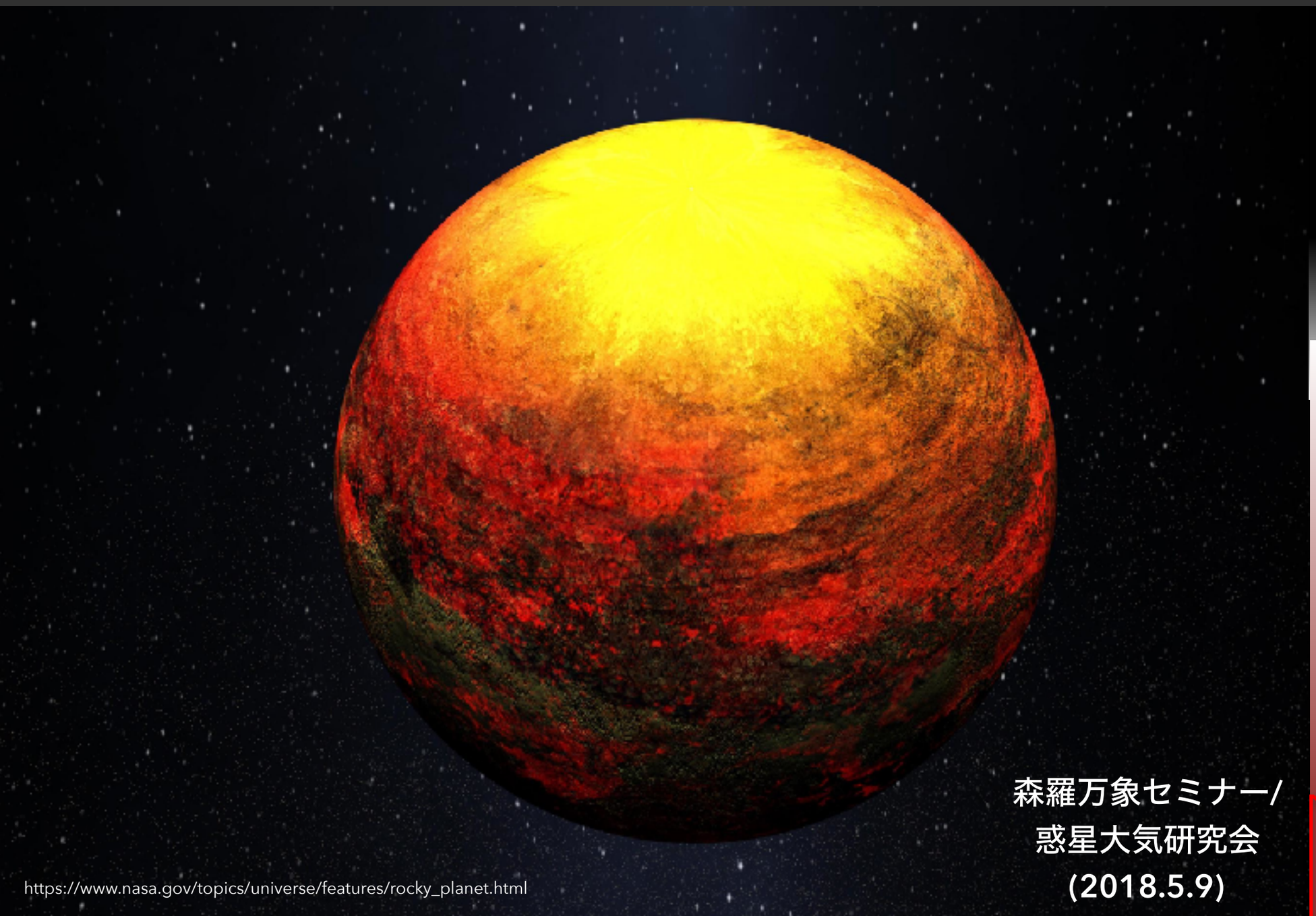
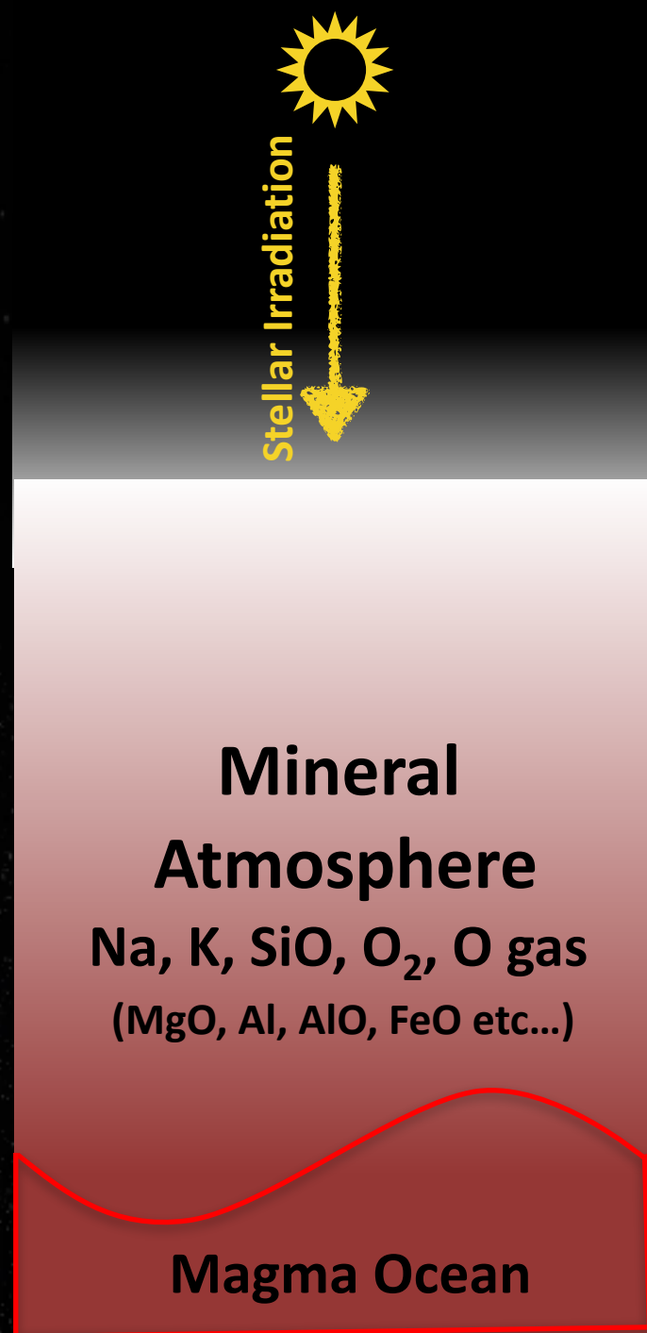
主星近傍岩石系外惑星のミネラル大気：
鉛直構造・放射光検出可能性の理論推定

伊藤　祐一（北大 倉本研PD）



https://www.nasa.gov/topics/universe/features/rocky_planet.html

森羅万象セミナー/
惑星大気研究会
(2018.5.9)



