

地球型系外惑星の探査理論

東京大学地球惑星科学専攻・河原 創

1964's book by Otto Struve (1897-1963)



る。たぶん、われわれは、あまり遠くない将来において、他の方法を用いて、このような惑星を発見できるであろう——たとえば、木星のような惑星がときたま主星の明るい光球の前方を通過して、その表面の1パーセントほどをかくすので、星の見かけの明るさが減少するのを観測するとか、あるいは星の軌道運動が惑星の公転周期に従って少し変化するのを、ドップラー効果を利用して観測するとかの方法を用いて。また、N. ロマンは、コロナグラフ型の大望遠鏡を宇宙船に据え付ければ、もし木星程度の惑星がアルファ・センタウリ系に存在して、その惑星が星から遠くにあるならば、その惑星の弱い光を直接写真撮影できるだろうと提案している。しかし、現在のところその見込みはない。

Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work, Struve (1952)
"But there seems to be no compelling reason why the hypothetical stellar planets should not, in some instances, be much closer to their parent stars than is the case in the solar system."

Otto Struve (1897-1963)



○ 系外惑星に対するRV & Transit 法の提唱 (Struve 1952)

✓ Radial Velocity (Mayor & Queloz 1995)

✓ Transit (Charbonneau+ 2001)

○ Habitable Zone (Su-Shu Huang 1959, 1960; Struveがadviser)

✓ Classical HZ (Kasting+ 1993)

✓ Several Small Exoplanets discovered in HZ 2010's (Kepler & RV)

✗ Characterization of Terrestrial Planets

○ “astrobiology” (Struve 1955)

✗ Search for Exolife and their Habitat

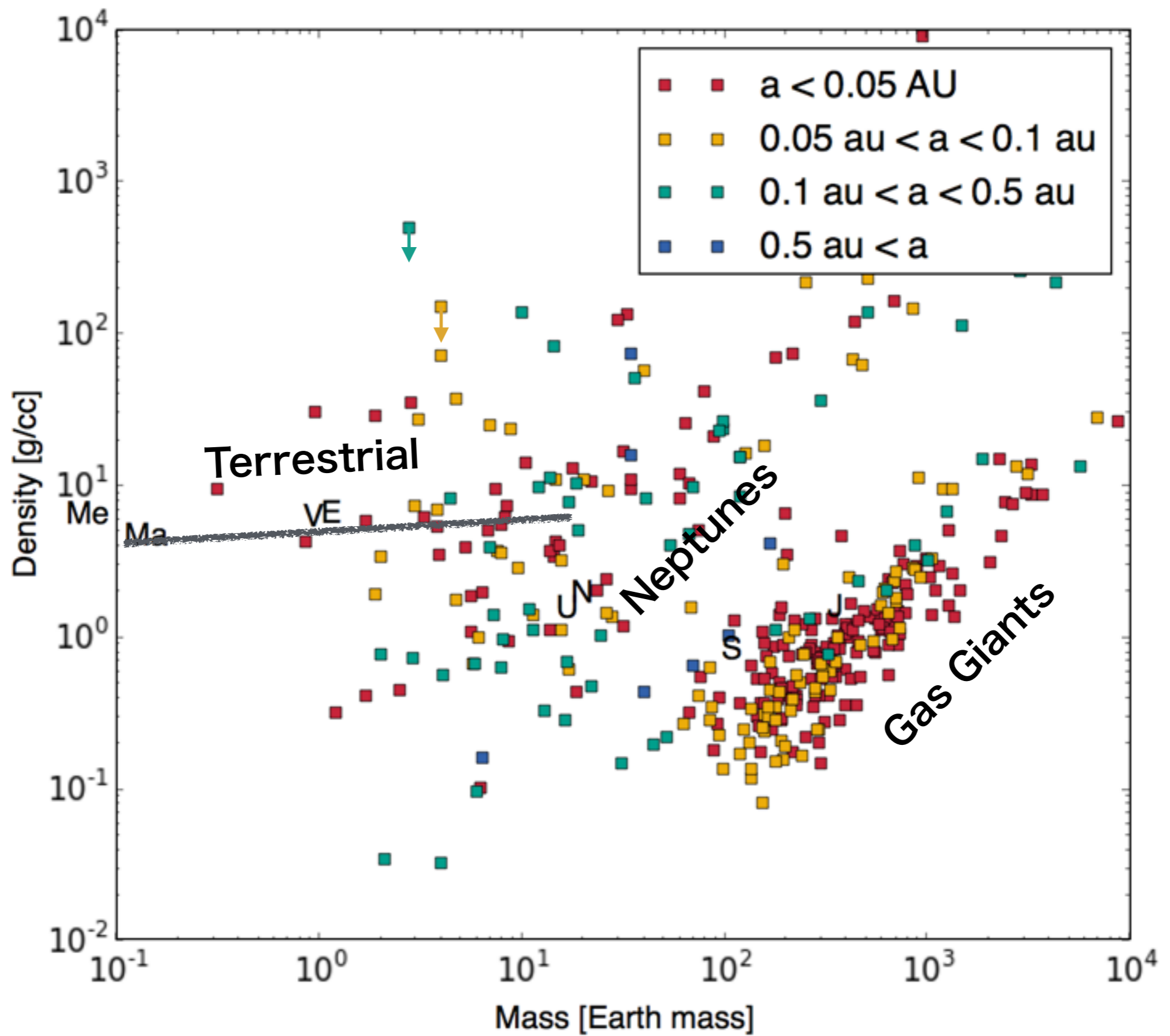
○ OZMA計画(Drake)の際のNRAOのdirector

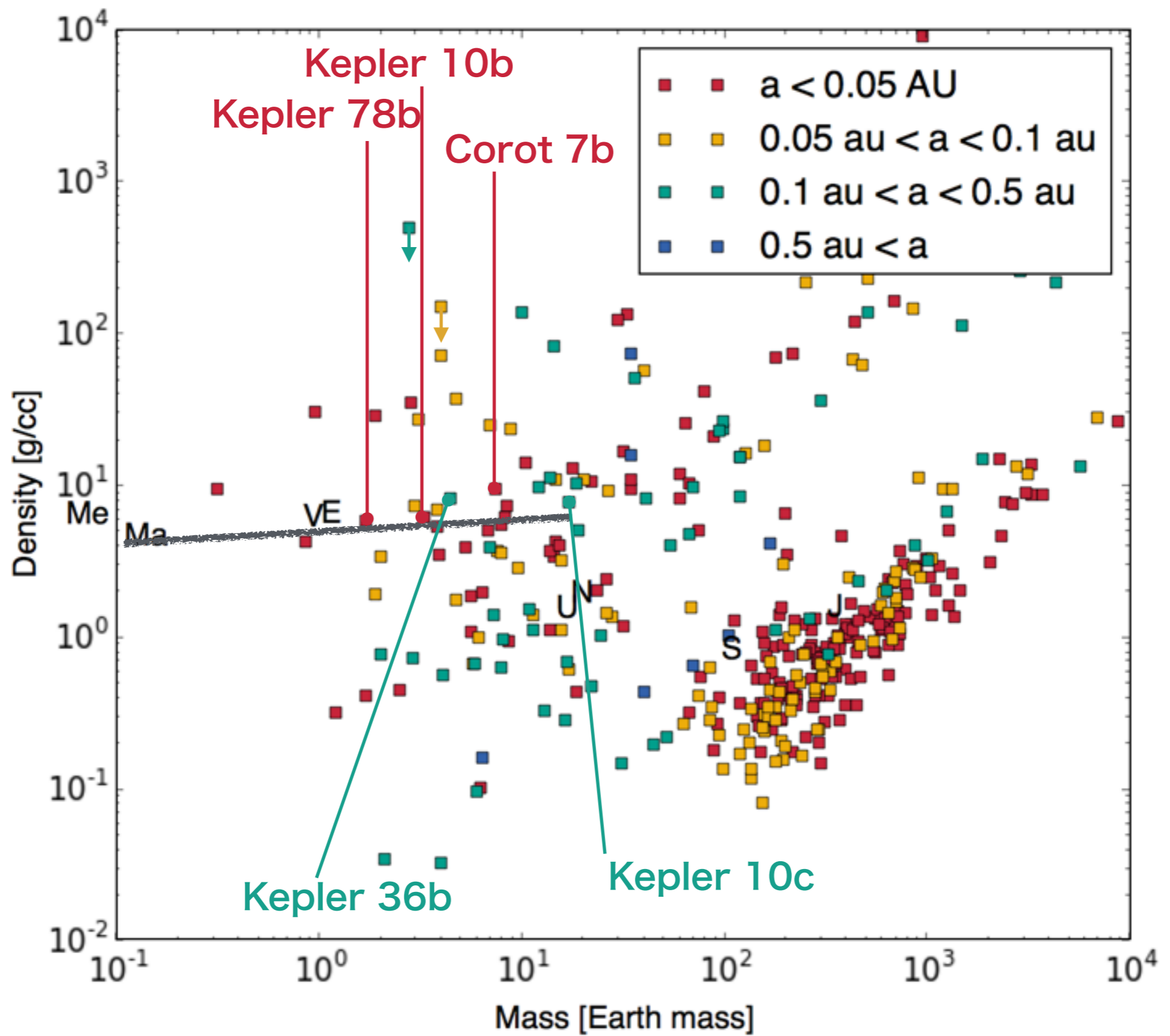
? SETI

本発表における地球型系外惑星の定義：

岩石・金属コアのみで惑星質量・半径がほぼ決定するもの

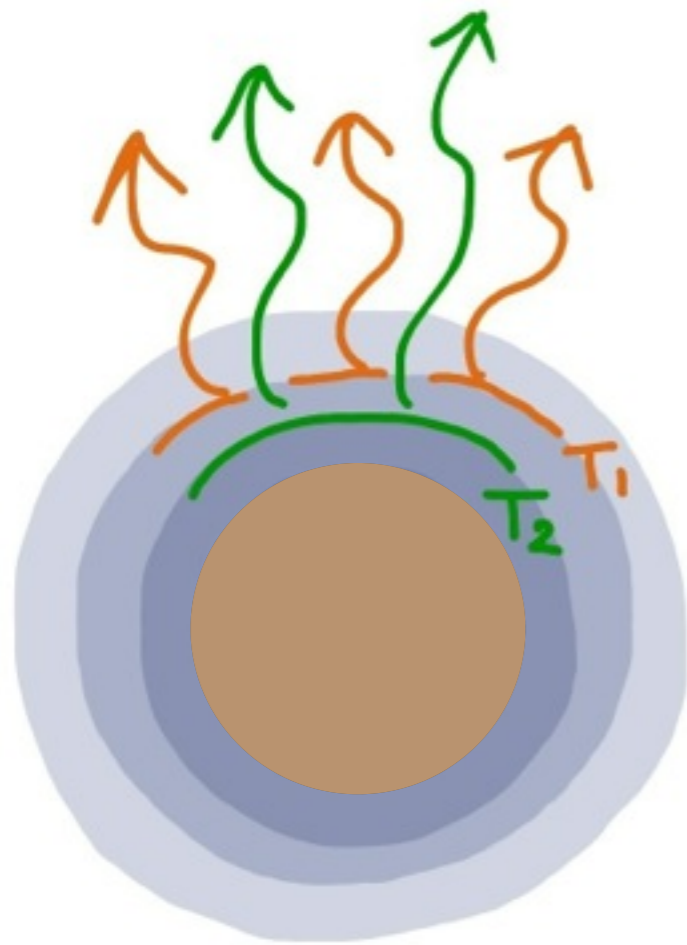
1. 現時点で半径・質量を除く情報は得られていない
2. 探査手法の開発には、どのようなシグナルが得られるべきか惑星科学的なモデルがある程度必要





