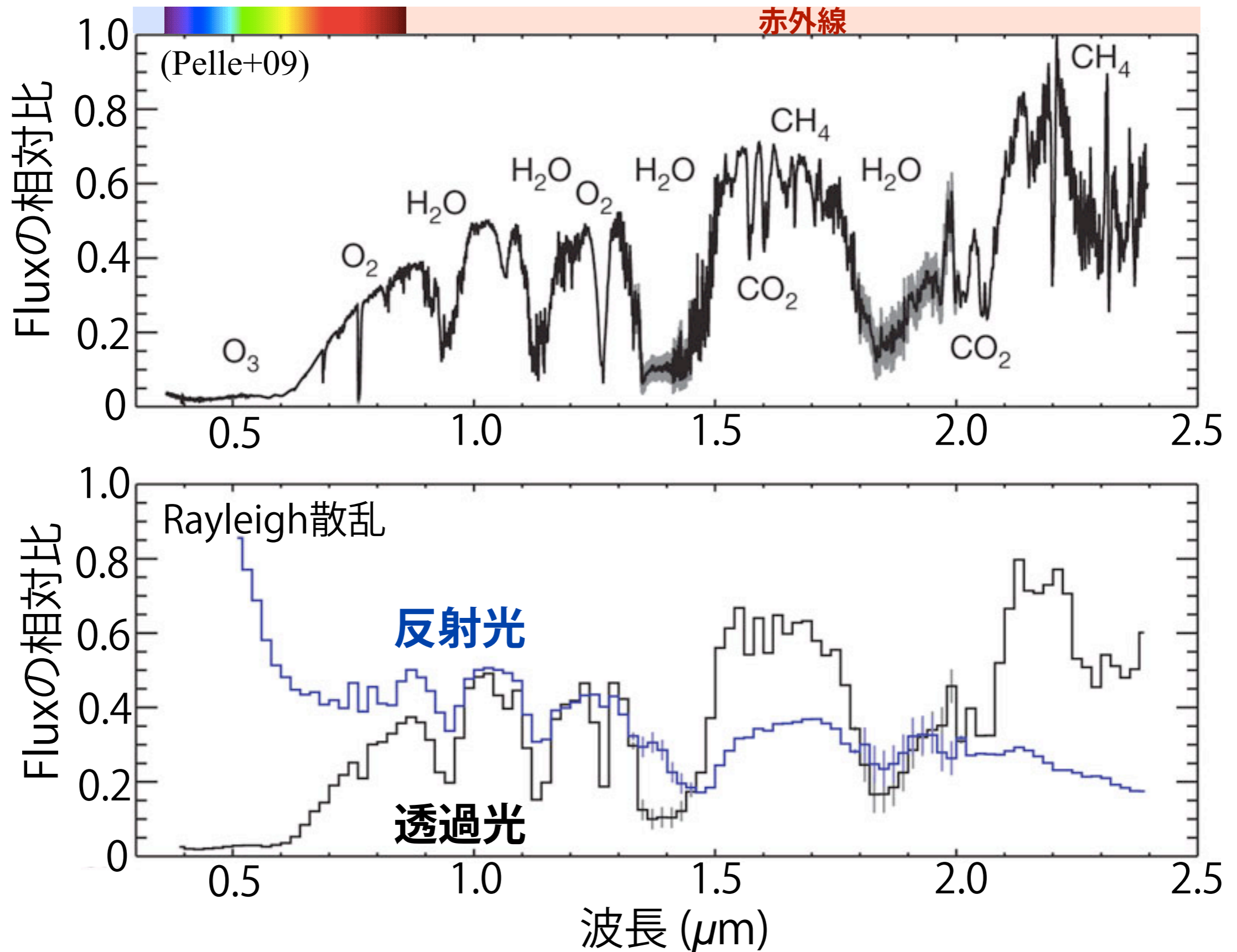
## ■ 月食 --- 地球の透過光



## ■ 地球照 --- 地球の反射光



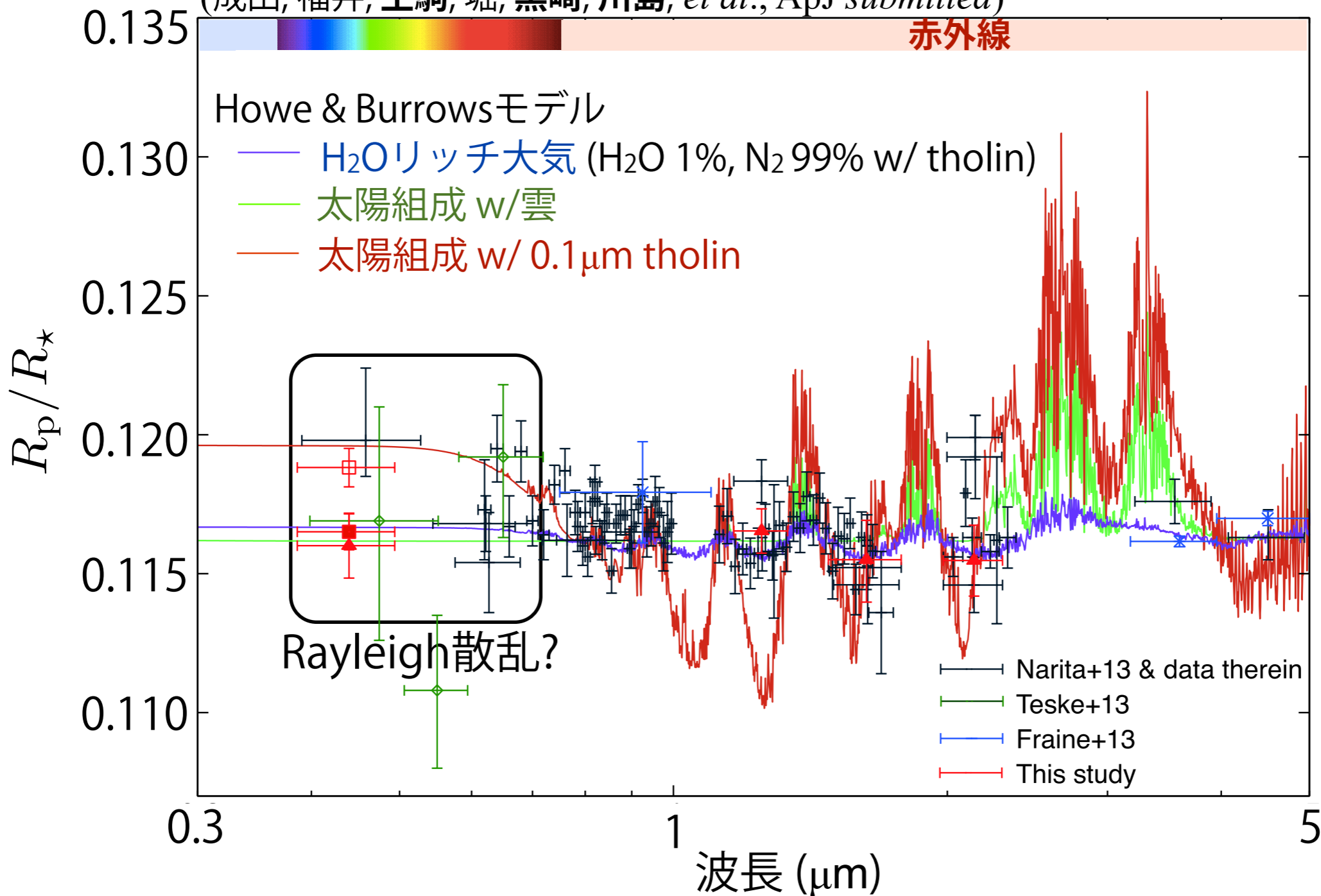