目次

- ✓ 背景：主星近傍岩石系外惑星・ミネラル大気とは

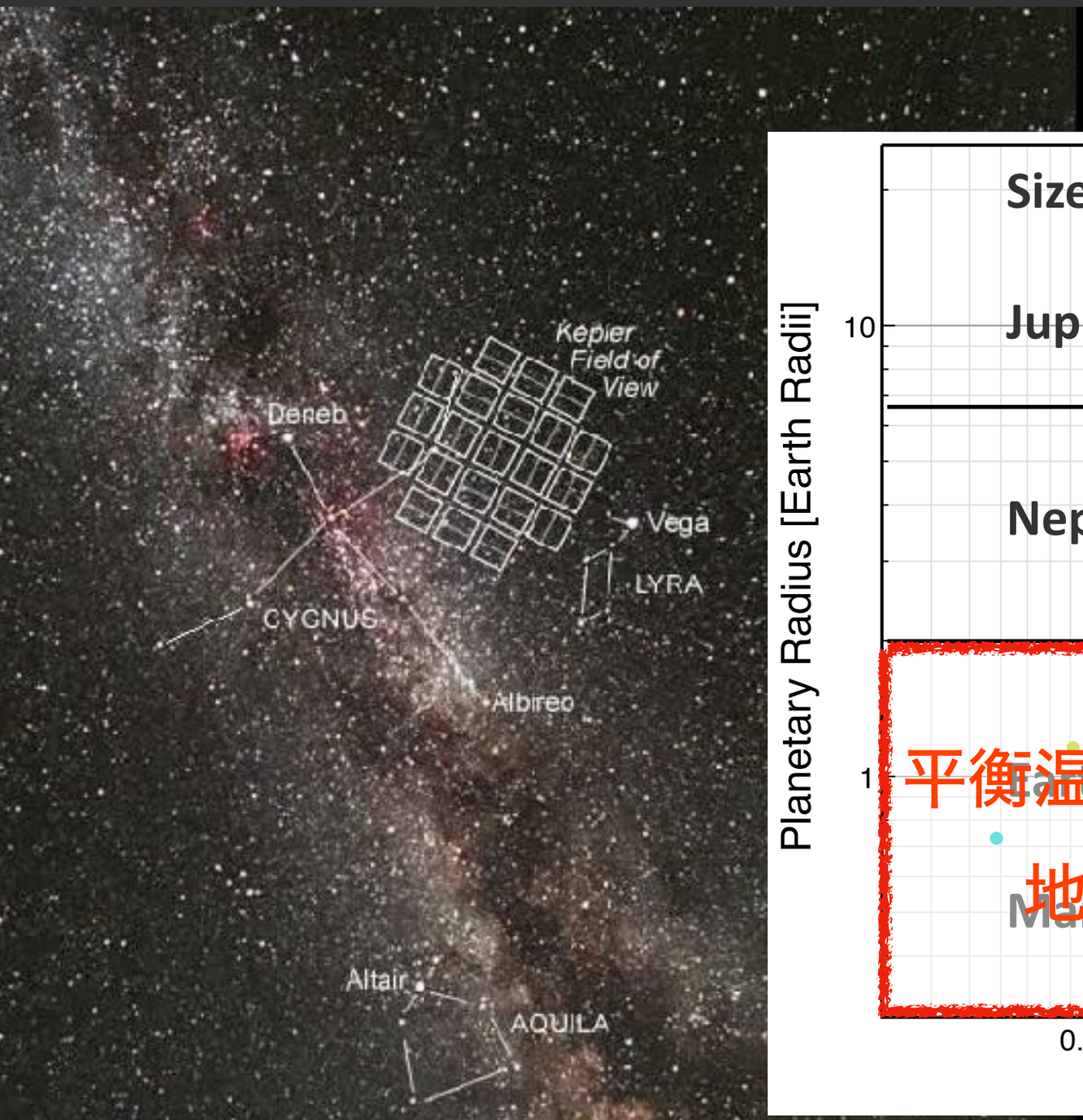
- ✓ Ito et al. (2015)のレビュー

  主星近傍岩石惑星 (HRE)が持つミネラル大気を想定した、

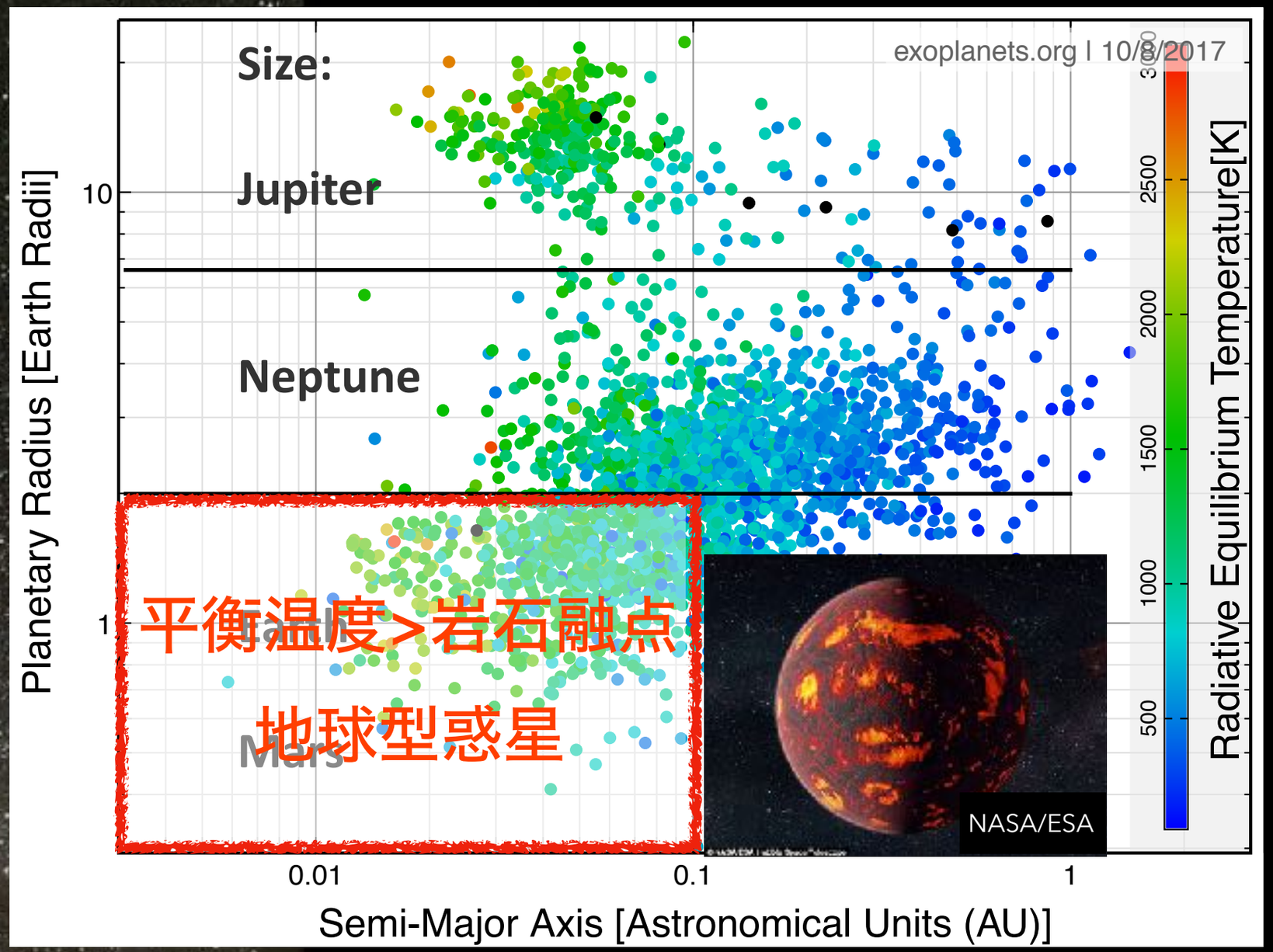
  — 大気モデルの構築、温度構造・放射スペクトルの推定

- ✓ 議論：最近の観測・理論検討について

観測された系外惑星



系外惑星分布



様々な軌道・サイズを持つ惑星が発見されている

主星近傍地球型惑星の形成過程

・近年の惑星形成モデル

原始惑星系円盤

↓

微惑星形成

↓

原始惑星形成

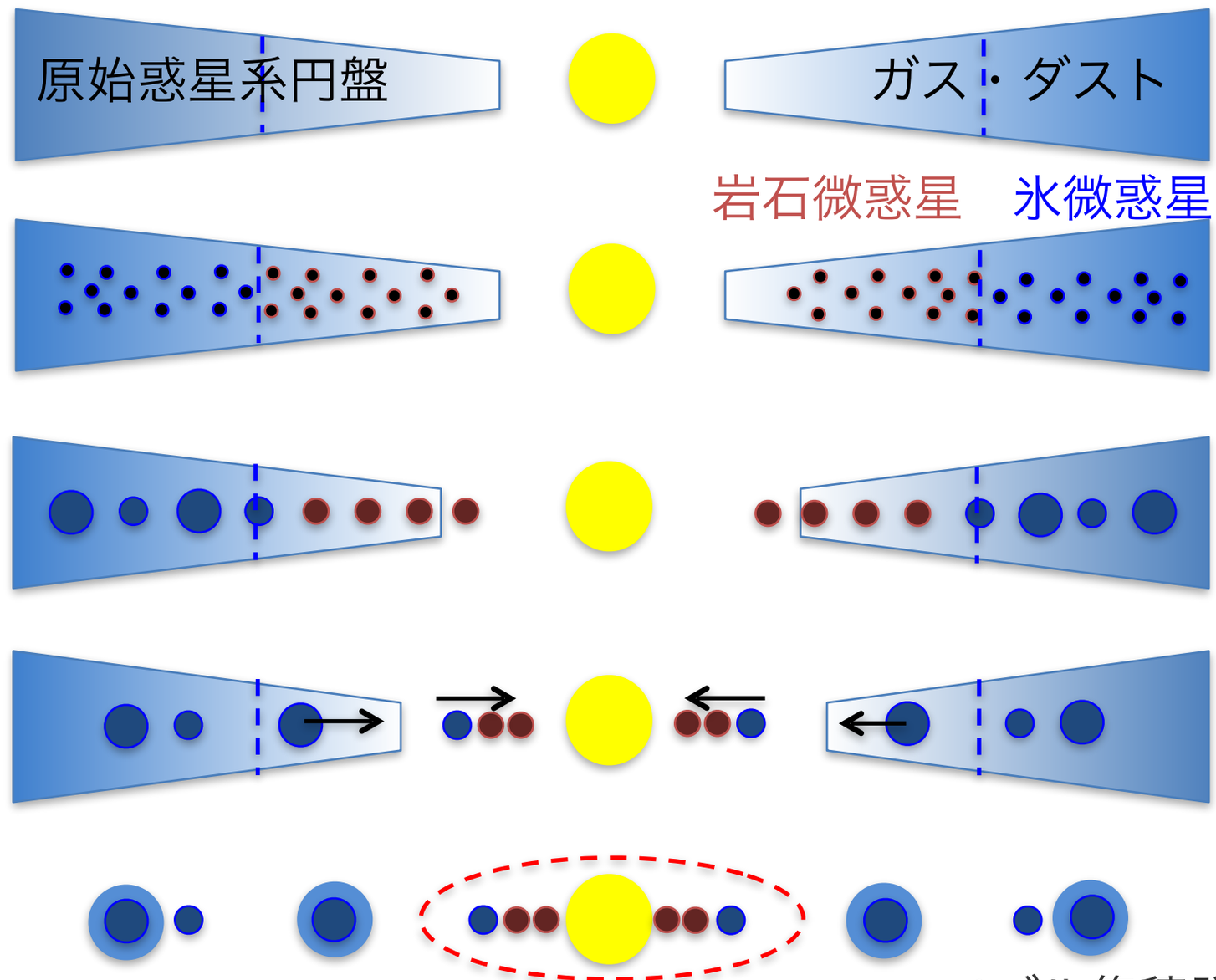
↓

惑星移動

(円盤惑星間相互作用)

↓

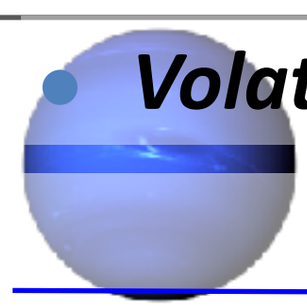
円盤ガス散逸



*ペブル集積説もある

Rocky Vapor Atmosphere

Rocky planet



Volatile-rich Atmosphere

Water-rich planet

観測背景と系外惑星大気の研究

- 系外惑星大気観測

～厚い大気から薄い大気へ～

2002年：**Hot Jupiter**

太陽組成大気

Charbonneau et al. (2002) etc…

2010年：**Hot Neptune**

太陽組成・水蒸気大気

Bean et al. (2010) etc…

2016年：**Hot super-Earth**

岩石蒸気大気（？）

Demory et al. (2016) etc…

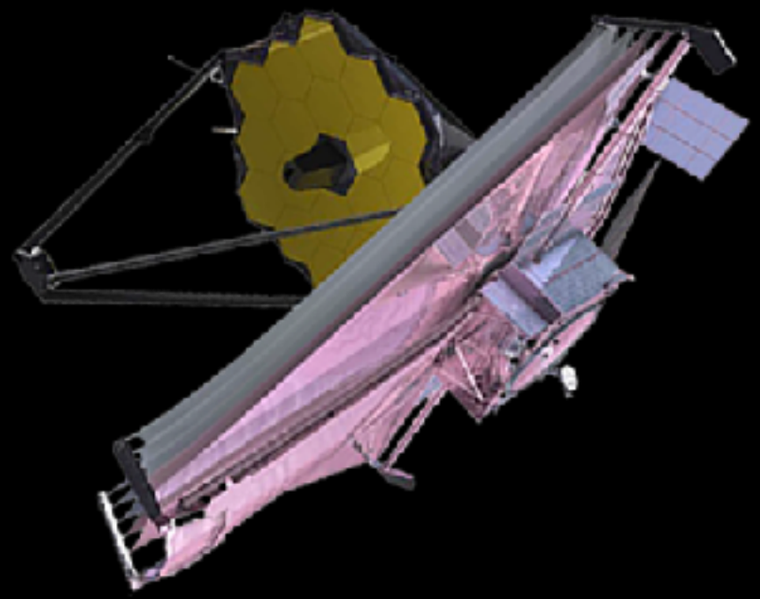
今後：大型宇宙望遠鏡観測

(TESS-2017年、JWST-2020年)

TESS (2018年)

：全天惑星観測

http://explorers.gsfc.nasa.gov/ex.html#tess



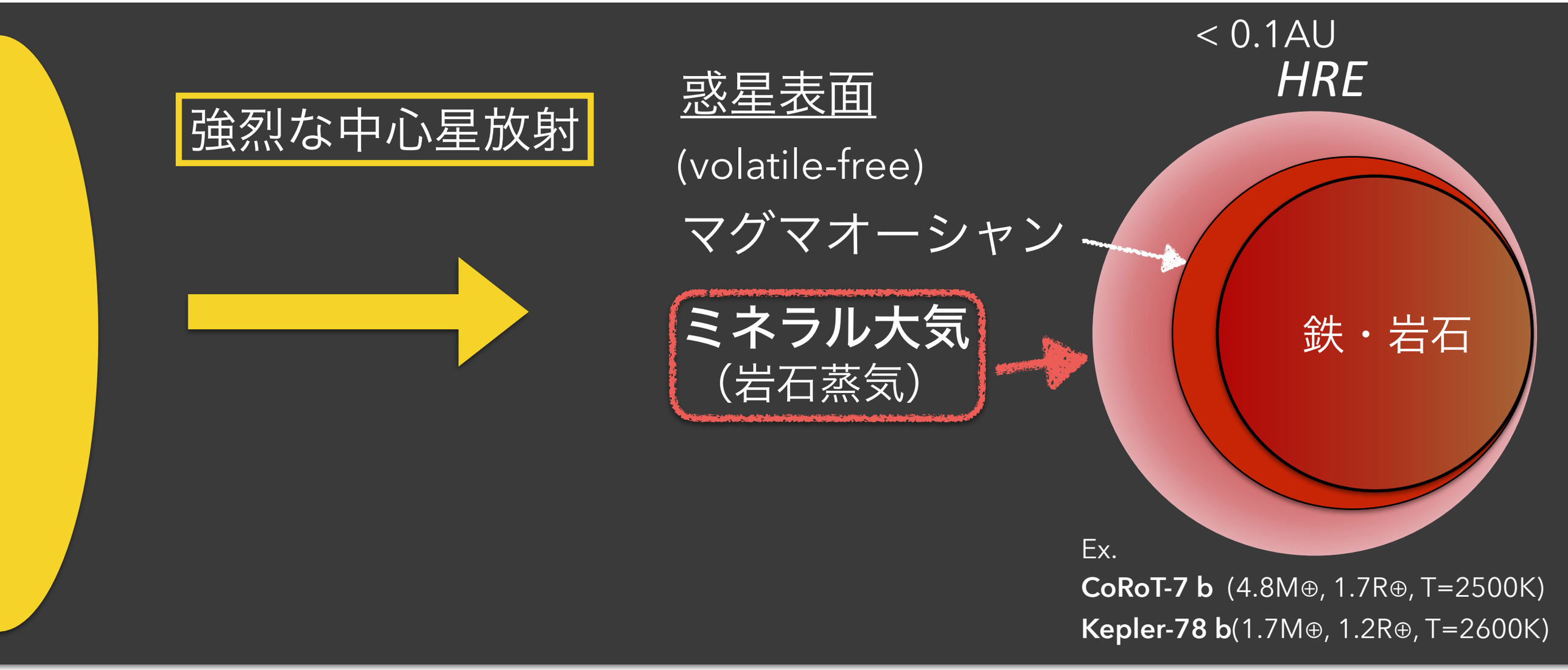
JWST (2020年)