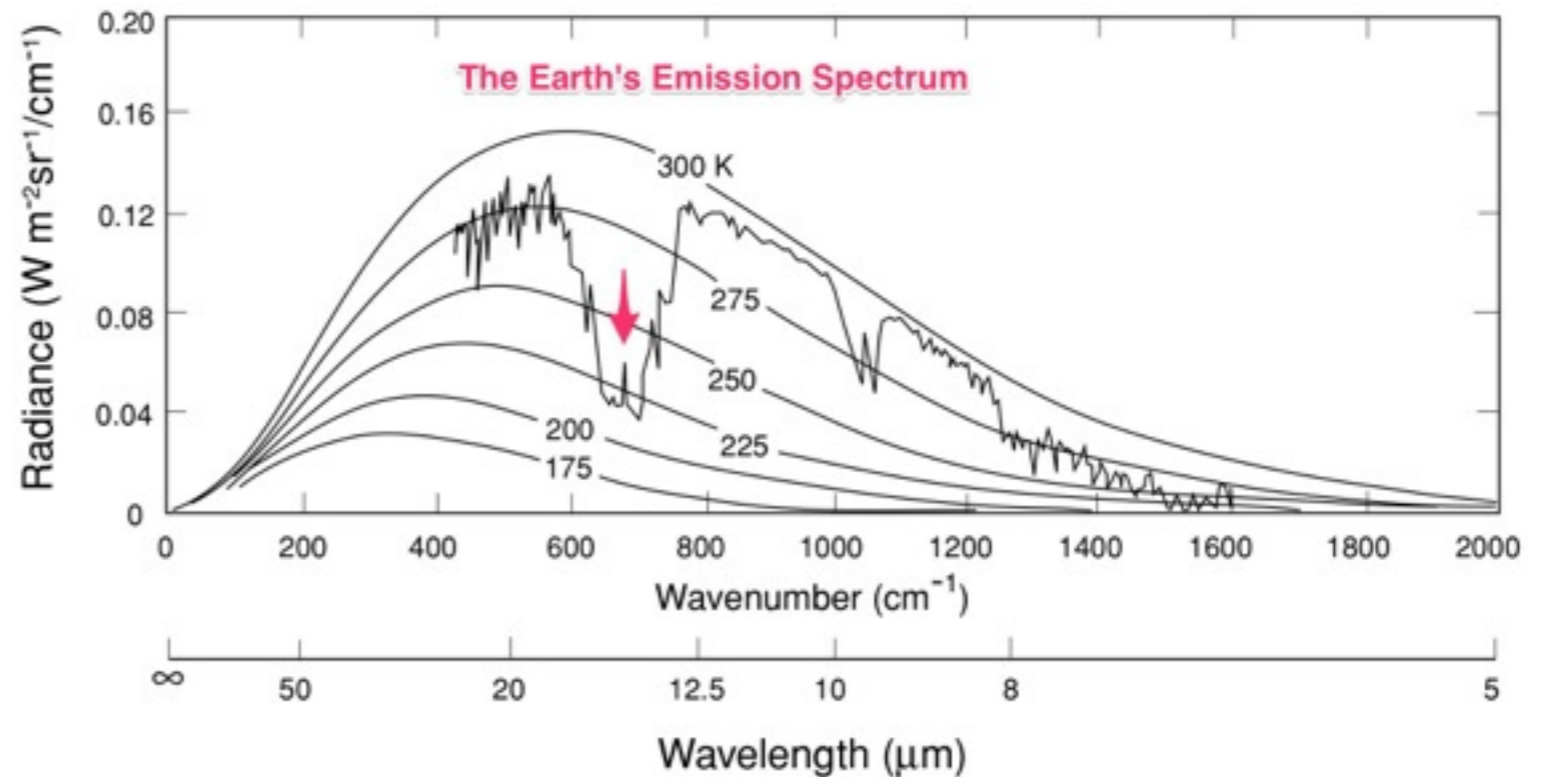
高温下 ($T > 2000$ K) の地球型惑星





$T_1 < T_2$: normal
 $T_1 > T_2$: temperature inversion

- ある波長での輻射強度は、その波長で $\tau \sim 1$ になる高さの温度の黒体輻射で決まる



→ 輻射スペクトル上の惑星大気分子・原子の特徴がどのようにであるかは、大気の温度分布に依存する

Close-in Rocky Planets

ミネラル大気

$T > \sim 2500$ K つまり $a \sim 0.01$ au 程度の
高温岩石惑星なら、二次食で組成を探りうる

Magma Ocean Planets

高温水蒸気大気

ハビタブルゾーンより内側ならば $10^7 \sim 10^{10}$ の惑星・主星
コントラストで長時間(\sim Gyr)存在できる→直接撮像

Close-in Rocky Planets

=ミネラル大気

simulation

SiO

SiO

Fe

Na^K

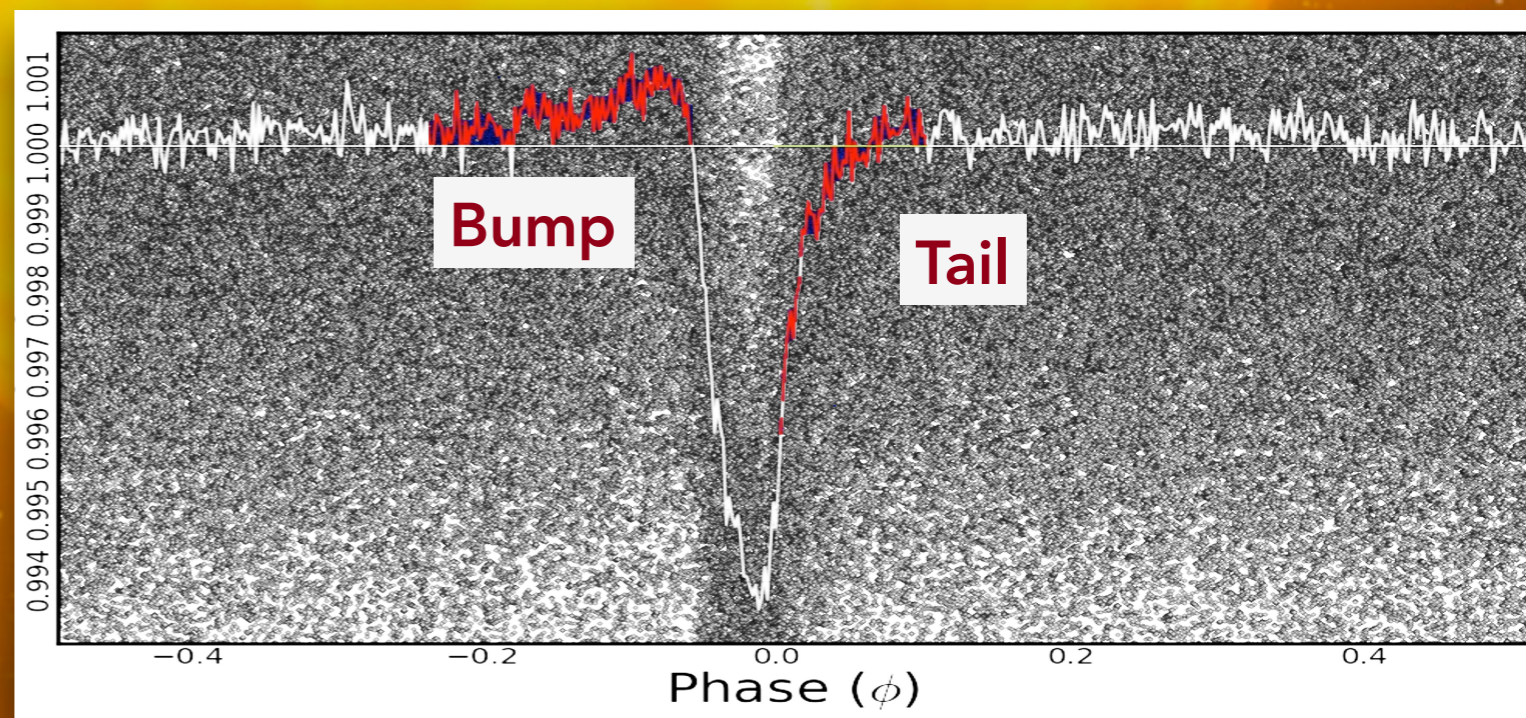
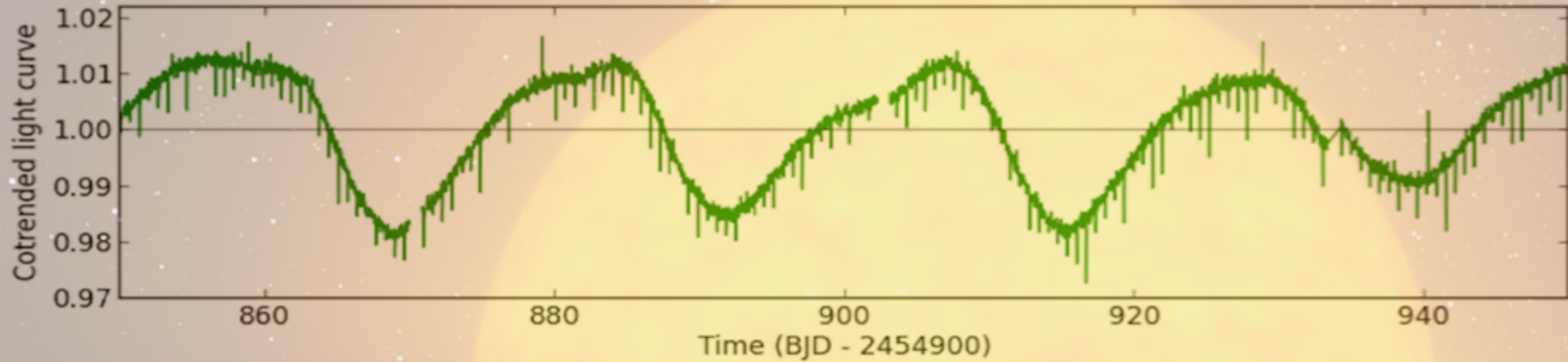
Magma-Ocean Planets