# 地球大気の吸収スペクトル



# 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)

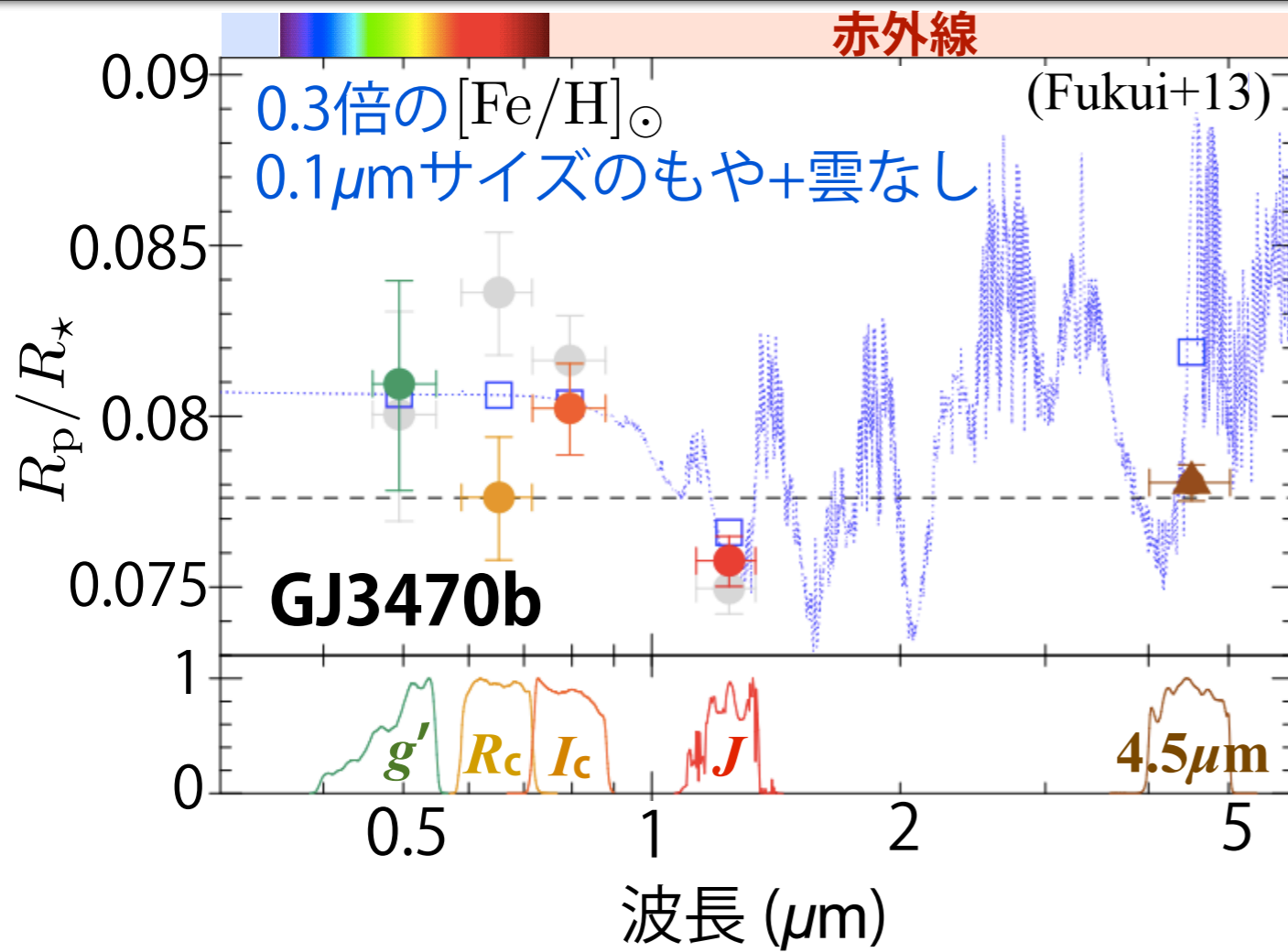
(成田, 福井, 生駒, 堀, 黒崎, 川島, *et al.*, ApJ submitted)



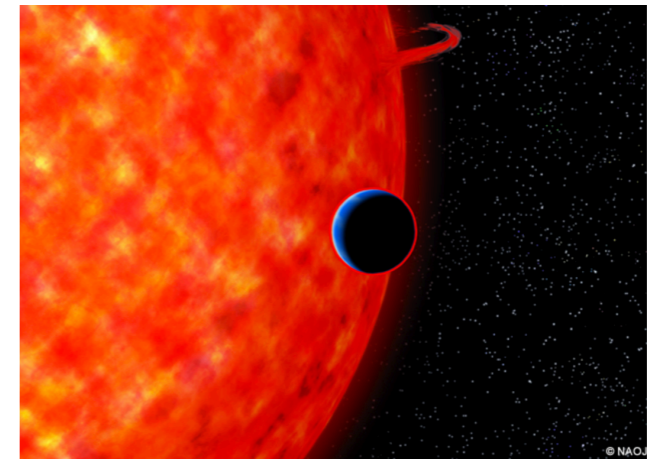
GJ 1214b大気 ---  $\text{H}_2\text{O}$ リッチ大気?  
 $\text{H}_2$ -rich(太陽組成)+雲?