：広波長域・高解像度の惑星大気観測

HRE: Hot Rocky Exoplanet (Super-Earth)

放射平衡温度 > 岩石溶融温度（~1500K）

岩石惑星と考えられる質量・半径　　を持つ系外惑星



Schaefer & Fegley 2009

HREは主星近傍にあるため、**ミネラル大気**（岩石蒸気）を持つ

ミネラル大気の理論研究

HRE

- ***Mineral Atmospheres***
  - Schaefer & Fegley, (2009)：揮発性元素の無いマグマ気液平衡組成推定
    - 主要大気成分：Na, O, O_2, SiO
    - 蒸気圧：10^{-7}bar（1500K）～10^{-1}bar（3000K）

(Schaefer et al., 2012; 揮発性元素を含むマグマ気液平衡計算→Volatile-rich)

✓大気の鉛直構造が考慮されていない
- 大気構造は地表マグマ温度に影響し、気体組成を変えうる

✓理論モデルスペクトルが推定がされていない
- 観測比較による大気組成推定・惑星起源への制約ができない

◇ ミネラル大気について、
吸収物質から明らかにしなくてはならない

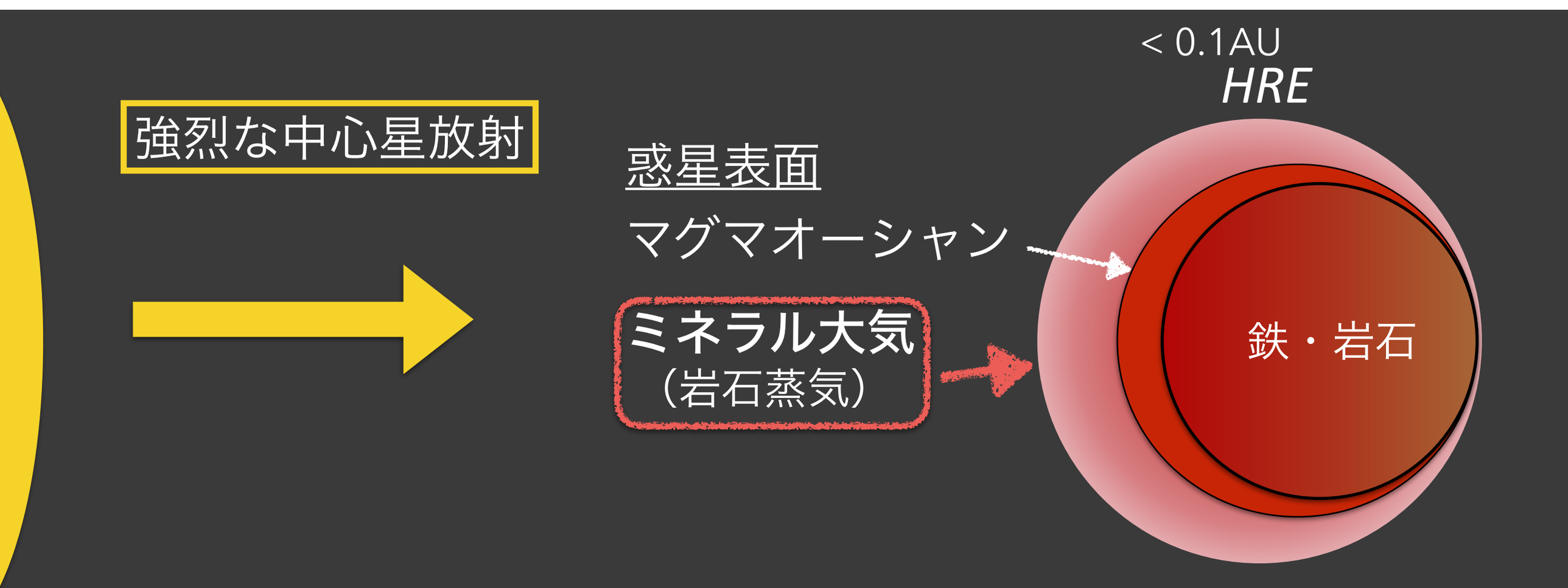
目次

✓ Ito et al. (2015)のレビュー

Hot Rocky Exoplanet (HRE）が持つミネラル大気を想定し、

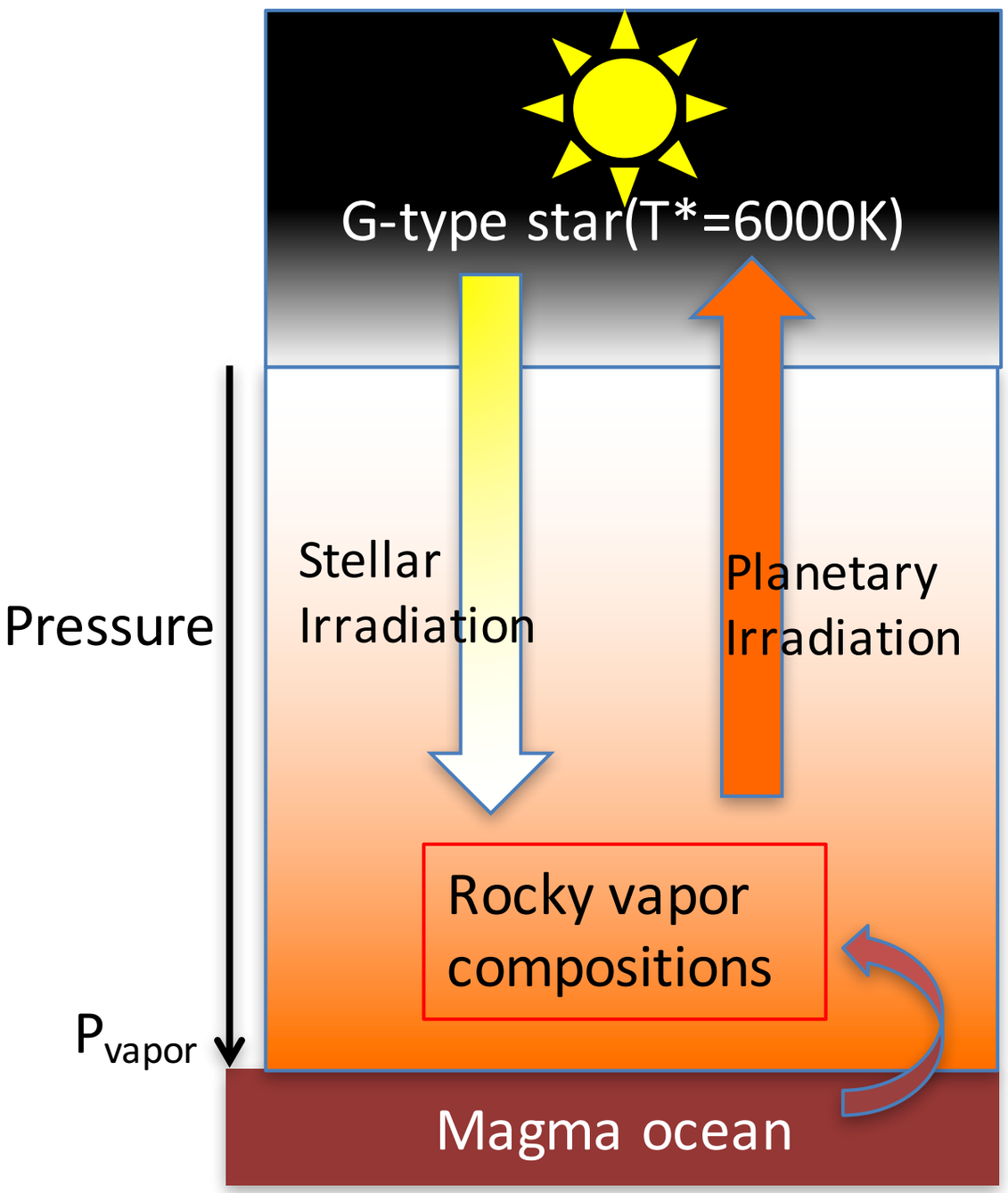
ー 大気モデルの構築、温度構造・放射スペクトルの推定

✓ 議論：最近の観測・理論検討について



大気モデル

1D atmospheric model
(Ito et al. 2015)



Assumptions

- ***Planetary properties***

  $2R_{earth}$, $10M_{earth}$, $R_*=R_{sun}$, $T_*=6000K$

- ***Magma ocean surface***

  Volatile-free Bulk Silicate Earth (BSE)
  (McDonough and Sun 1995)

- ***Gas-melt equilibrium composition***

  MELTS model (Ghiorso & Sack 1995)
  CEA code (Gordon & McBride 1996)

- ***Hydrostatic equilibrium***
- ***Local thermal equilibrium***
- ***Radiative equilibrium***

基礎方程式

- 静水圧平衡の式

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \therefore \frac{d\tau_\upsilon}{dP} = \frac{\kappa_\upsilon}{g} = \frac{\sigma_\upsilon}{\bar{m}g}$$

z:高度、ρ：密度、g：表面重力

τ：光学的厚さ、σ：吸収断面積

m：１分子平均質量

- 輻射輸送方程式(二流方程式): Toon et al., (1989)

$$\frac{\partial F_\upsilon^+}{\partial \tau_\upsilon} = \frac{7}{4}F_\upsilon^+ - \frac{1}{4}F_\upsilon^- - 2\pi B_\upsilon(\tau_\upsilon)$$

$$\frac{\partial F_\upsilon^-}{\partial \tau_\upsilon} = -\frac{1}{4}F_\upsilon^+ - \frac{7}{4}F_\upsilon^- + 2\pi B_\upsilon(\tau_\upsilon)$$

$$F_\upsilon^*(\tau_\upsilon) = \mu_* F_\upsilon^*(\tau_\upsilon = 0)\exp(-\tau_\upsilon / \mu_*)$$

ν：振動数（100グリッド）

$F^\pm$：上（下）向き輻射

F^*：恒星輻射

B：プランク関数

μ_*:恒星フラックス入射角度

- 吸収断面積：Unsold (1955), Gray (1976)