=高温水蒸気大気

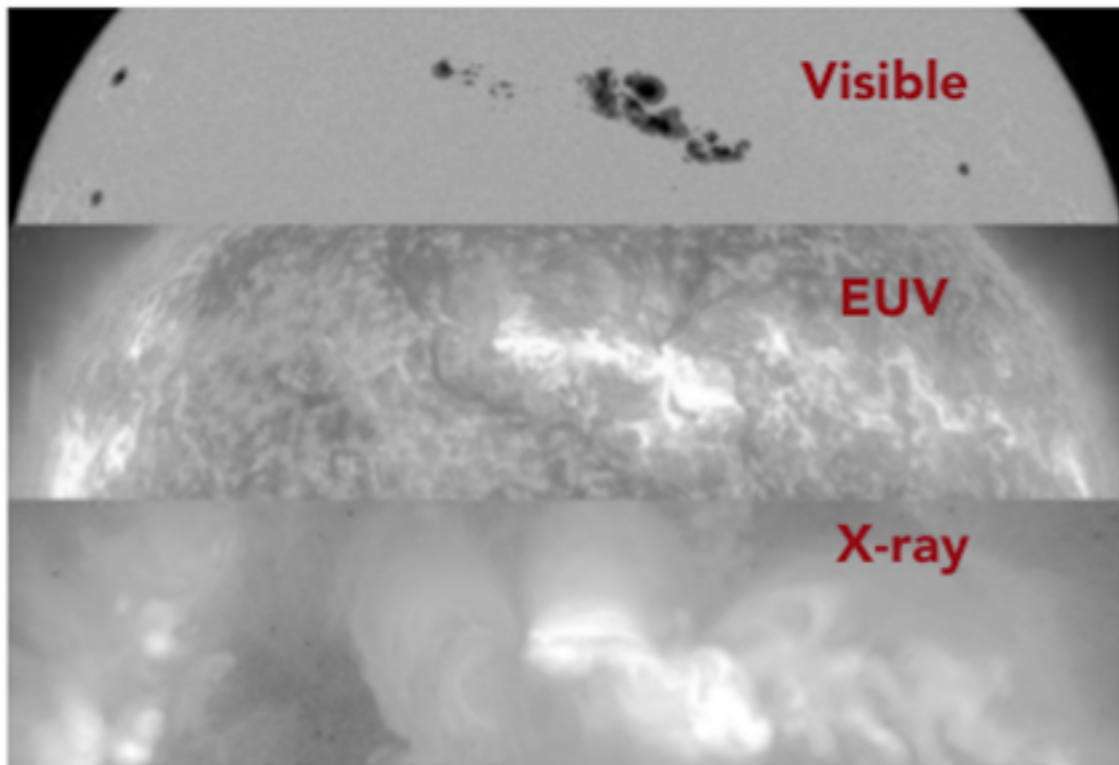
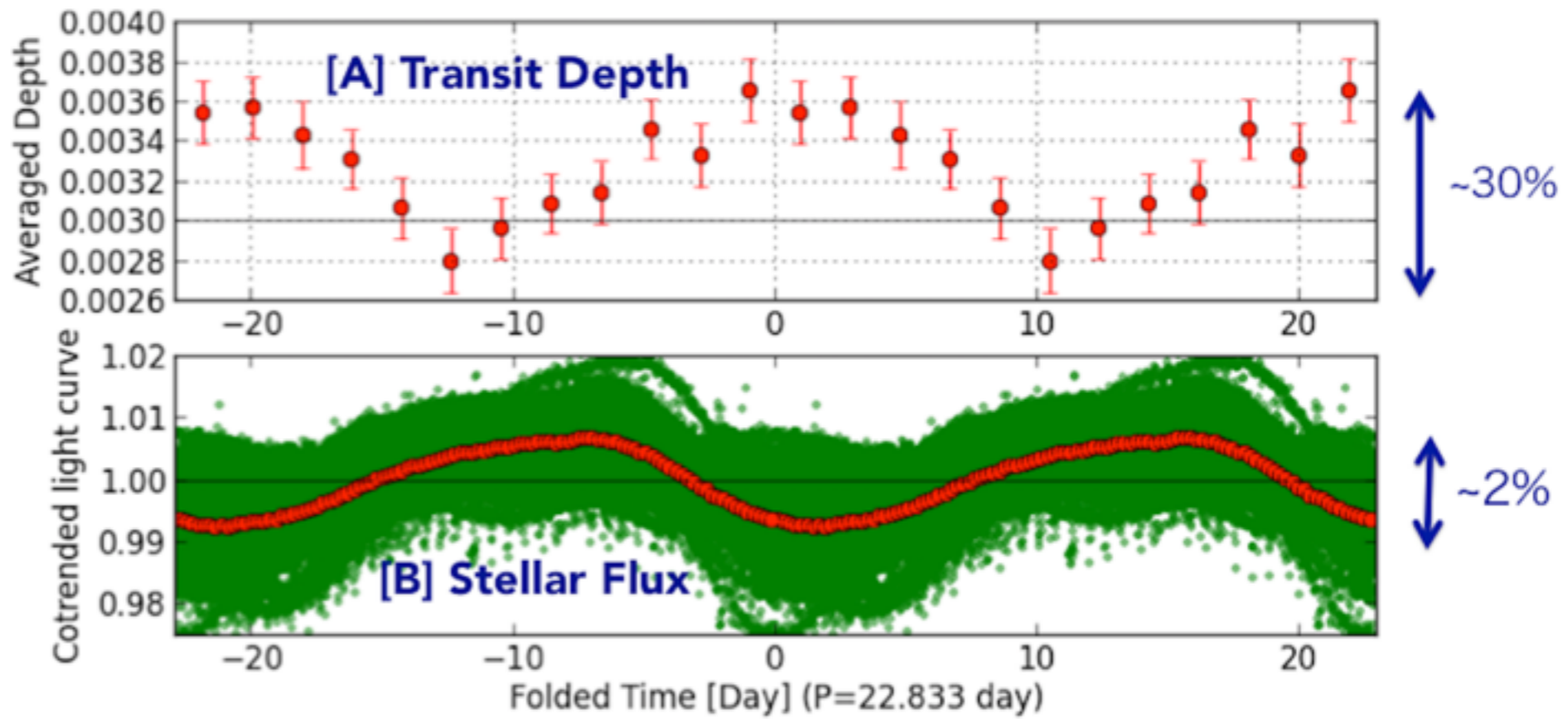
simulation

Water Vapor

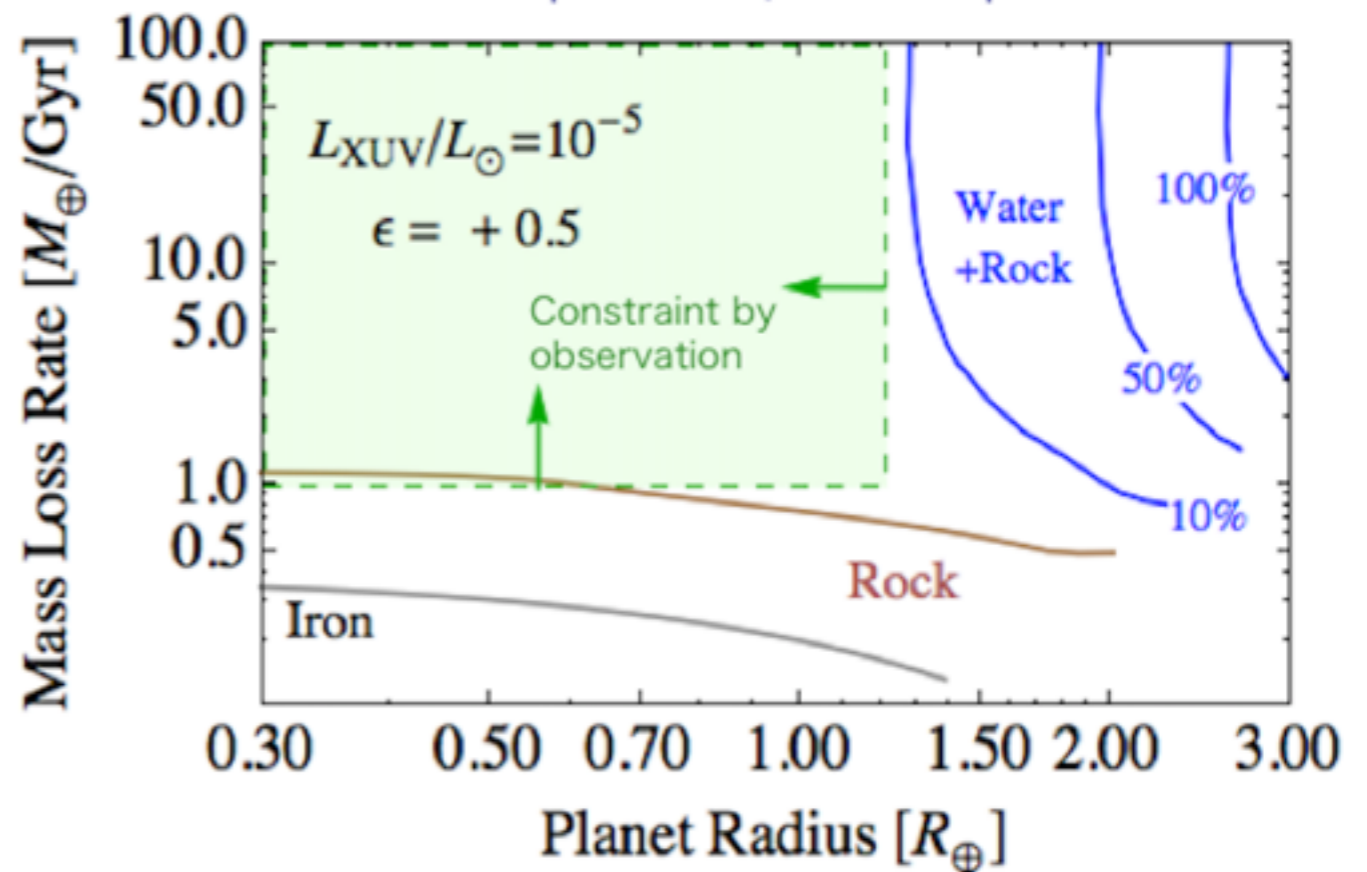
大規模蒸発惑星？：地球質量/Gyr の散逸



Rappaport et al. (2012)