可視領域(B,g-band)での  
追観測が必要

# GJ3470b および GJ436bの大気組成



分厚い雲はない  
10 wt%以下の $\text{H}_2$ -rich大気

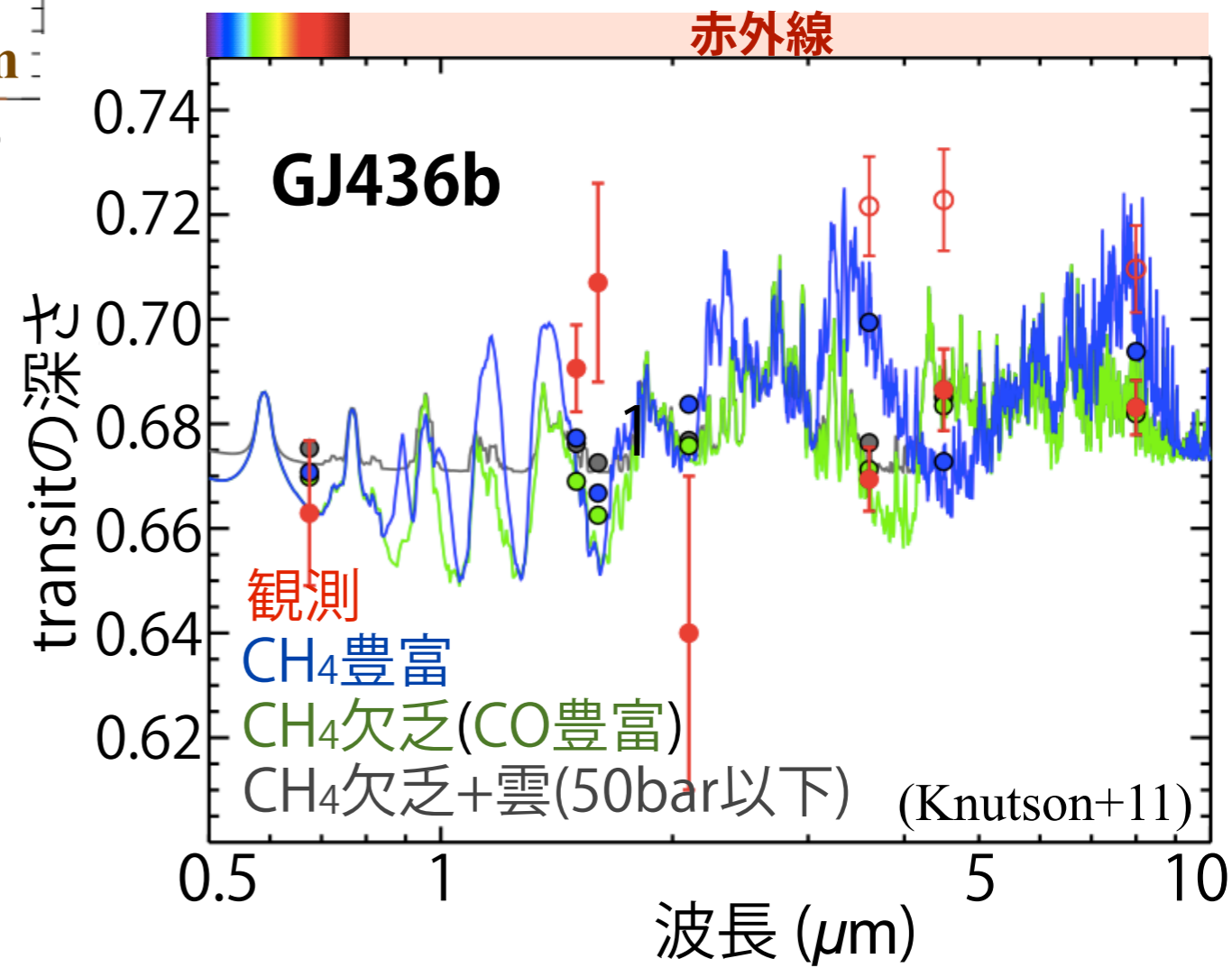


**CH<sub>4</sub>欠乏**な $\text{H}_2$ -rich 大気  
(Stevenson+10;Knutson+11)

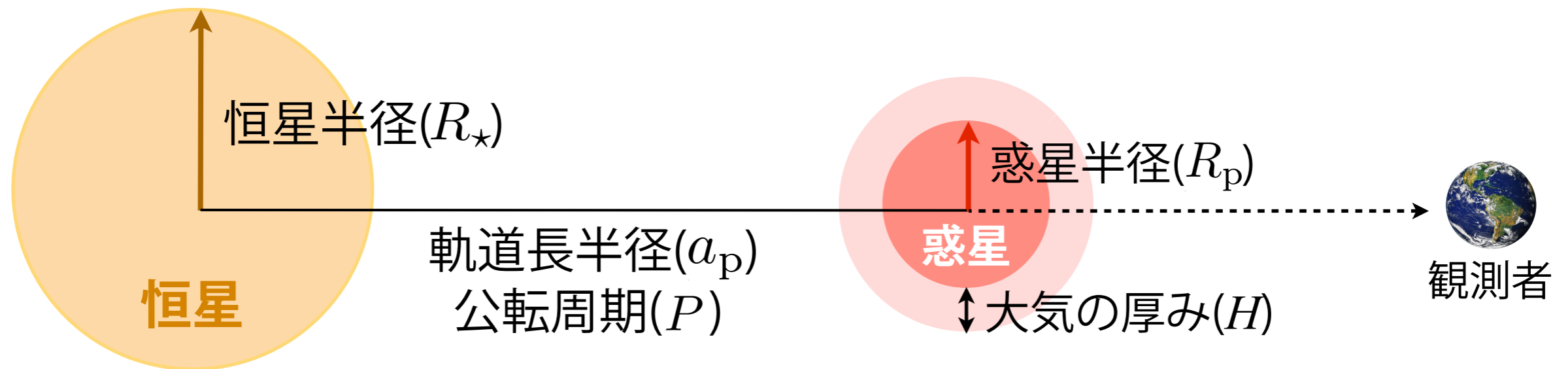
↕

**CH<sub>4</sub>豊富**な $\text{H}_2$ -rich 大気  
(Beaulieu+11)

※ 光化学反応の重要性



# Transit観測の3つの基本量



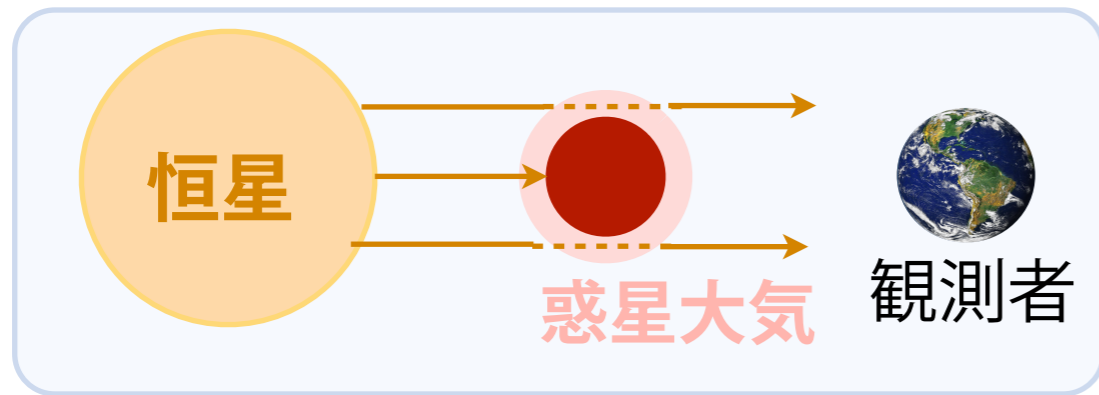
$$\text{transit 確率} \sim \frac{R_*}{a_p} \sim 5 \left( \frac{R_*}{R_\odot} \right) \left( \frac{a_p}{0.1 \text{AU}} \right)^{-1} (\%)$$

$$\text{transitの深さ} \sim \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2 \sim 0.01 \left( \frac{R_p}{R_\oplus} \right)^2 \left( \frac{R_*}{R_\odot} \right)^{-2} (\%)$$

$$\text{transitの継続時間} \sim \frac{P}{\pi} \left( \frac{R_*}{a_p} \right) \sim 20 \left( \frac{R_*}{R_\odot} \right) \left( \frac{a_p}{0.1 \text{AU}} \right)^{-1} \left( \frac{P}{1 \text{day}} \right) (\text{分})$$