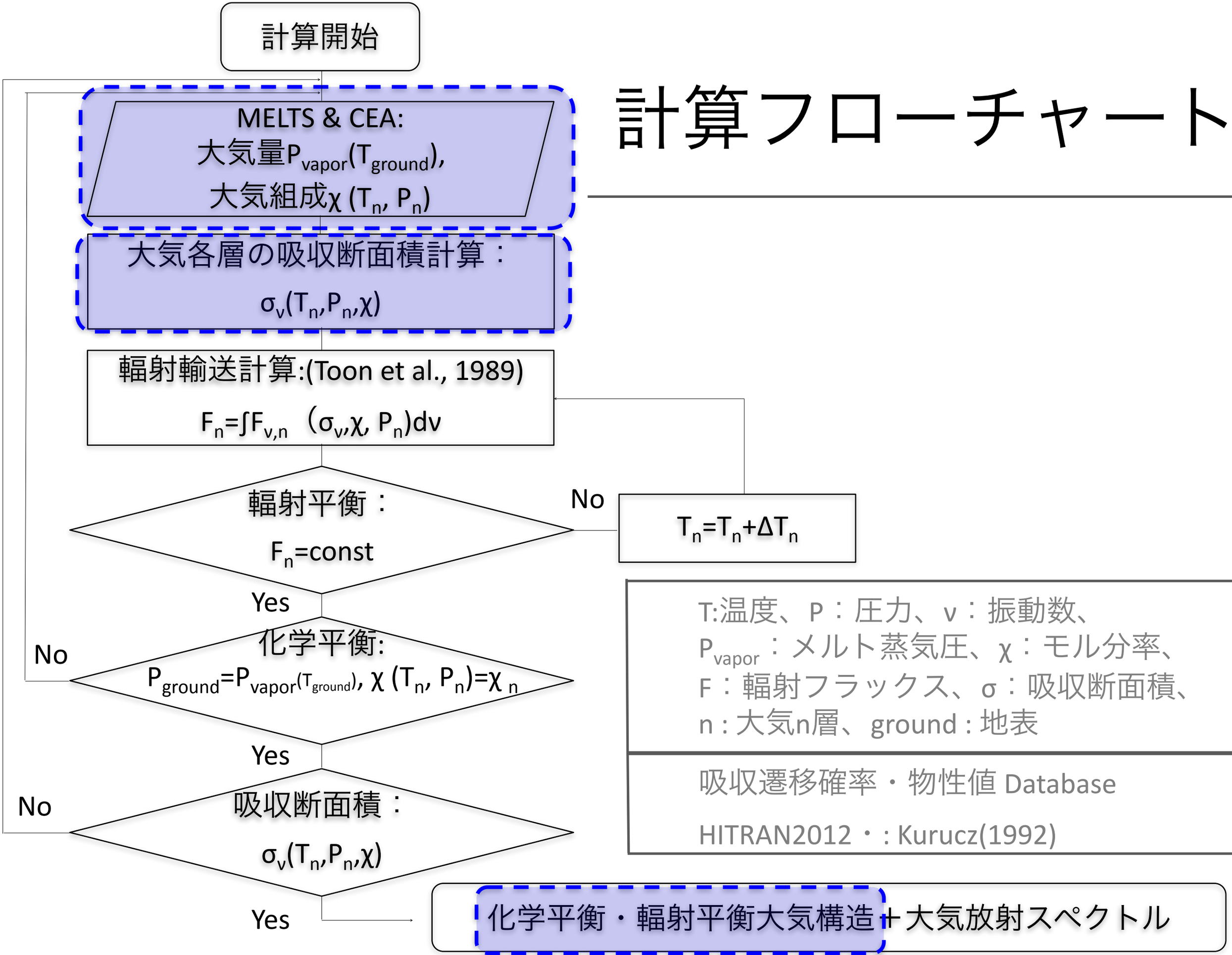
$$a = (\gamma_R + \gamma_W)/4\pi\Delta\upsilon_D, \Delta\upsilon_D = \frac{\upsilon_0}{c}v, v = \left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2}$$

$$\gamma_R = 0.22\times10^{14}/\lambda[nm]^2, \gamma_W = 17\times C_6^{2/5}v^{3/5}N$$

$$\sigma_{(\upsilon)} = \sum_{i,j}\frac{\pi^{1/2}e^2}{m_e c\Delta\upsilon_D} f_{i,j}\frac{g_i\exp(-E_i/kT)}{\sum_l g_l\exp(-E_l/kT)}(1-\exp(-h\upsilon_{i,j}/kT))Voigt(\upsilon-\upsilon_{i,j}, a)$$

吸収線強度　分配関数　誘導放射　吸収線形

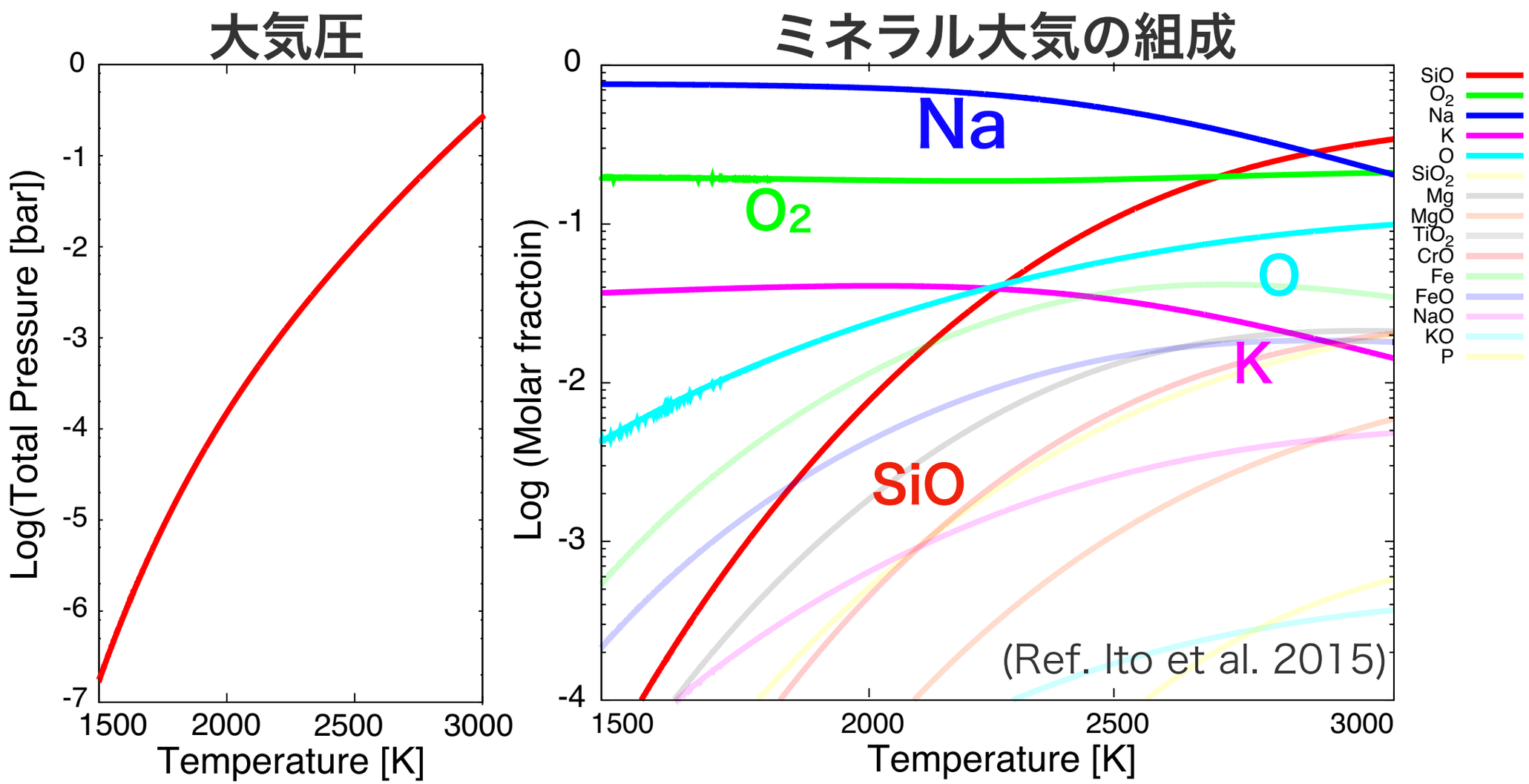
計算フローチャート


計算開始
MELTS & CEA:
大気量$P_{vapor}(T_{ground})$,
大気組成χ (T_n, P_n)
大気各層の吸収断面積計算：
$\sigma_\nu(T_n,P_n,\chi)$
輻射輸送計算:(Toon et al., 1989)
$F_n=\int F_{\nu,n}$ $(\sigma_\nu,\chi, P_n)d\nu$
輻射平衡：
F_n=const
No
$T_n=T_n+\Delta T_n$
Yes
化学平衡:
$P_{ground}=P_{vapor}(T_{ground})$, χ $(T_n, P_n)=\chi_n$
No
Yes
吸収断面積：
$\sigma_\nu(T_n,P_n,\chi)$
No
Yes
化学平衡・輻射平衡大気構造＋大気放射スペクトル
T:温度、P：圧力、ν：振動数、
P_{vapor}：メルト蒸気圧、χ：モル分率、
F：輻射フラックス、σ：吸収断面積、
n : 大気n層、ground : 地表
吸収遷移確率・物性値 Database
HITRAN2012・: Kurucz(1992)

ミネラル大気：組成・大気量

H, C, N, S, Cl

揮発性元素の無いマグマと気液平衡大気(Schaefer & Fegley 2009 , Ito et al., 2015)

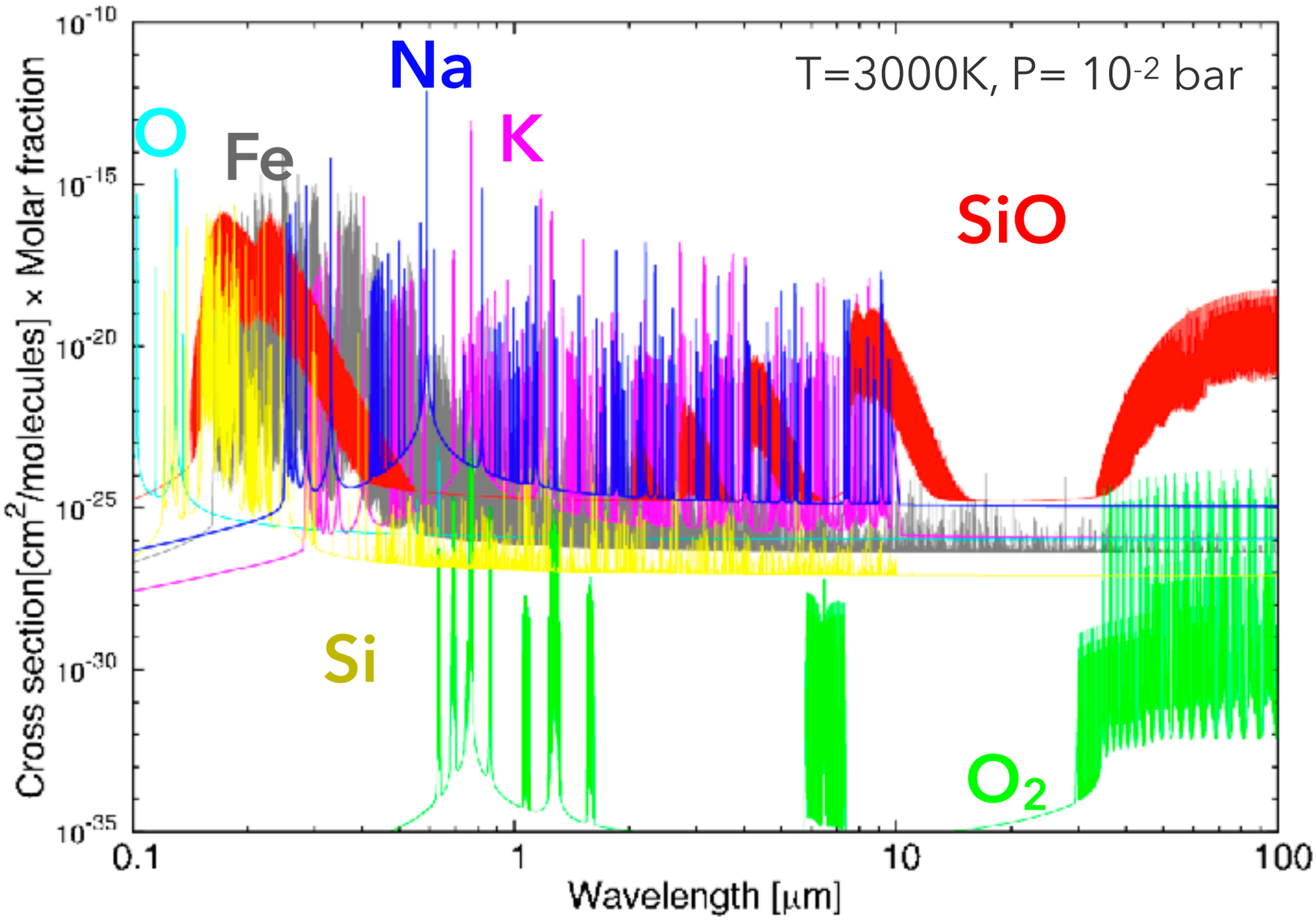


マグマ直上の大気組成：**Na**(主成分), O_2, O, K, SiO etc.