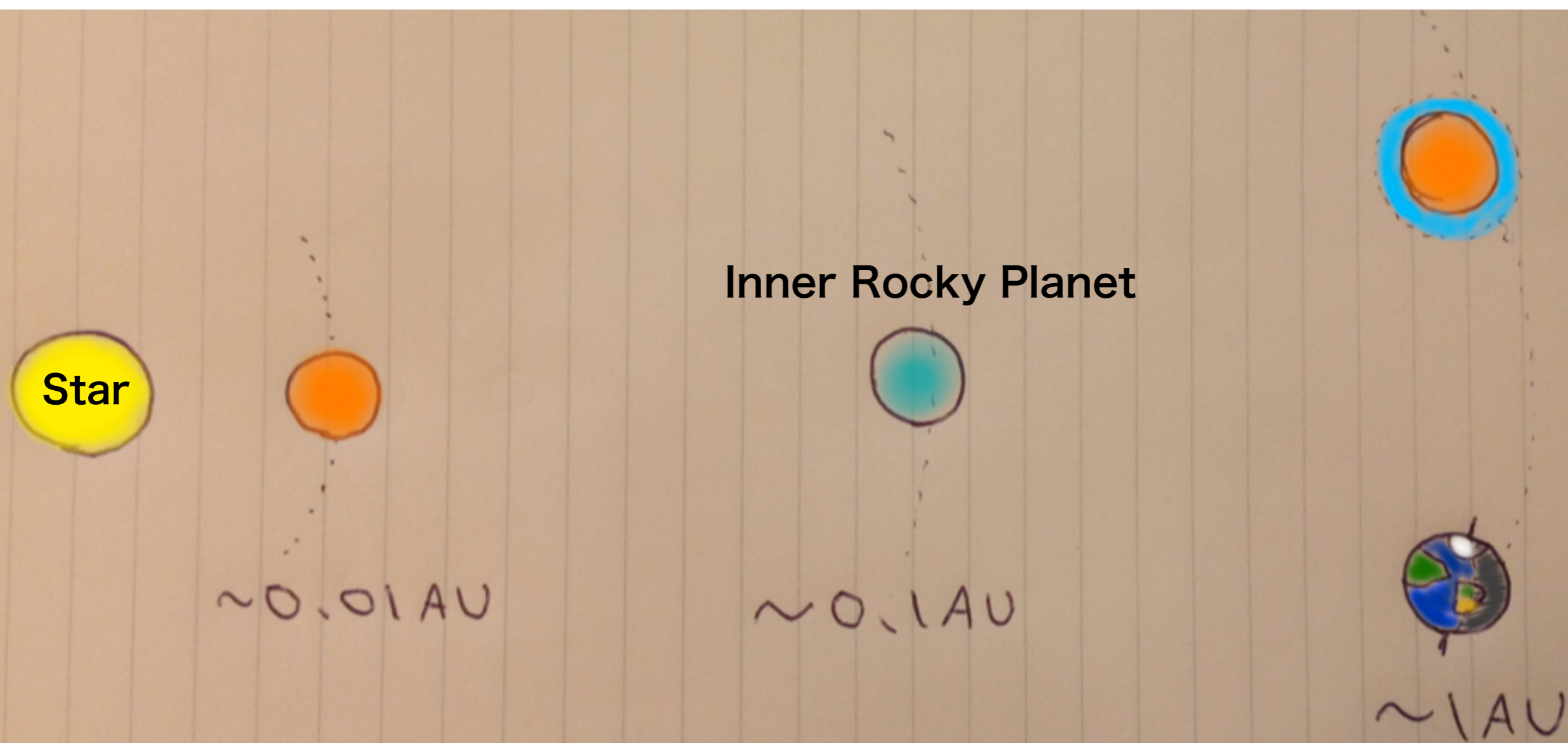


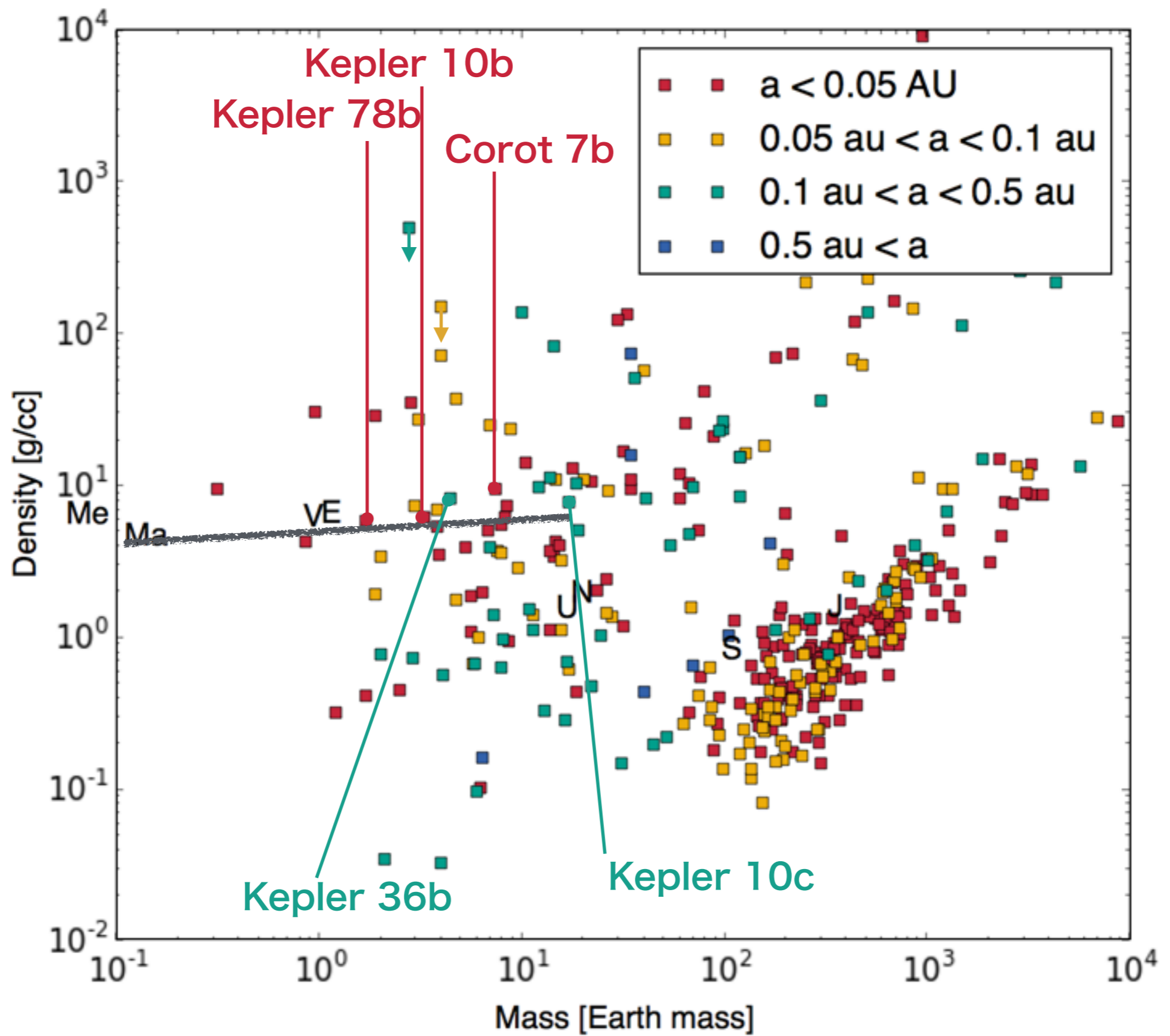
NASA SOHO/MDI/EIT Consortium/Yohkoh/SXT
<http://apod.nasa.gov/apod/ap010419.html>



Kawahara, Hirano, Kurosaki et al. (2013), see also Croll, Rappaport, Levine (2014)

中温域($500\text{K} < T < 2000\text{K}$)の岩石惑星





中温域($500\text{K} < T < 2000\text{K}$)の岩石惑星

◎ 惑星モデル

性質の予言ができていない

◎ 観測的制約 (**0.1AU問題**)

二次食がみえるほど熱くない (**輻射**)

直接撮像ができるほど軌道長半径が大きくない (**反射**)

中温域($500\text{K} < T < 2000\text{K}$)の岩石惑星

◎ 惑星モデル

性質の予言ができていない

◎ 観測的制約 (**0.1AU問題**)

二次食がみえるほど熱くない (輻射)

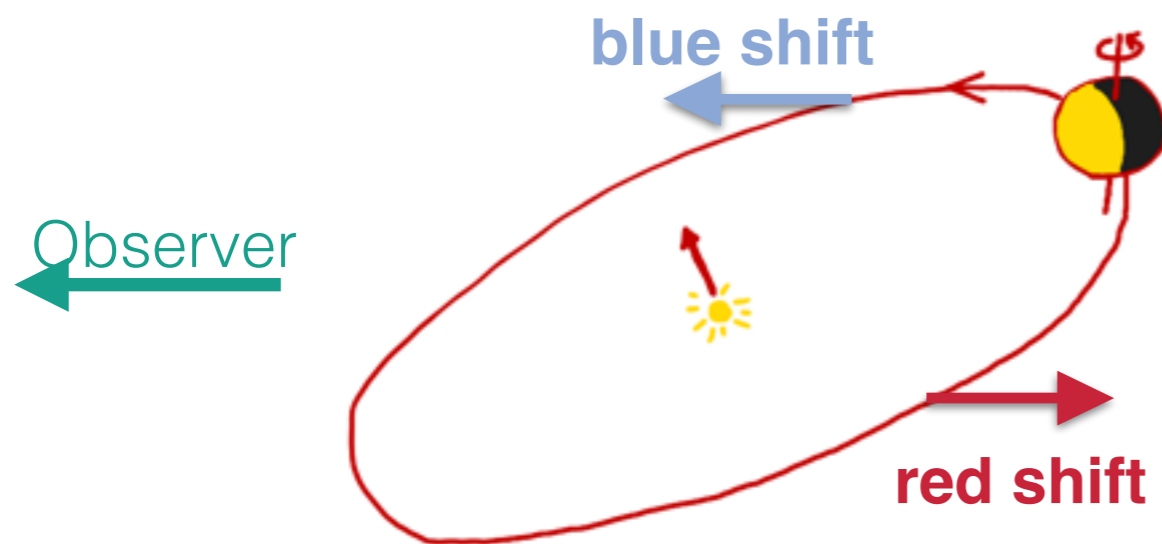
直接撮像ができるほど軌道長半径が大きくない (反射)