# 惑星大気・表層を知る3つの光

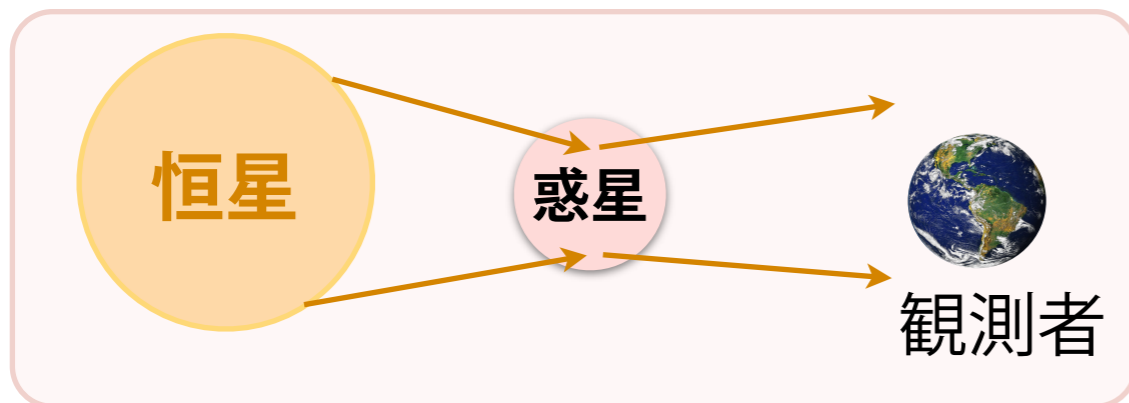
## (1) 惑星大気の透過光



Fluxの強度(比) @波長  $\lambda$

$$\frac{F_p}{F_\star} \approx \frac{2R_p H}{R_\star^2} \sim 3 \times 10^{-7} \left( \frac{R_p}{R_\oplus} \right) \left( \frac{R_\star}{R_\odot} \right)^{-2} \left( \frac{H}{10\text{km}} \right)$$

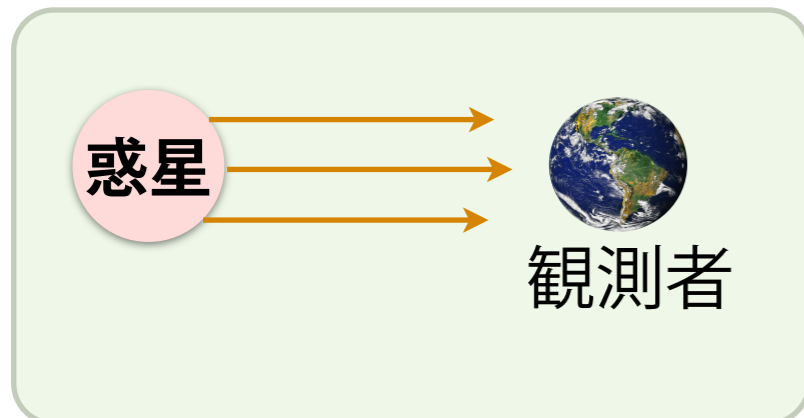
## (2) 惑星の反射光



Fluxの強度(比) @波長  $\lambda$

$$\frac{F_p}{F_\star} = A_\lambda \left( \frac{R_p}{a_p} \right)^2 \sim 10^{-17} \left( \frac{A_\lambda}{0.4} \right) \left( \frac{R_p}{R_\oplus} \right)^2 \left( \frac{a_p}{1\text{AU}} \right)^{-2}$$