大気量：10^{-7} - 10^{-1} bar (1500-3000K)

ミネラル大気：吸収特性

主要成分の吸収断面積

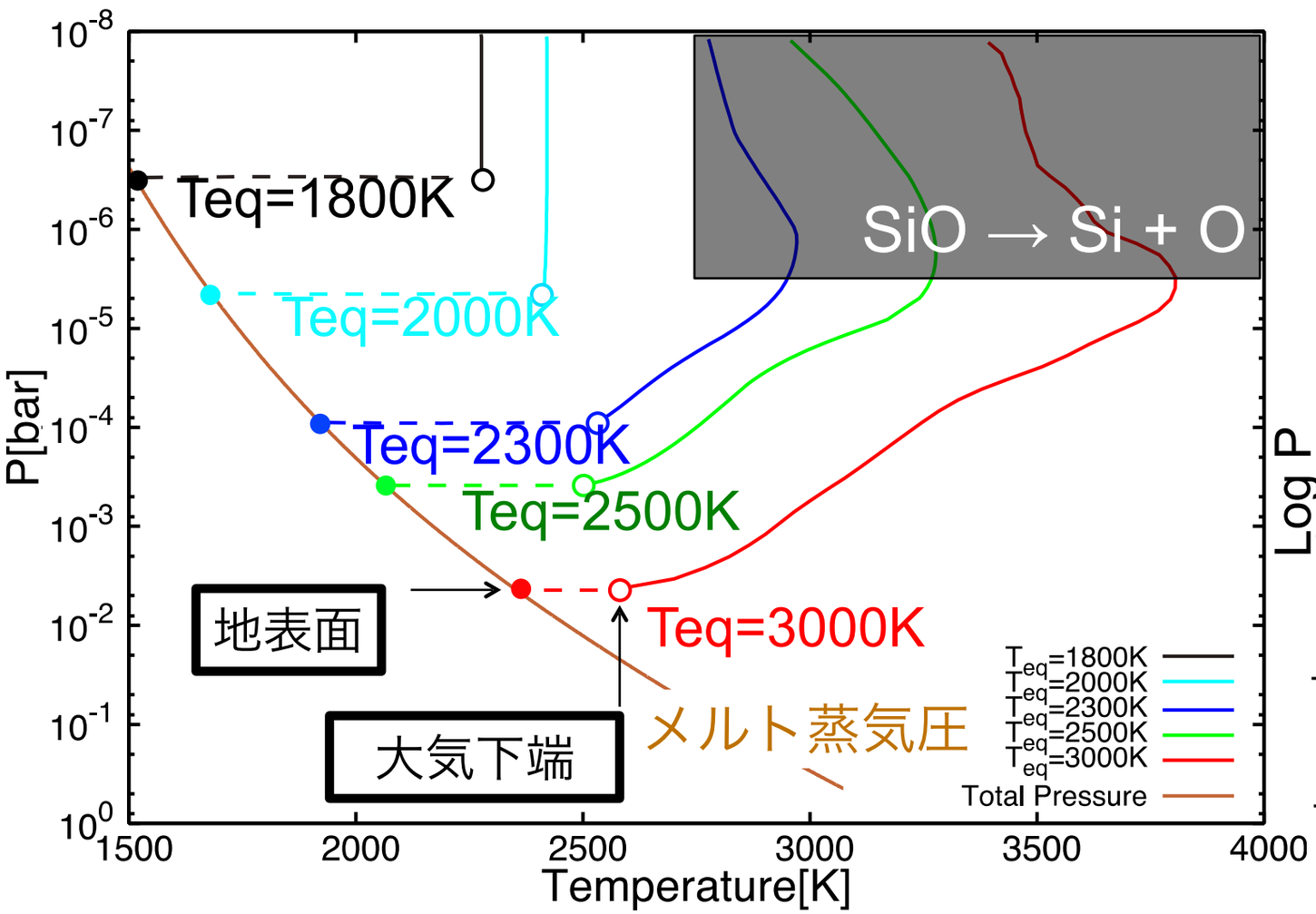


可視域のFe＋可視/赤外でのNa・K＋赤外/FUV域でSiOの吸収寄与

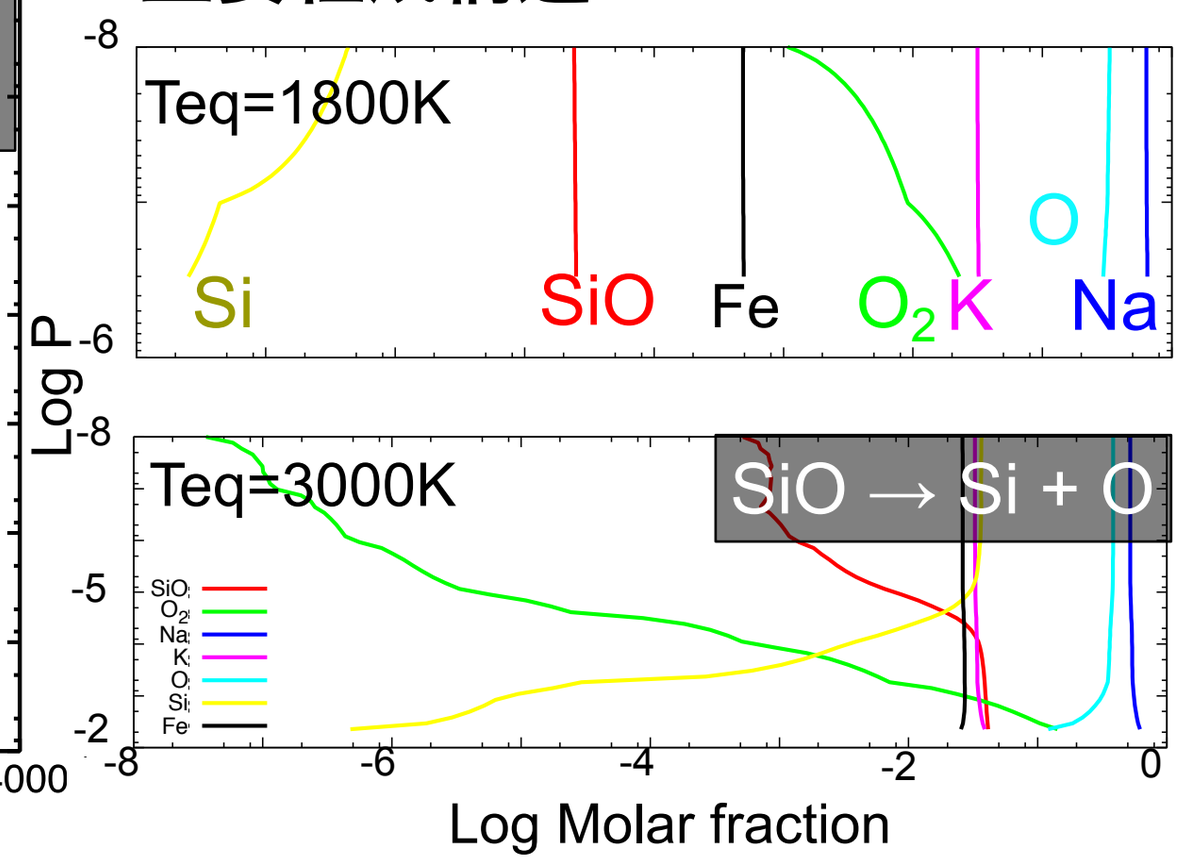
ミネラル大気：大気構造

平衡照射温度

温度構造： $T_{eq} = T^* \times \sqrt{R^*/a}$



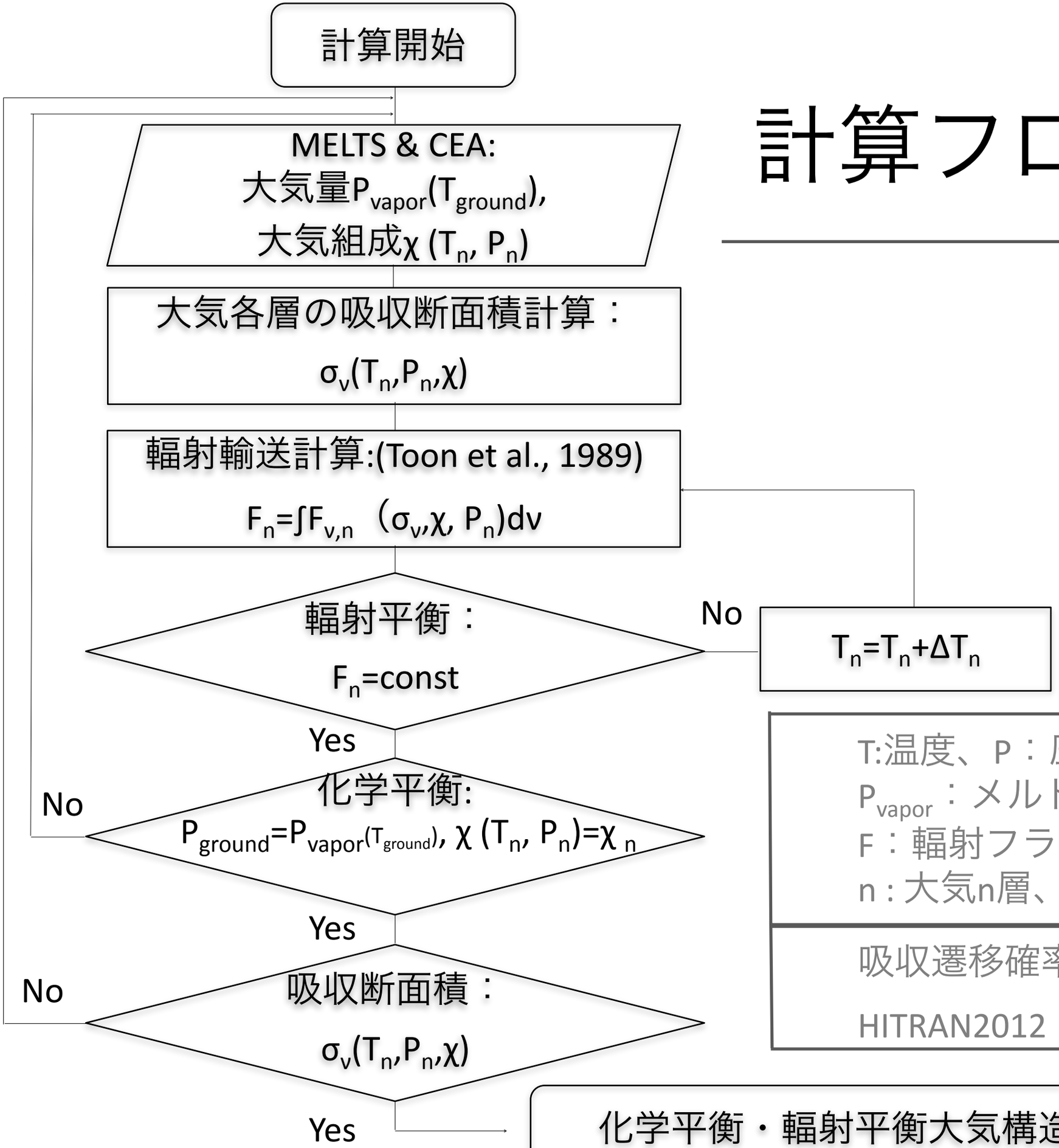
主要組成構造



Teq<2000K : 等温構造 (光学的に希薄)