つまり、まともに話せることがない

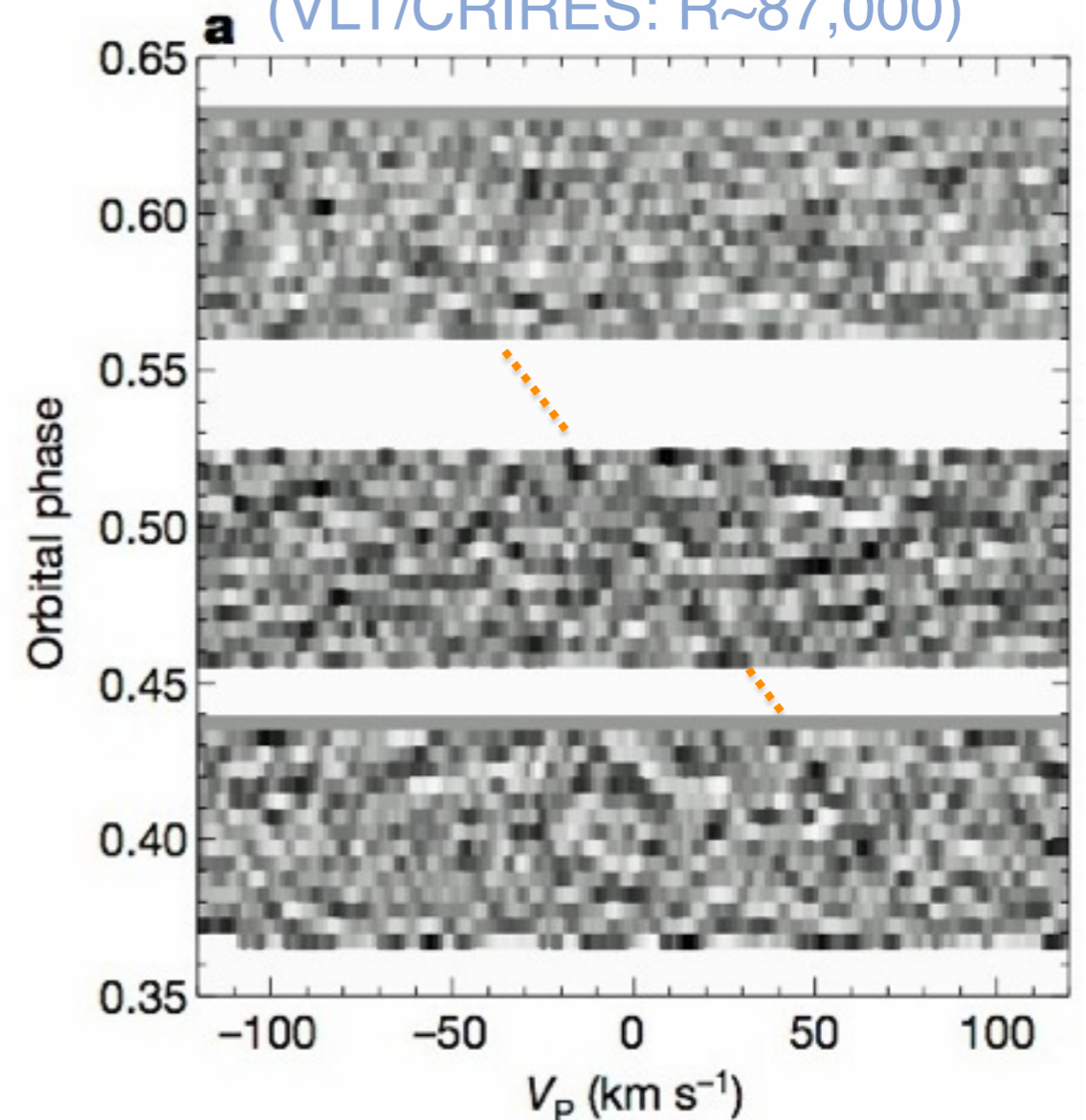
Planetary Radial Velocimetry

星+惑星のスペクトルと、分子線テンプレートの相互相関をとることで分子と惑星の視線速度を検出

1. 高分散分光 ($R \sim 10^5$)
2. たくさんのラインを用いS/N向上 ($N > 50$)

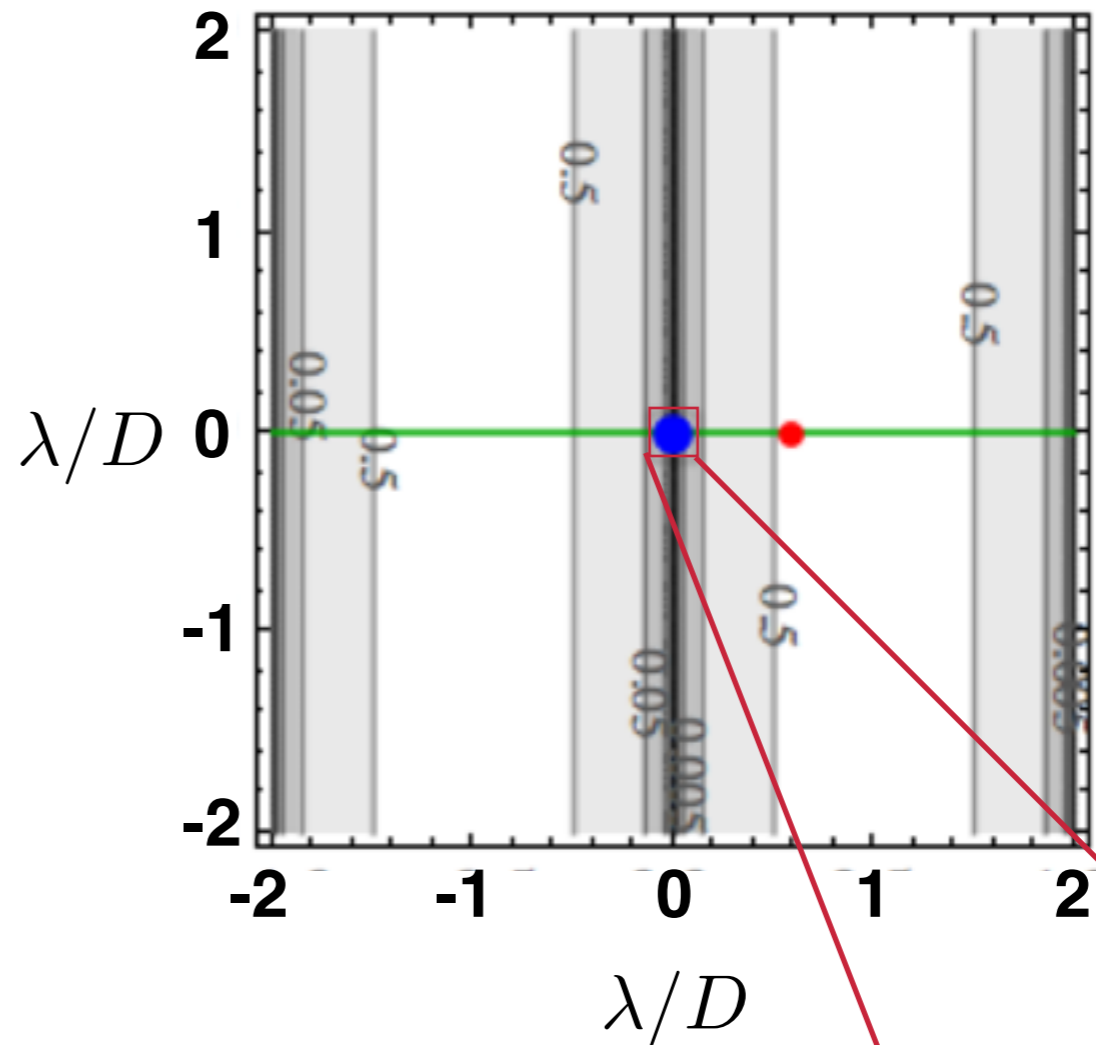
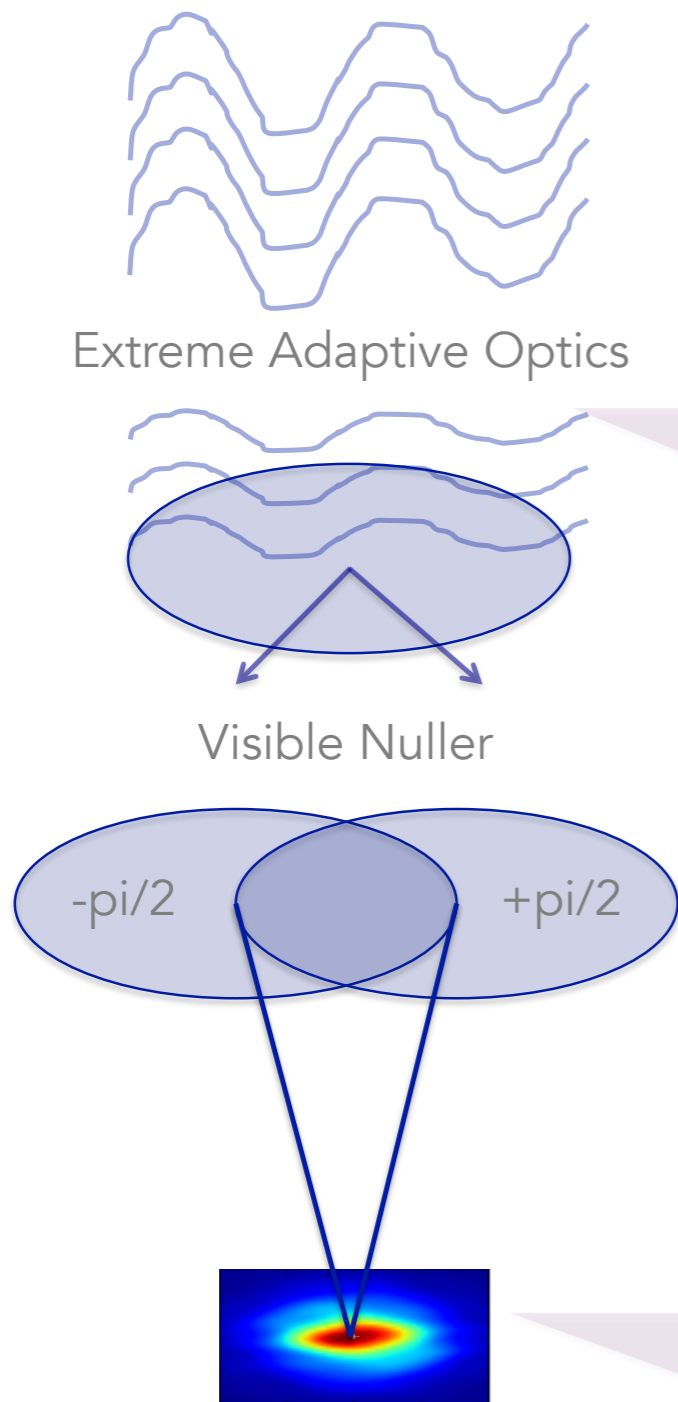


~ 50 CO lines $v = 110 \pm 3$ km/s
(VLT/CRIRES: $R \sim 87,000$)