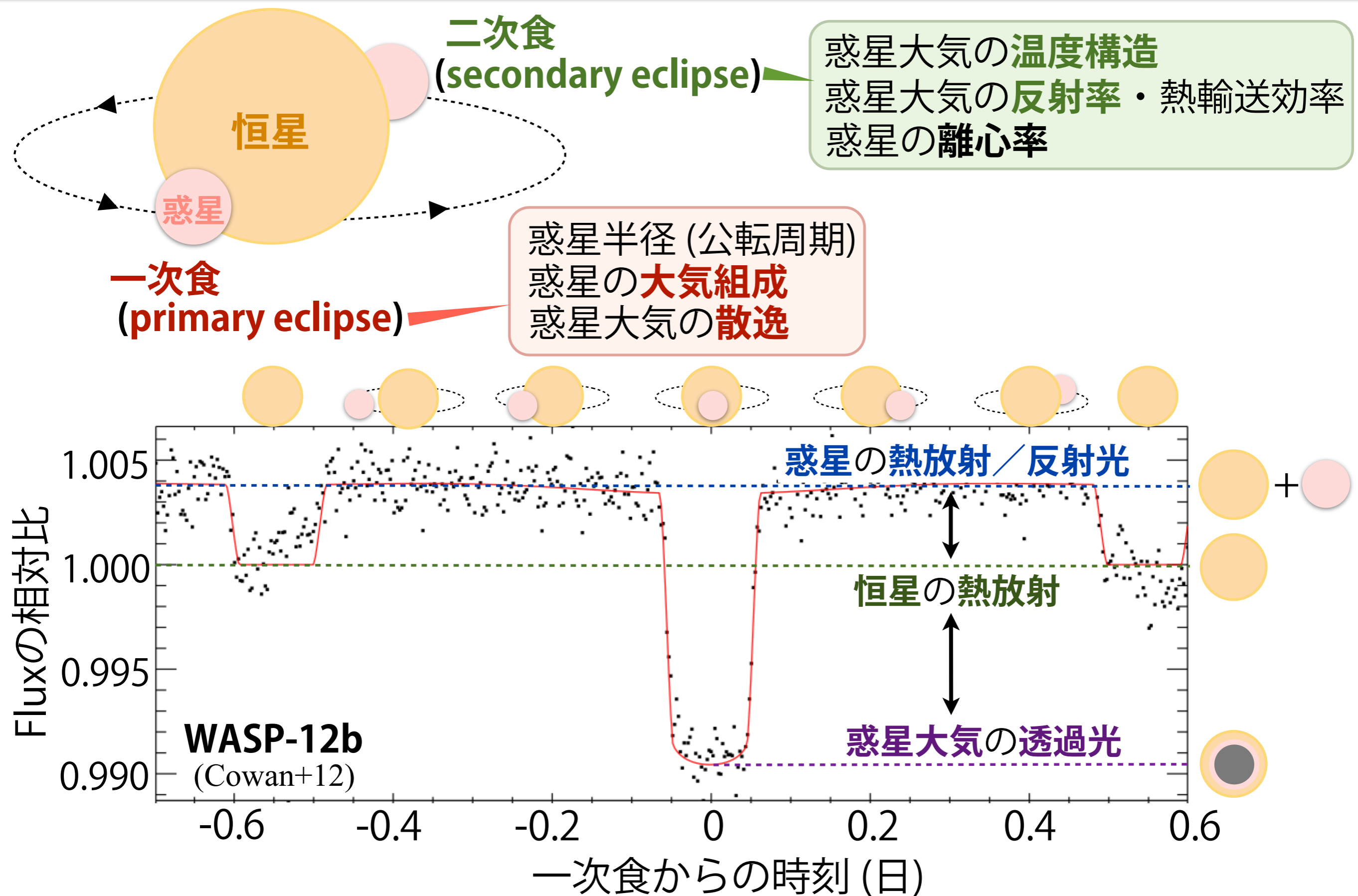
## (3) 惑星自身の熱放射



Fluxの強度(比) @波長  $\lambda$

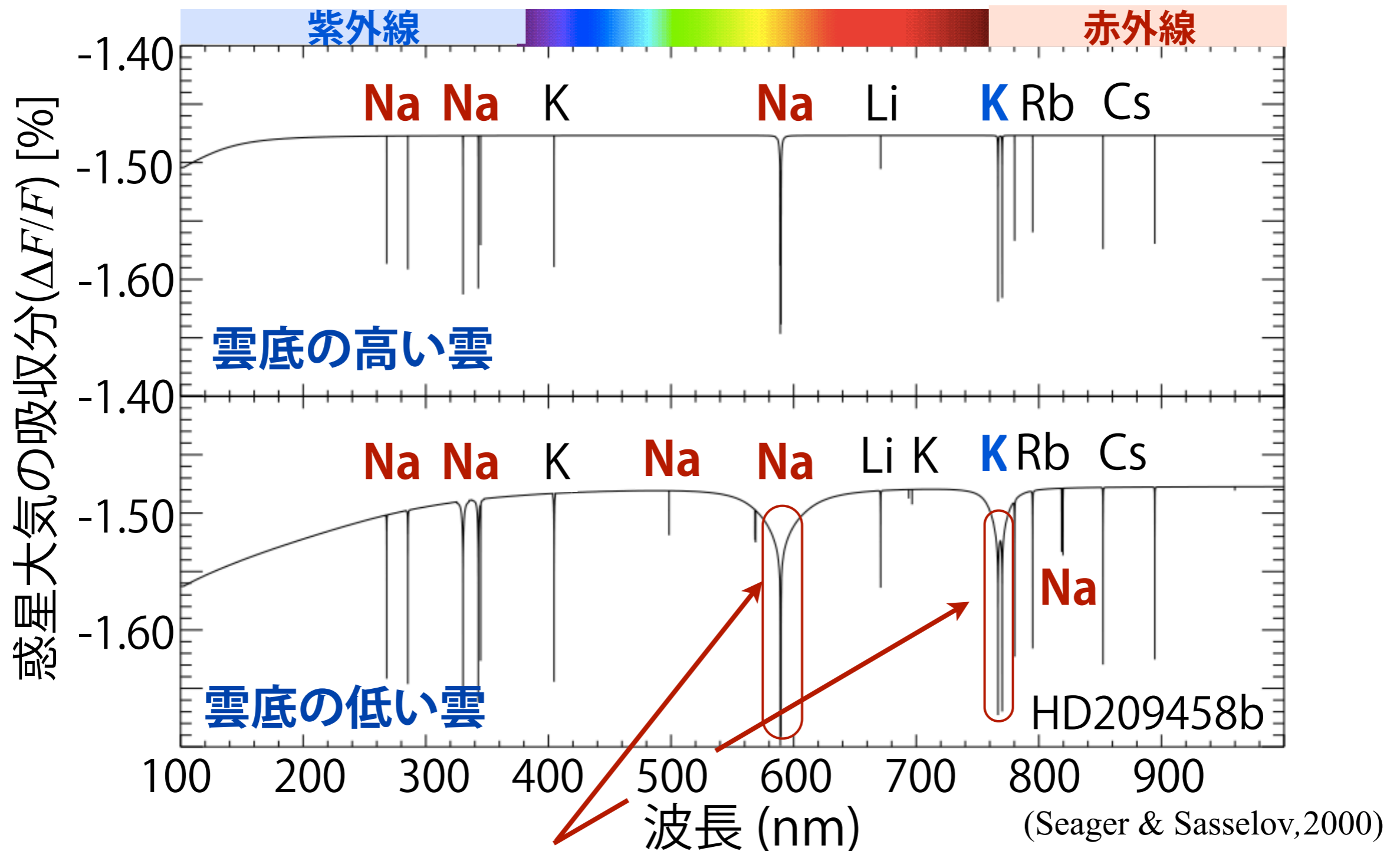
$$\frac{F_p}{F_\star} \sim \frac{T_{\text{eq}}^p}{T_{\text{eff}}^\star} \left( \frac{R_p}{R_\star} \right)^2 \sim 4 \times 10^{-6} \left( \frac{T_{\text{eq}}^p}{300\text{K}} \right) \left( \frac{T_{\text{eff}}^\star}{6000\text{K}} \right)^{-1} \left( \frac{R_p}{R_\oplus} \right)^2 \left( \frac{R_\star}{R_\odot} \right)^{-2}$$

# Transit観測から見る惑星の姿





# 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Rayleigh散乱: 圧力broadening

# 適度な水を持つSub/Super-Earthは少ない？

『30倍の地球質量以下の固体惑星(岩石/H<sub>2</sub>O)』

水の存在量 (wt%)