Teq>2300K : **温度逆転構造** ← SiOのFUV吸収、SiOの解離

計算フローチャート



T:温度、P：圧力、ν：振動数、
P_{vapor}：メルト蒸気圧、χ：モル分率、
F：輻射フラックス、σ：吸収断面積、
n : 大気n層、ground : 地表

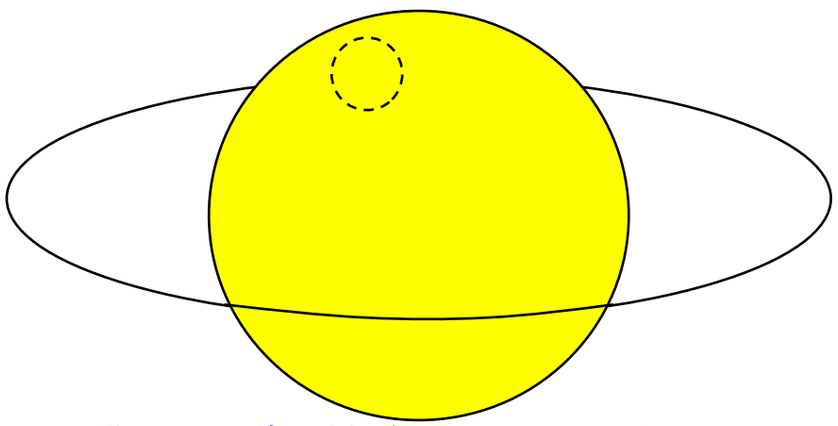
吸収遷移確率・物性値 Database

HITRAN2012・: Kurucz(1992)

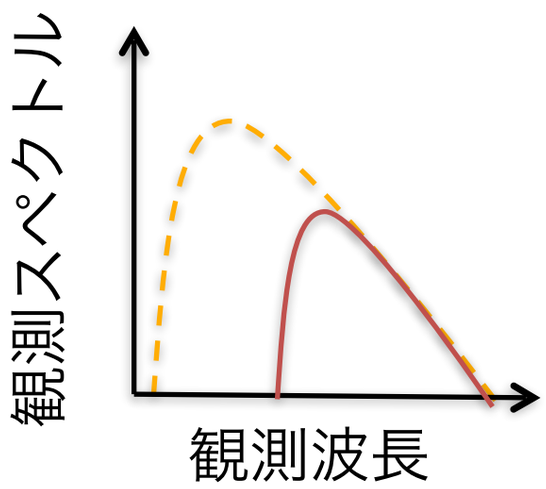
化学平衡・輻射平衡大気構造＋大気放射スペクトル

惑星二次食による大気観測

二次食

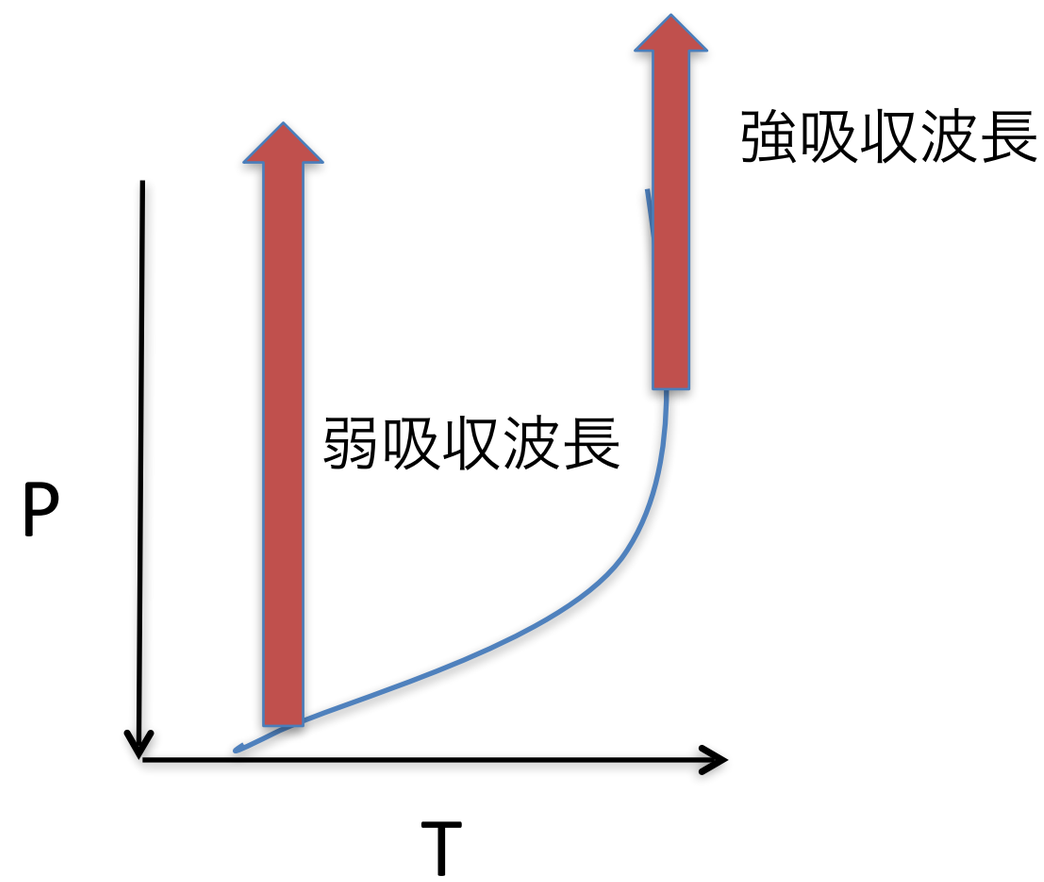


惑星大気放射フラックス



大気温度構造と

惑星放射フラックス：$F_P(\lambda)$

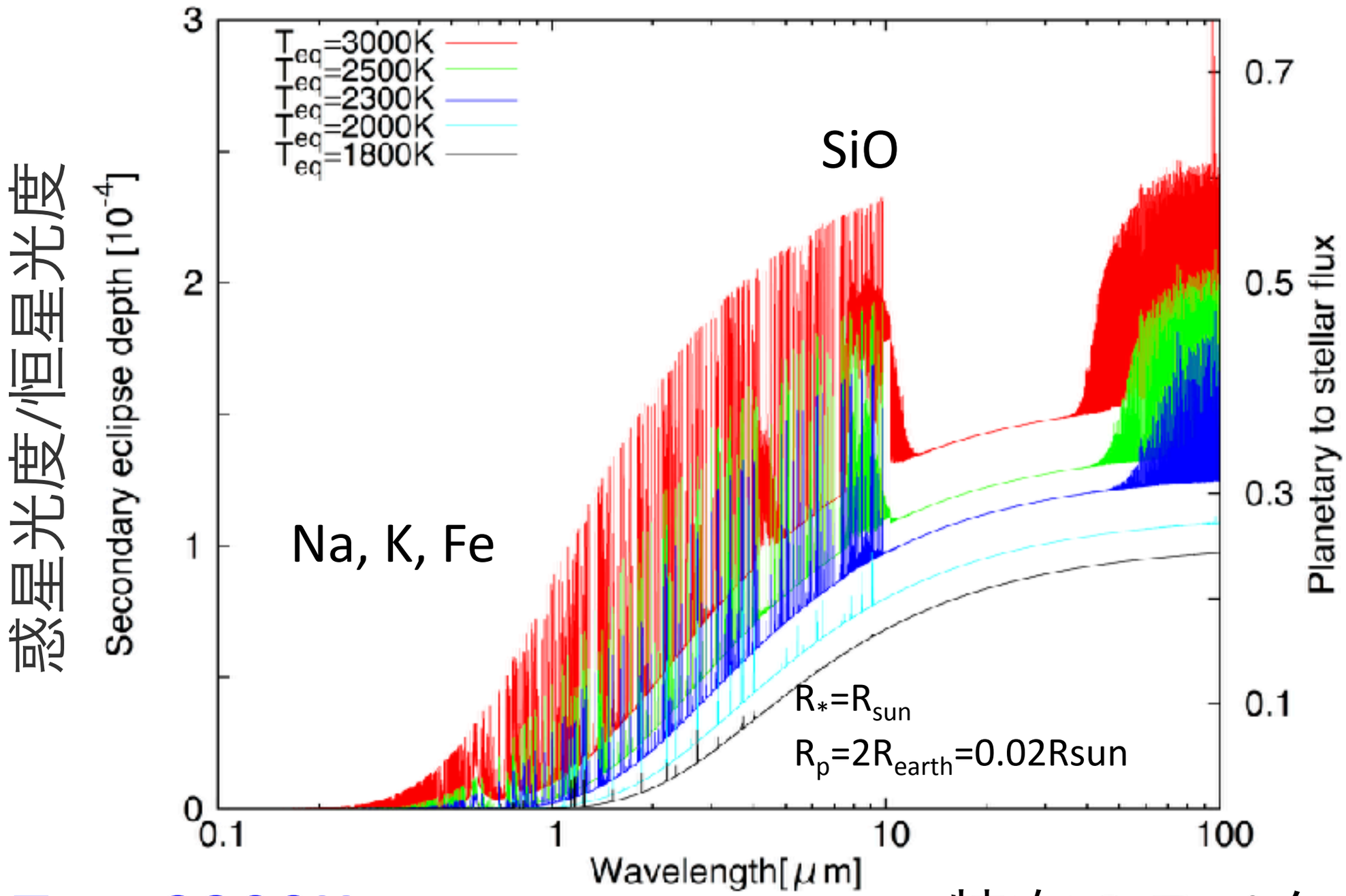


観測量：二次食減光率

(惑星光度L_*/恒星光度L_P)

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L_P}{L_*} \approx \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2 \frac{F_P(\lambda)}{F_*(\lambda)}$$