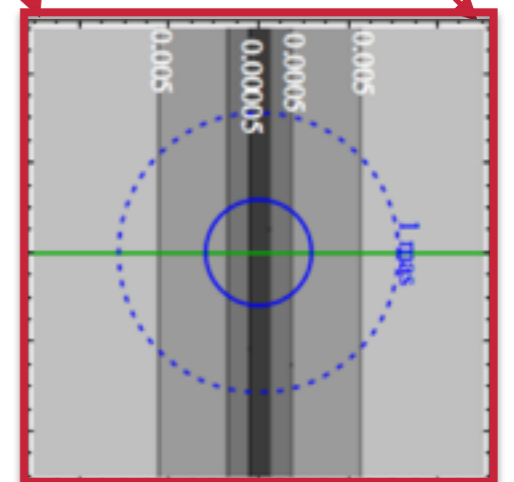


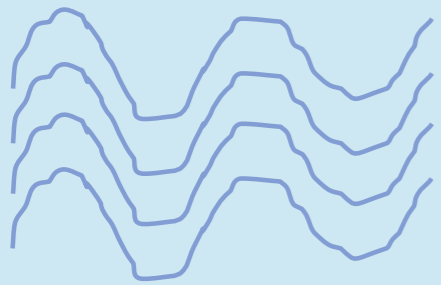
Brogi et al. 2012, Nature 486, 502

Spectroscopic Coronagraph

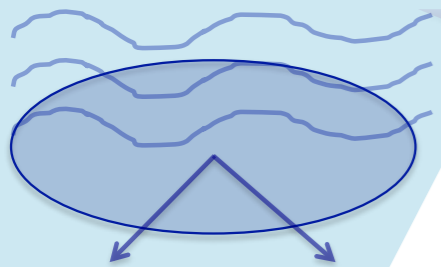


mock 55 Cnc b
 $a=0.11$ au
 $d=12.3$ pc
2.3 micron (CO)
 $D = 30$ m

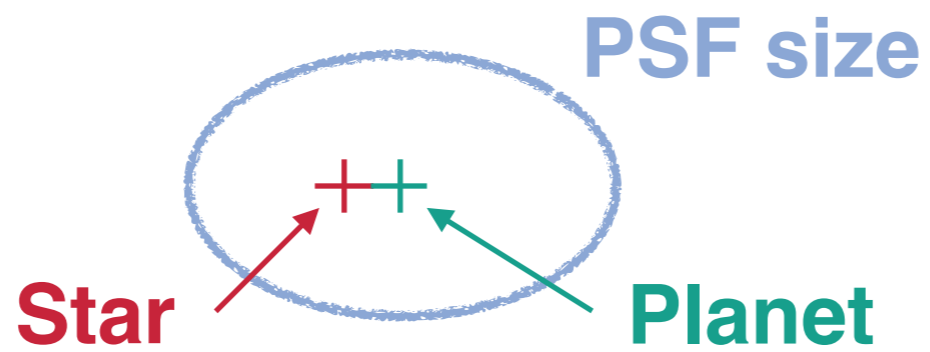
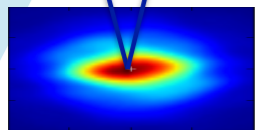
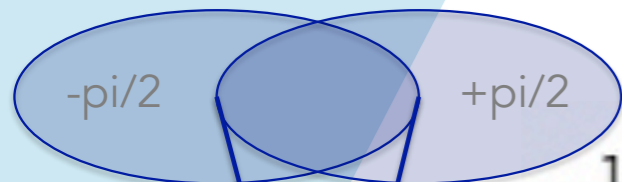




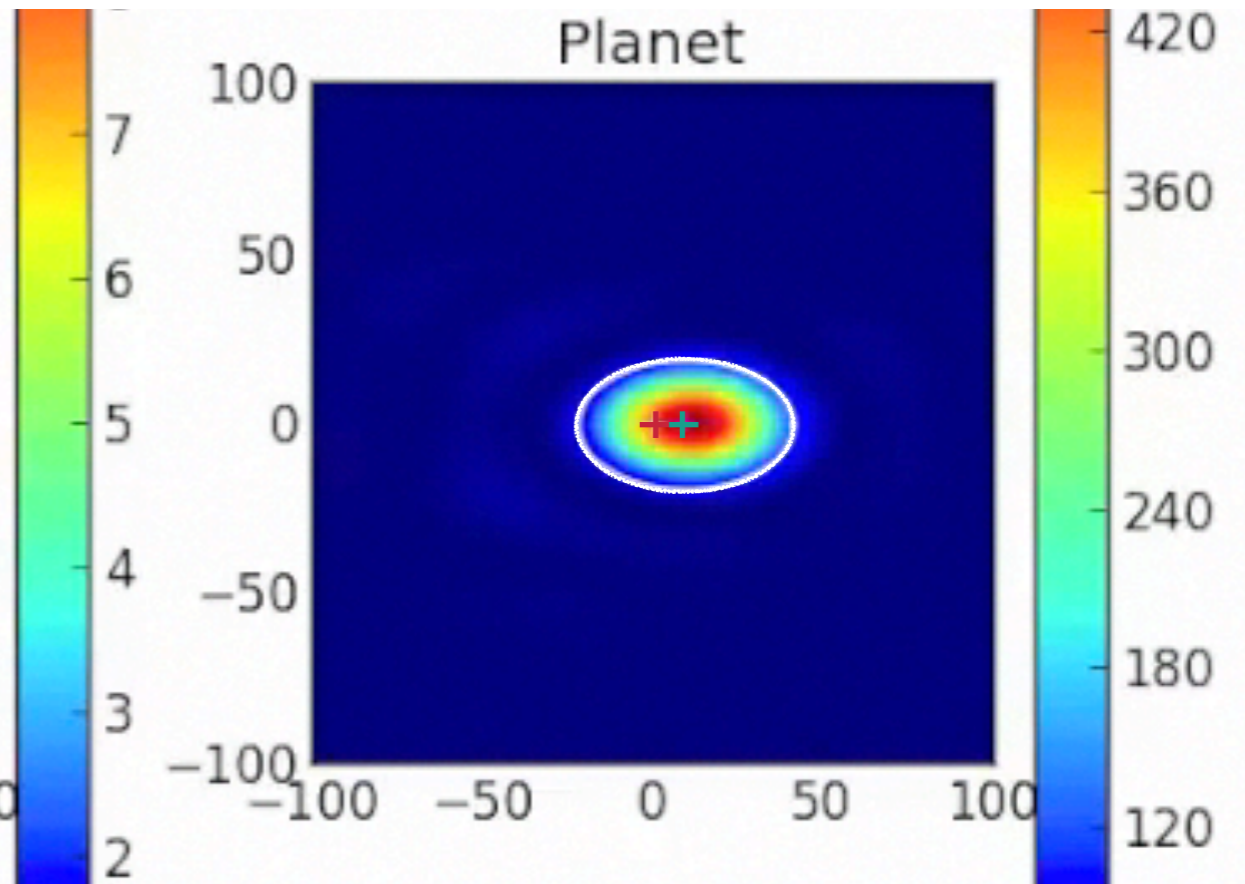
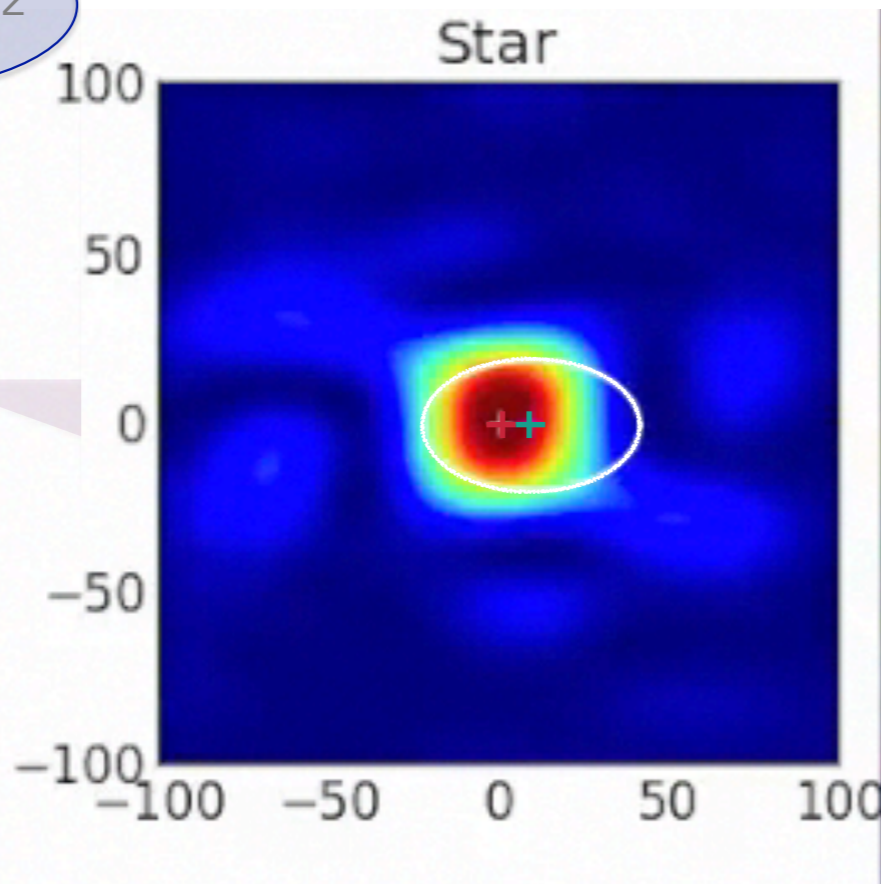
Extreme Adaptive Optics



Visible Nuller

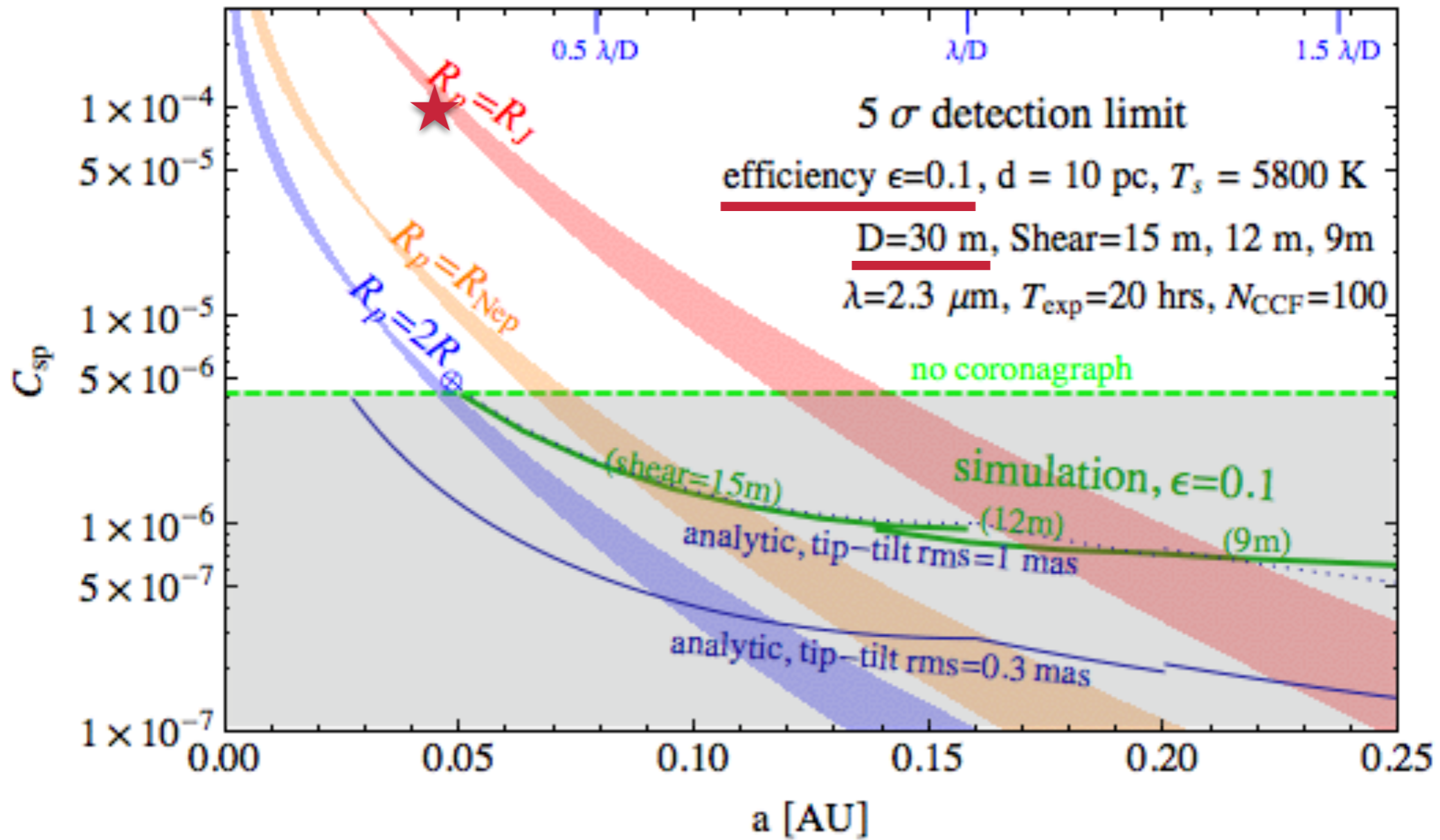


Contrast 50倍改善
S/N は~3倍改善
(口径が3倍と同じ)