ミネラル大気：二次食スペクトル

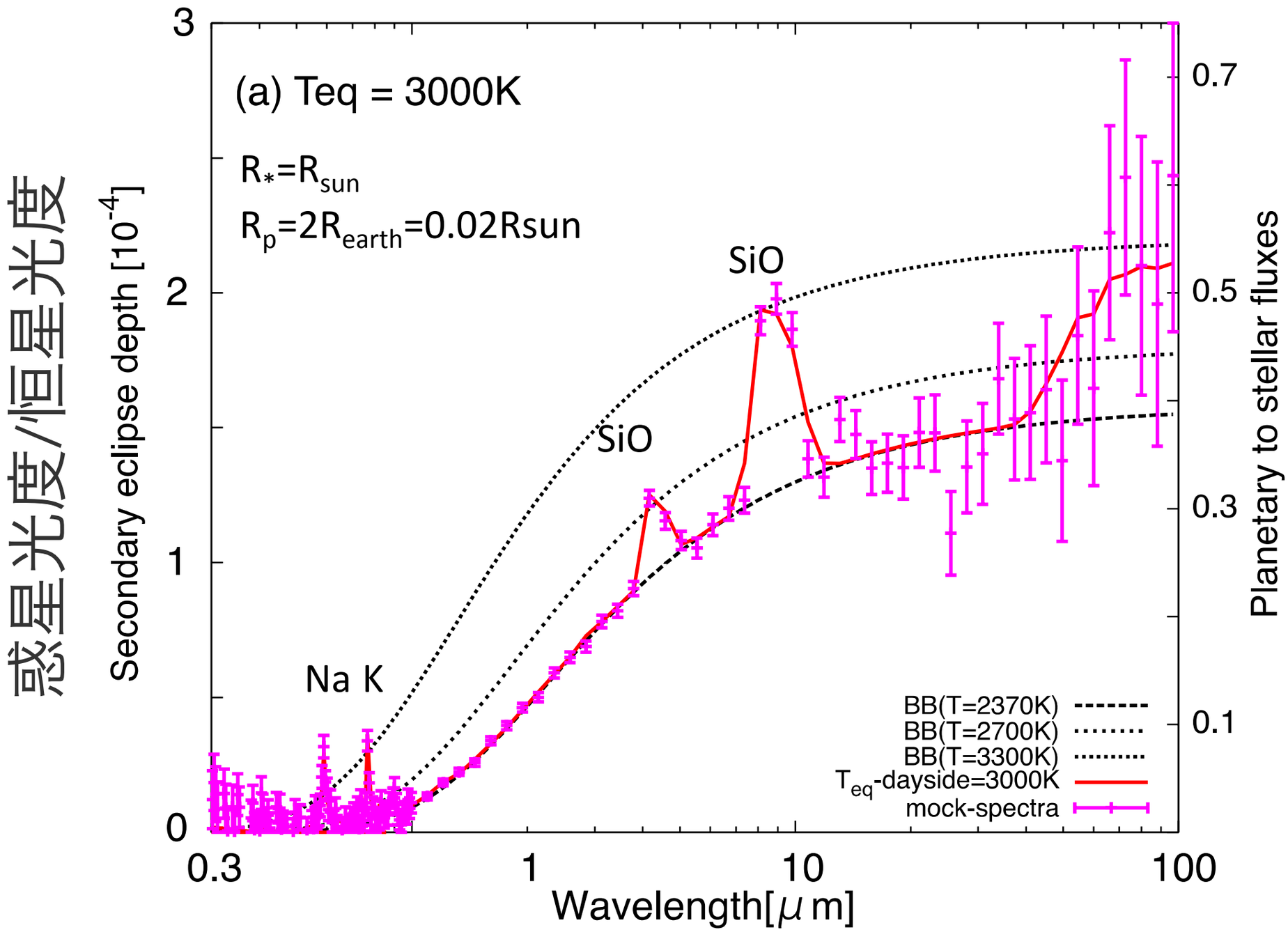


Teq>2300K : Hot Rocky Exoplanet特有のスペクトル

広い波長域でNa・K・Feのピーク、4,10,100μmでSiOの大きなピーク

ミネラル大気：検出可能性

5m宇宙望遠鏡、観測時間10hで100pcのHRE(Teq=3000K)の模擬観測スペクトル



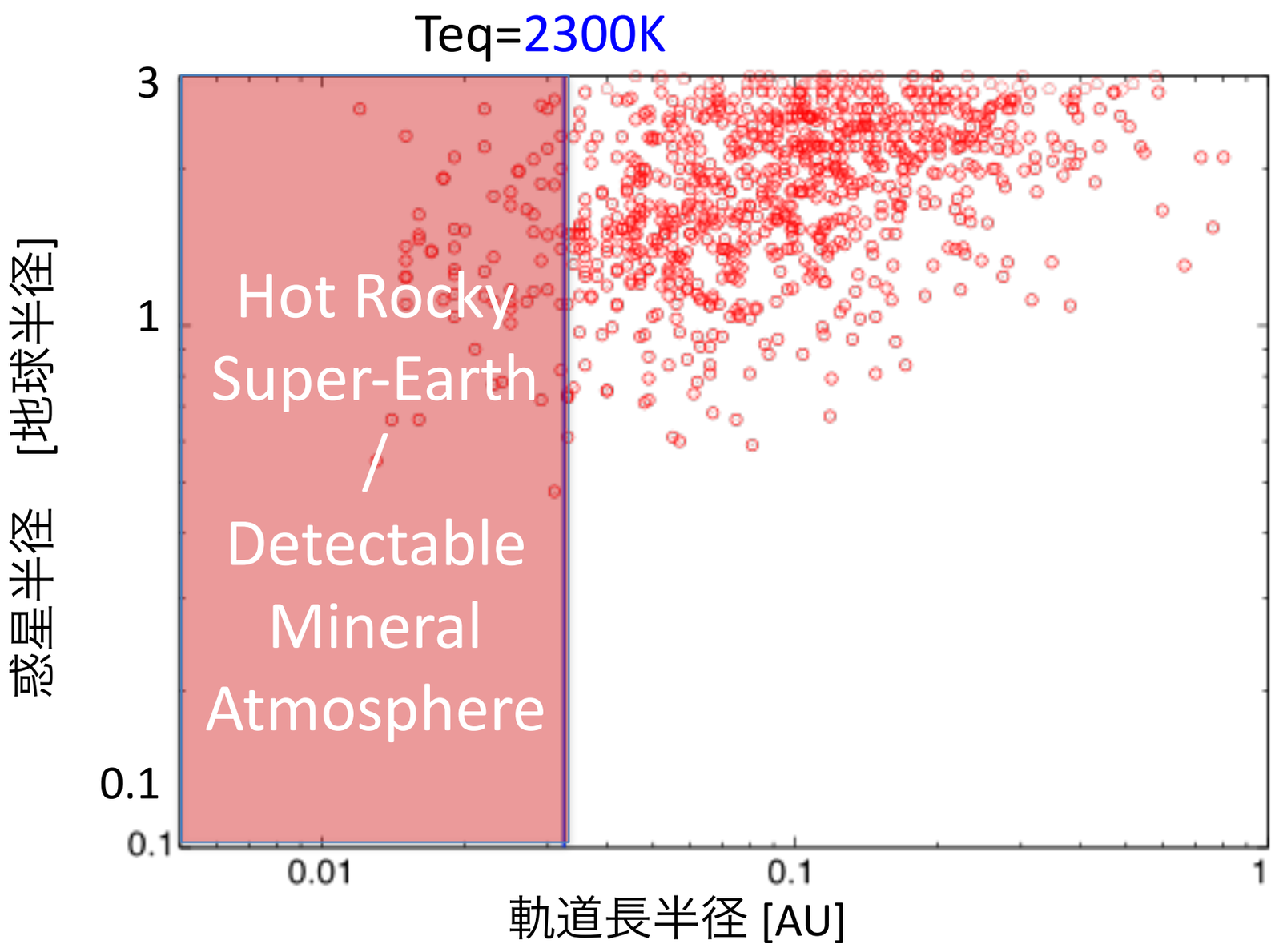
観測エラーバー

Photon noise limit

$$S/N = \frac{N_P}{\sqrt{N^*}}$$

二次食観測(JWST；2020年予定)からSiO・Na・Kが検出可能

議論：ミネラル大気を検出可能な惑星数



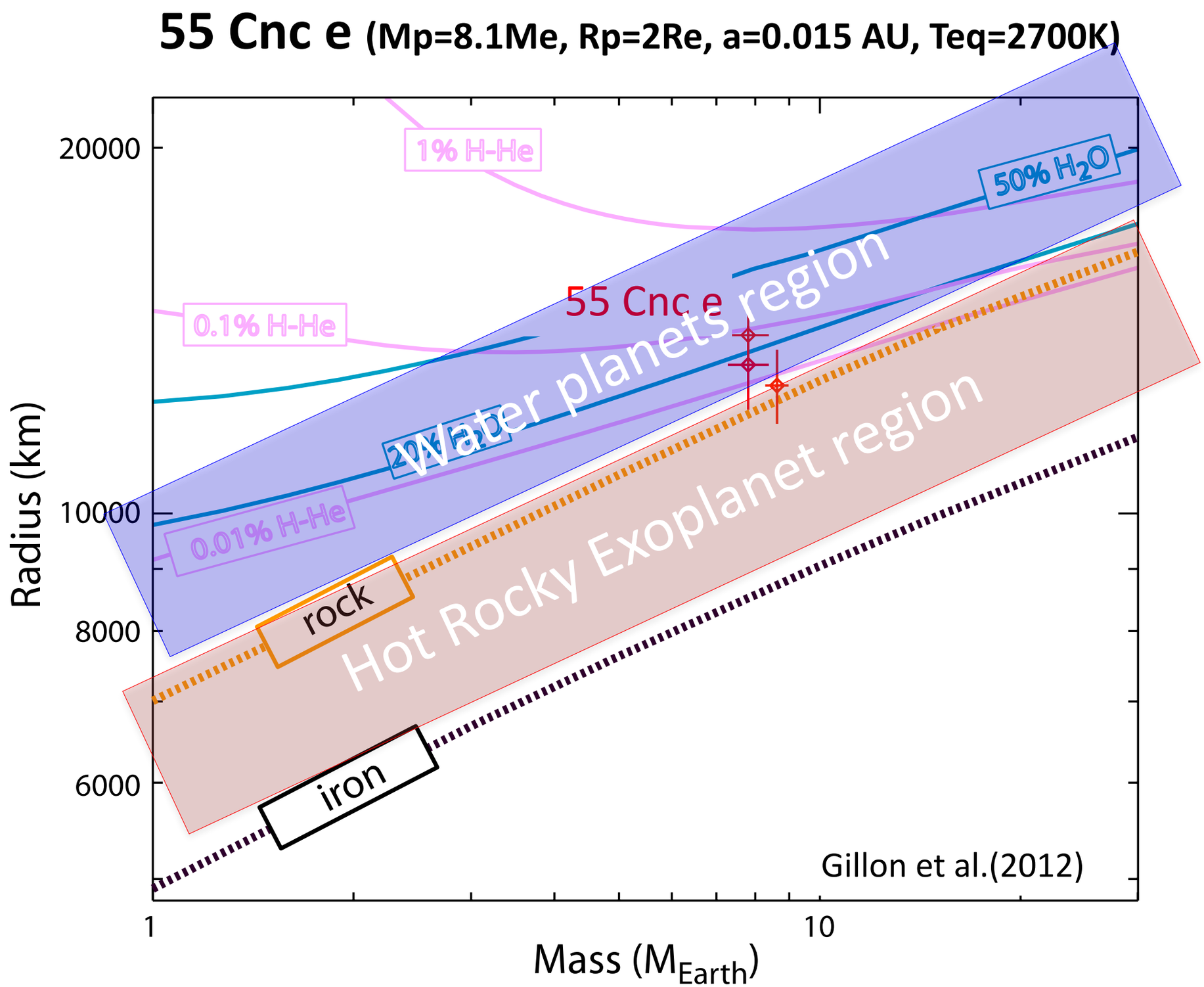
G型星周りのスーパーアース（Teq>2300K）存在率:r=0.5% (Howard et al.2012)