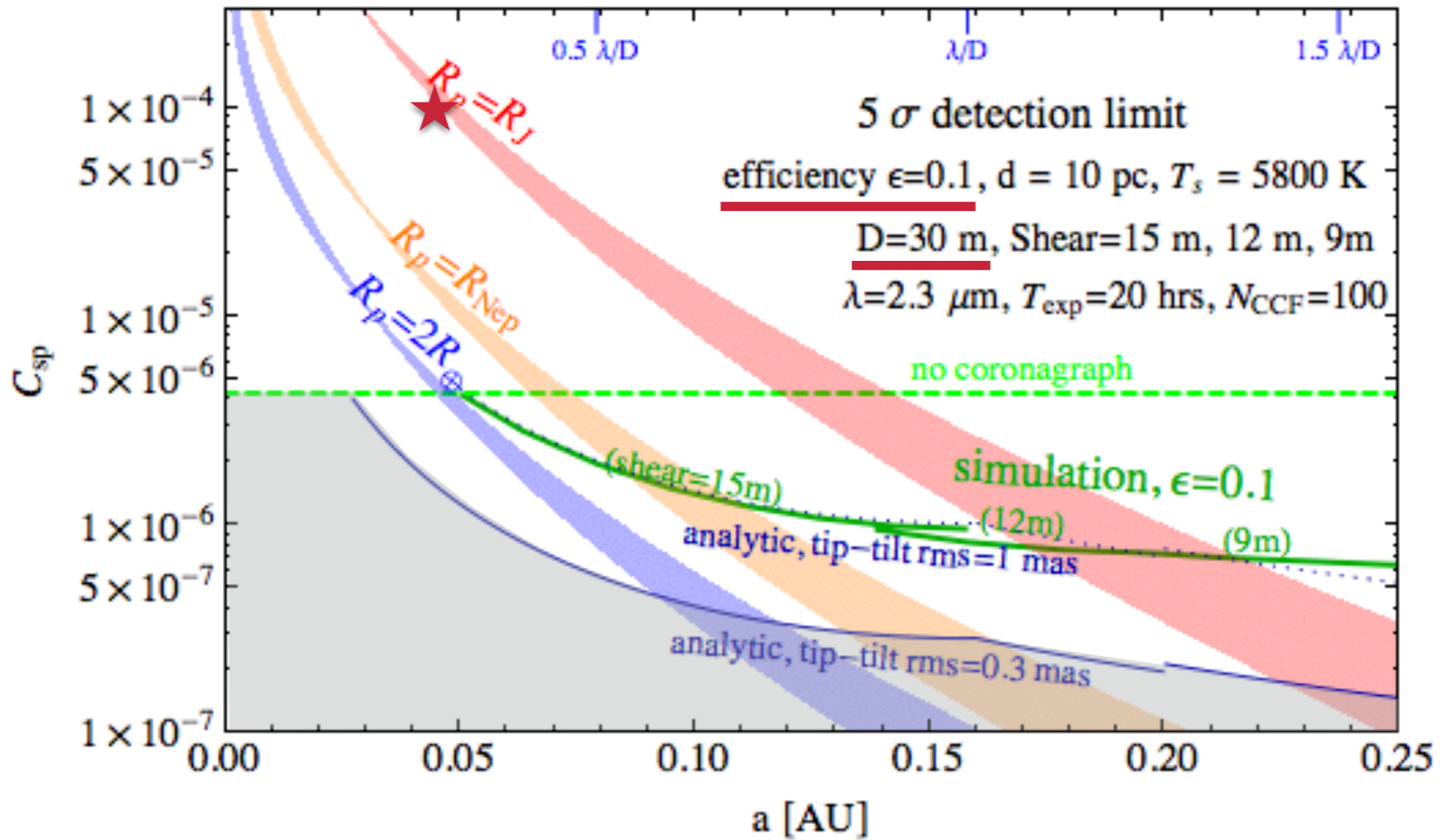
輻射から0.1 AU以遠にアプローチ

惑星・恒星コントラスト



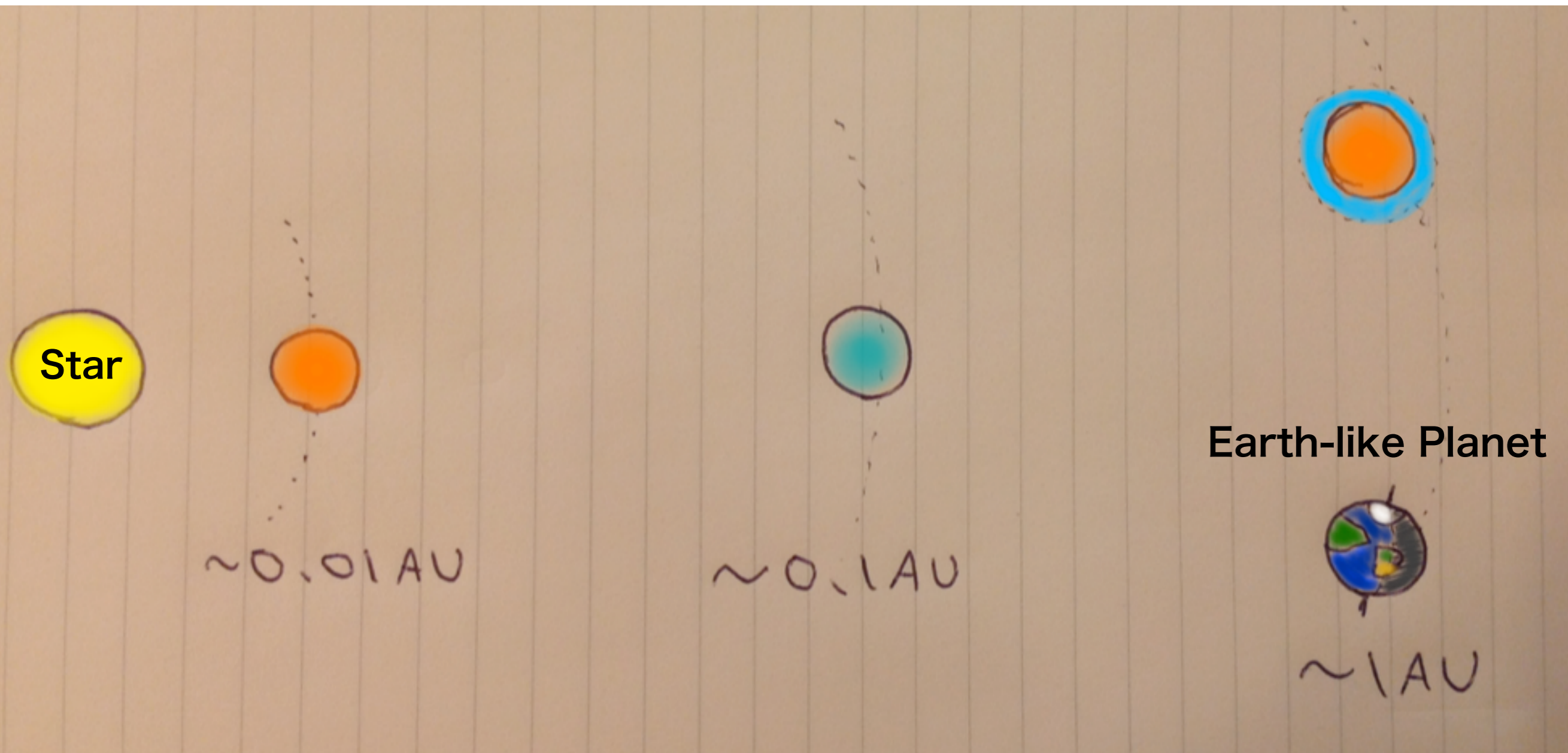
輻射から0.1 AU以遠にアプローチ

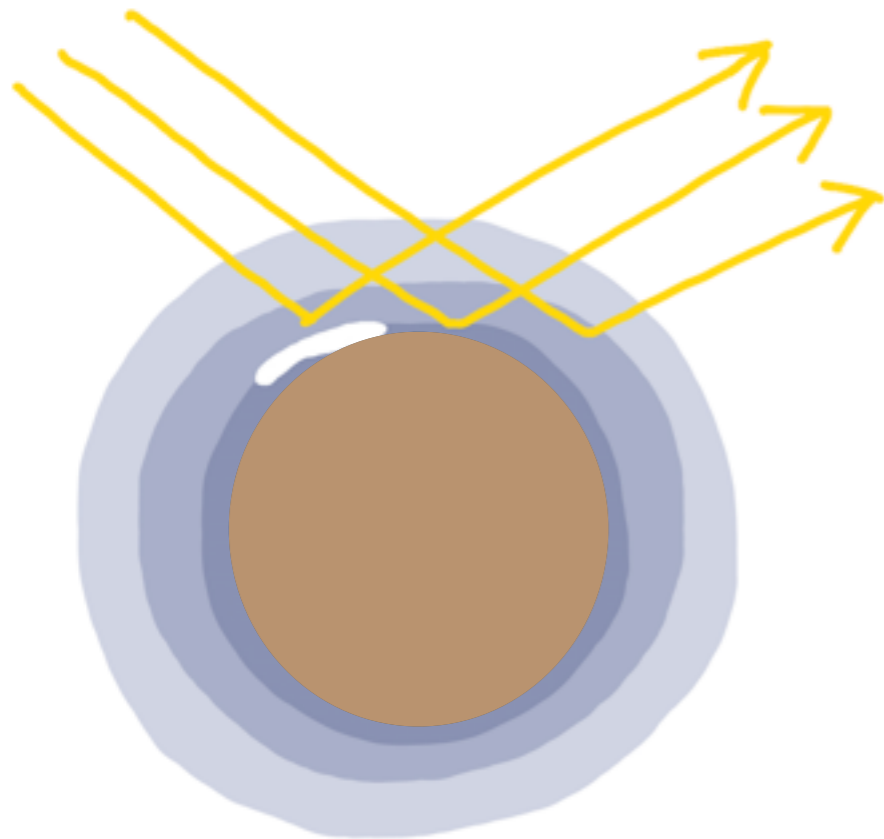
惑星・恒星コントラスト



ただし、どのような地球型惑星がいて、どのような分子などで特徴付けられるかが今後の課題

低温下 ($T \sim 300\text{K}$) の岩石惑星





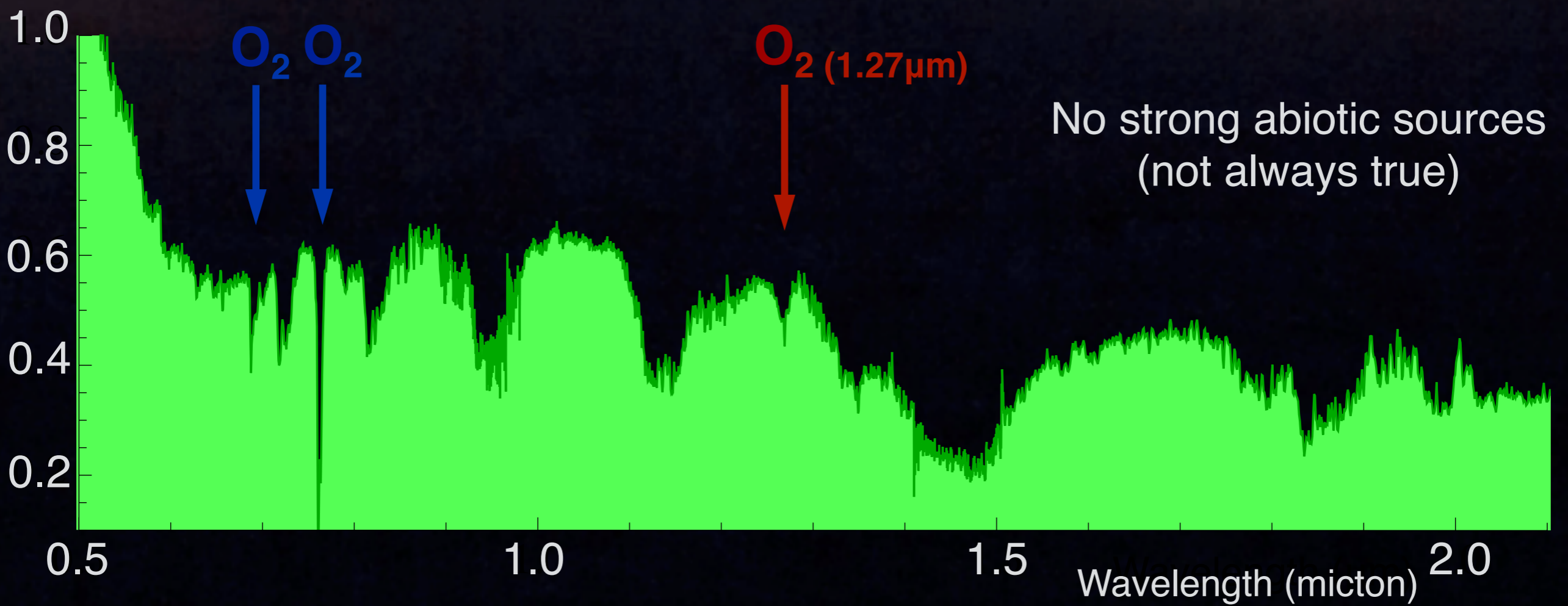
● 低温の惑星は、反射光の直接撮像が有望

→ 惑星大気分子・原子は、 $\tau \sim 1$ の反射高さまでのあいだの吸収線として、反射スペクトルに痕跡を残す

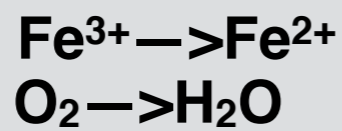
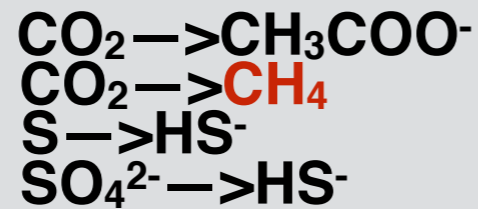
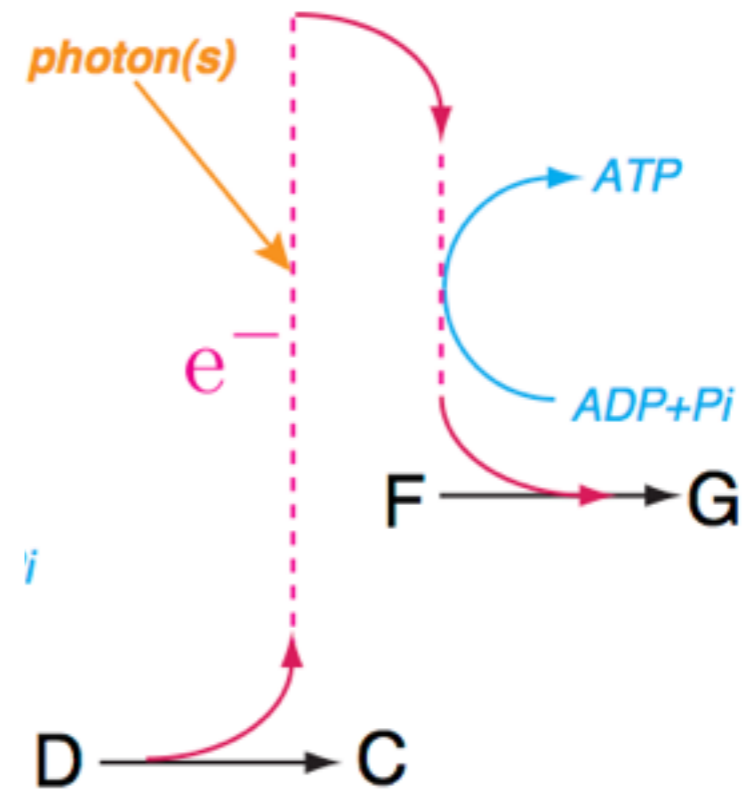
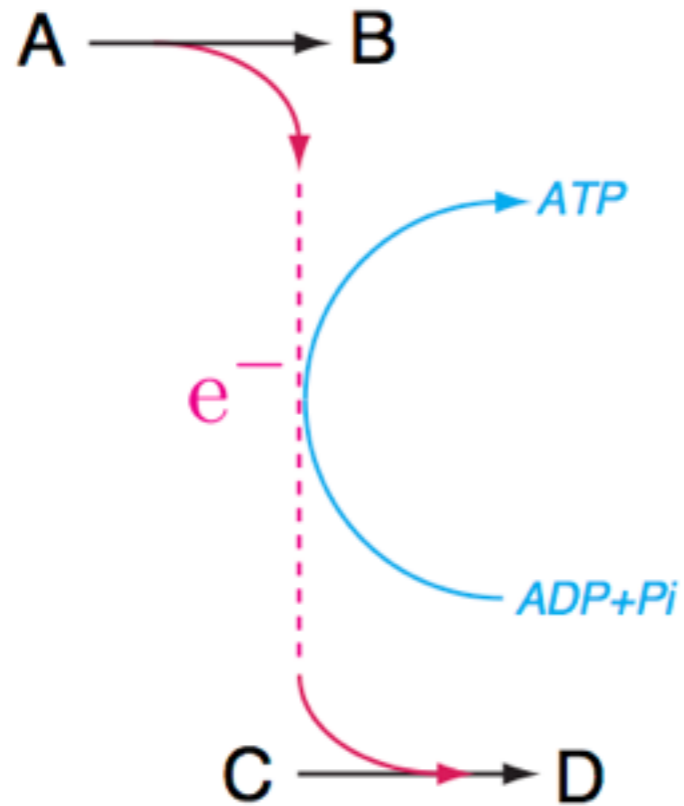
惑星のモデルとしては地球があり、