G型星数密度:N_{Gstar}=26(d/10pc)^{3}個、dmax(S/N):検出限界天体距離

5m級宇宙望遠鏡(JWST)でミネラル大気が観測可能なHRE数:

$$\bar{N}_{HRSE} = rN_{Gstar}[d_{\max}(S/N)]^3 \approx 80\text{個}$$

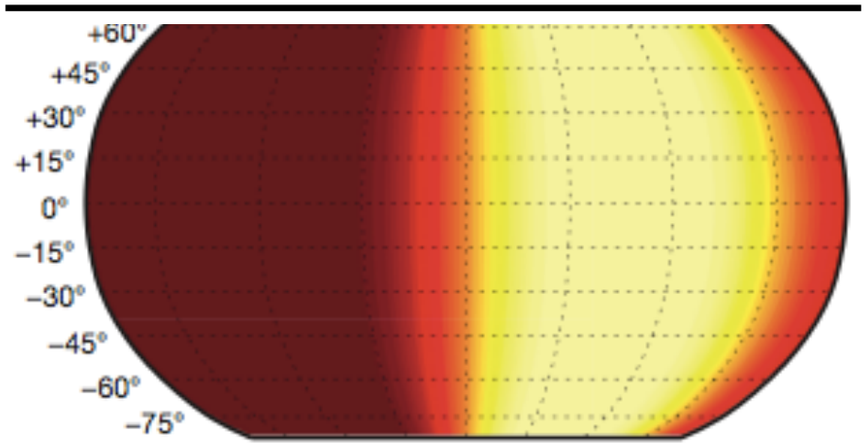
議論：55 Cnc e (8.1Me,2Re,0.015AU)のバルク組成

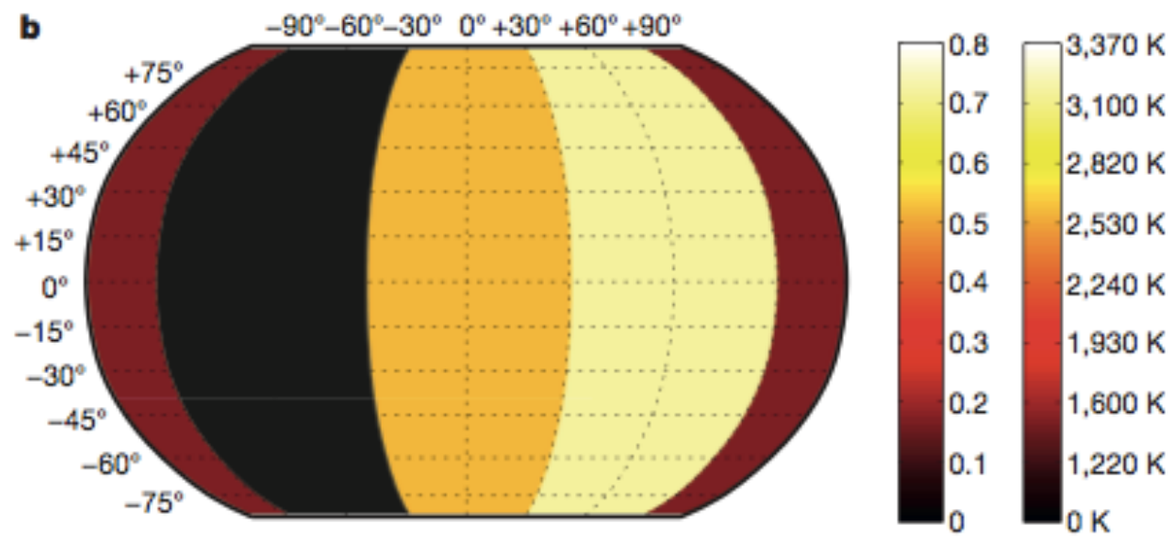


議論：55 Cnc e (8.1Me,2Re,0.015AU)の大気観測

- ミネラル大気のような薄い大気と推定される全球輝度分布

昼平均2700K・夜平均1300K





3370 K

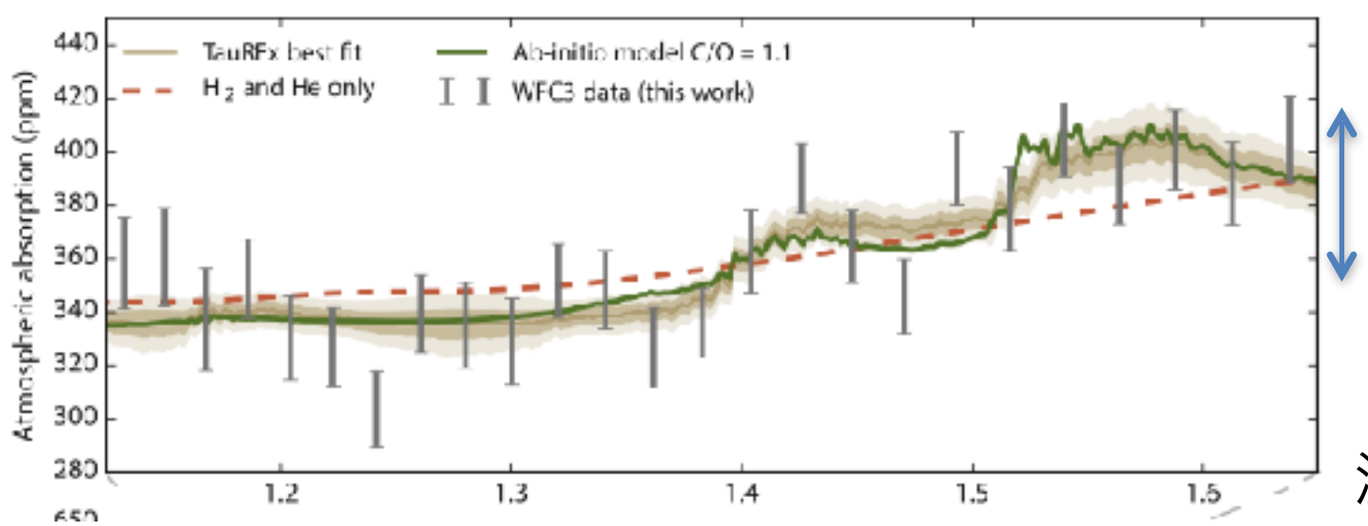
2240 K

1220 K

(Demory et al., 2016)

- 小さい平均分子量の大気(μ=2-7, P>10^{-3} bar)と推定される透過光

$(Rp/Rs)^2$



~10%の変動

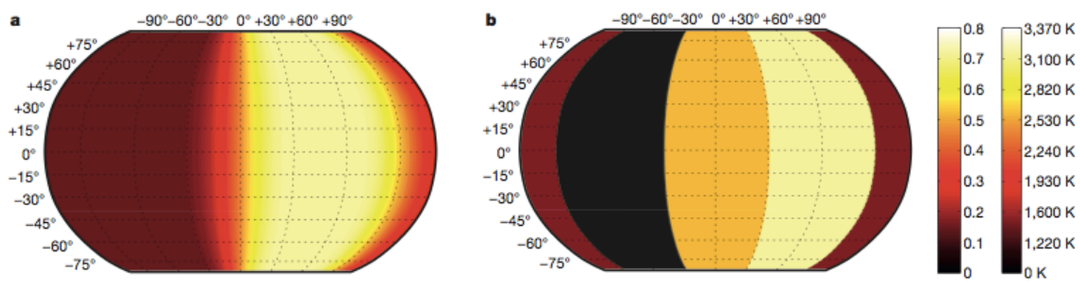
(Tsiaras et al., 2016)

波長[um]

両者から**薄い水素大気**と推定されるが、**その散逸寿命は~1Myr**

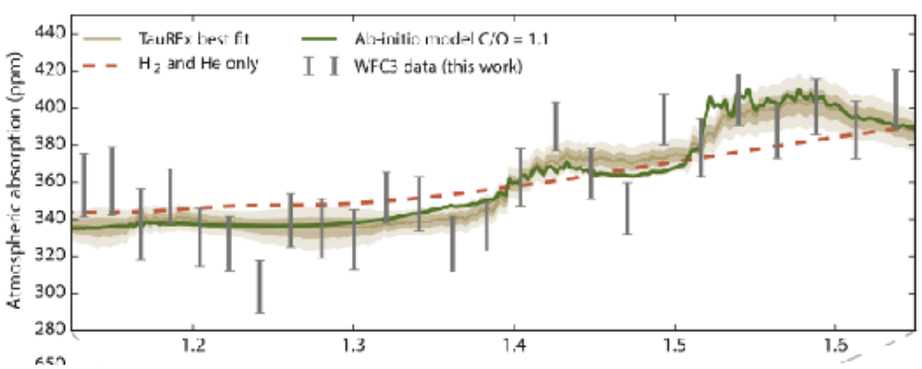
議論：55 Cnc e (8.1Me,2Re,0.015AU)の大気観測

- 輝度分布→昼夜循環低効率



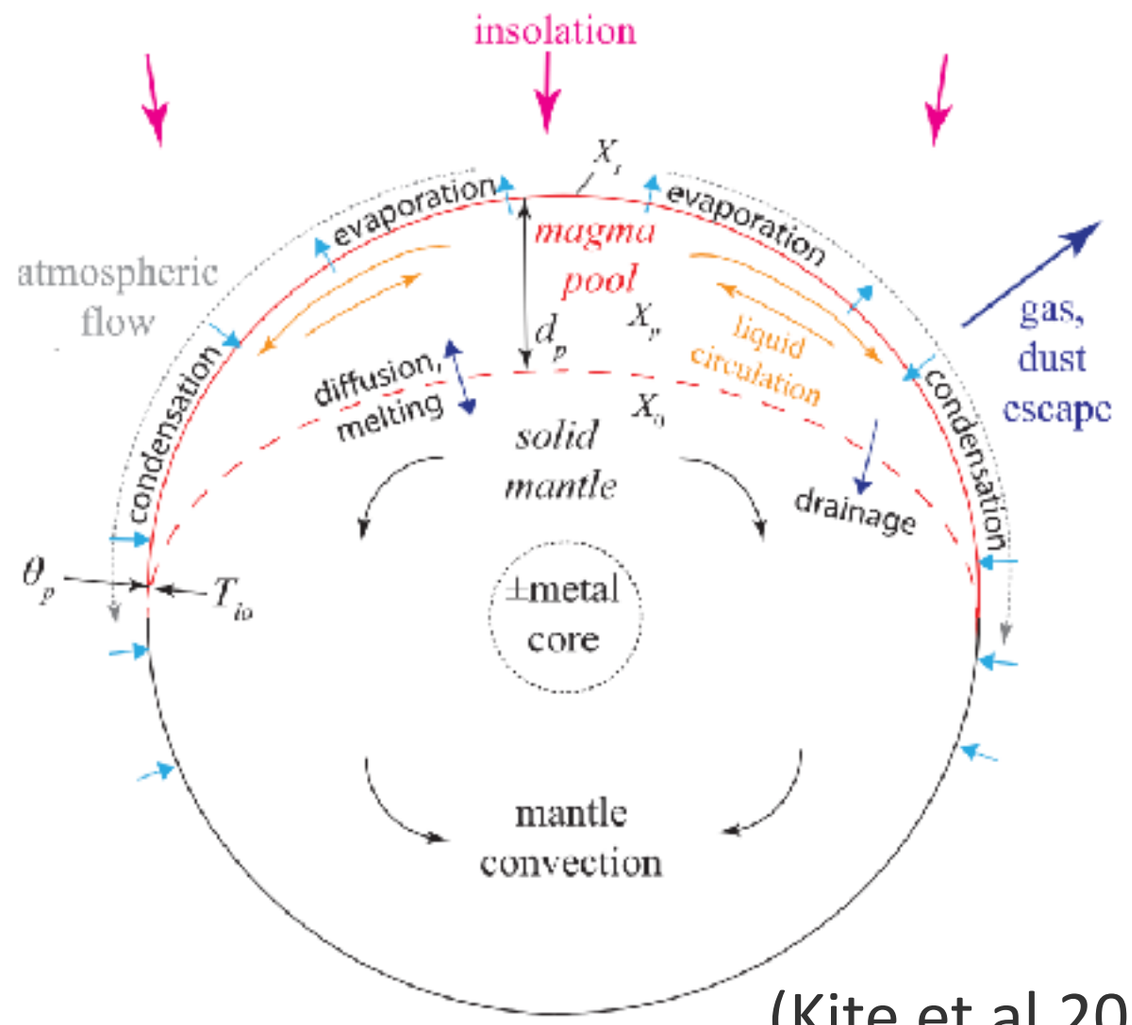
(Demory et al., 2016)

- 大気透過光→低平均分子量



(Tsiaras et al., 2016)

主星近傍地球型惑星のイメージ



(Kite et al.2016)

➡ 持続的供給可能な水蒸気大気？電離したミネラル大気？

理論的課題：<u>大気循環・大気散逸・内部混合</u>の理解

Summary

背景：主星近傍の岩石惑星は、高温であるためミネラル大気を持つ

本研究の結果

1, 大気構造

温度逆転構造；Teq>2300K

2, 二次食スペクトル

Na, K, SiO由来の観測可能な特徴

近い将来展望

JWSTによるミネラル大気の検出

観測的課題：大気組成・温度分布の詳細測定

理論的課題：現在・過去（進化）に対する

内部混合・大気循環・大気散逸の影響推定(システム理解)