そしてそのような惑星が最大の探査目標でもある

Reflection Spectra of Earthshine

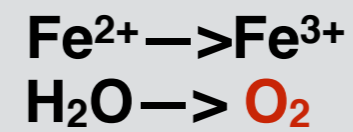
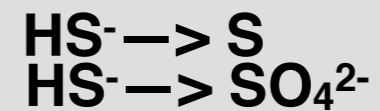
Courtesy of E. Palle



Metabolic Biomarkers



electron acceptor



electron donor

Semimajor axis of Habitable Zone

$$(1 - A)F_{\text{in}}\pi R_p^2 = 4\pi\sigma_{\text{SB}}R_p^2T_p^2$$

incoming energy
outgoing radiation

$$F_{\text{in}} = L_{\star}/4\pi a^2 : \text{incoming flux}$$

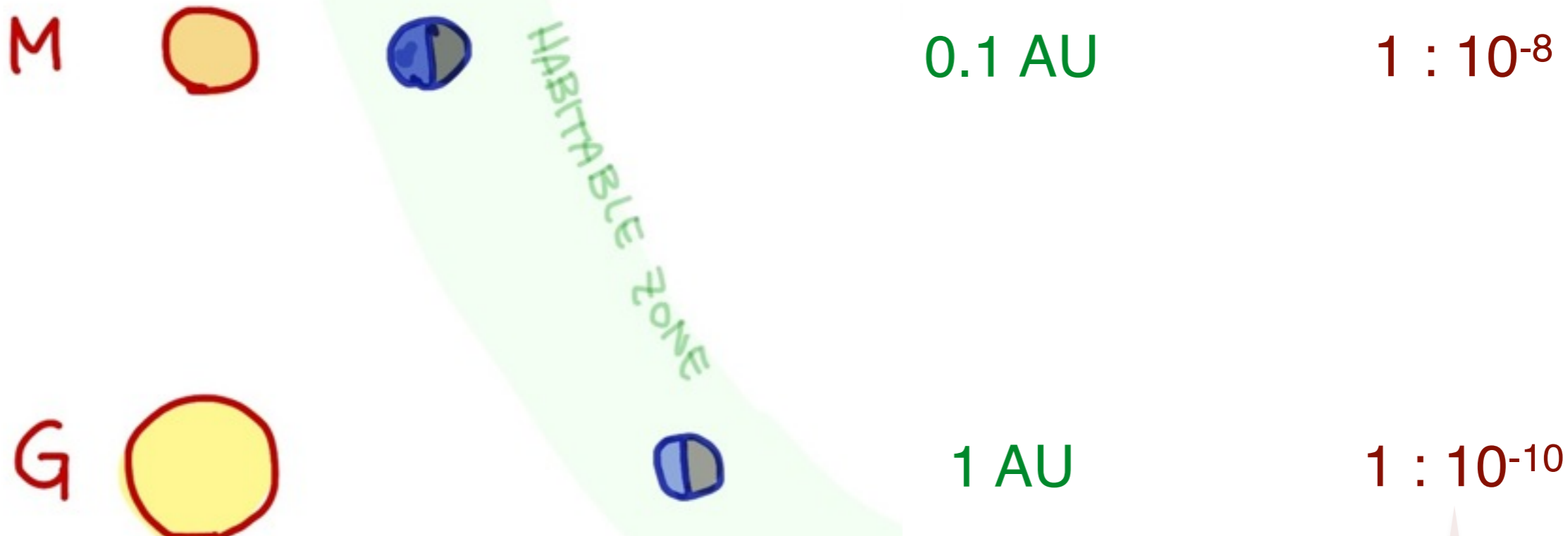
A : albedo

R_p : planetary radius

a : semimajor axis

L_{\star} : stellar luminosity

T_p : equilibrium planet temperature

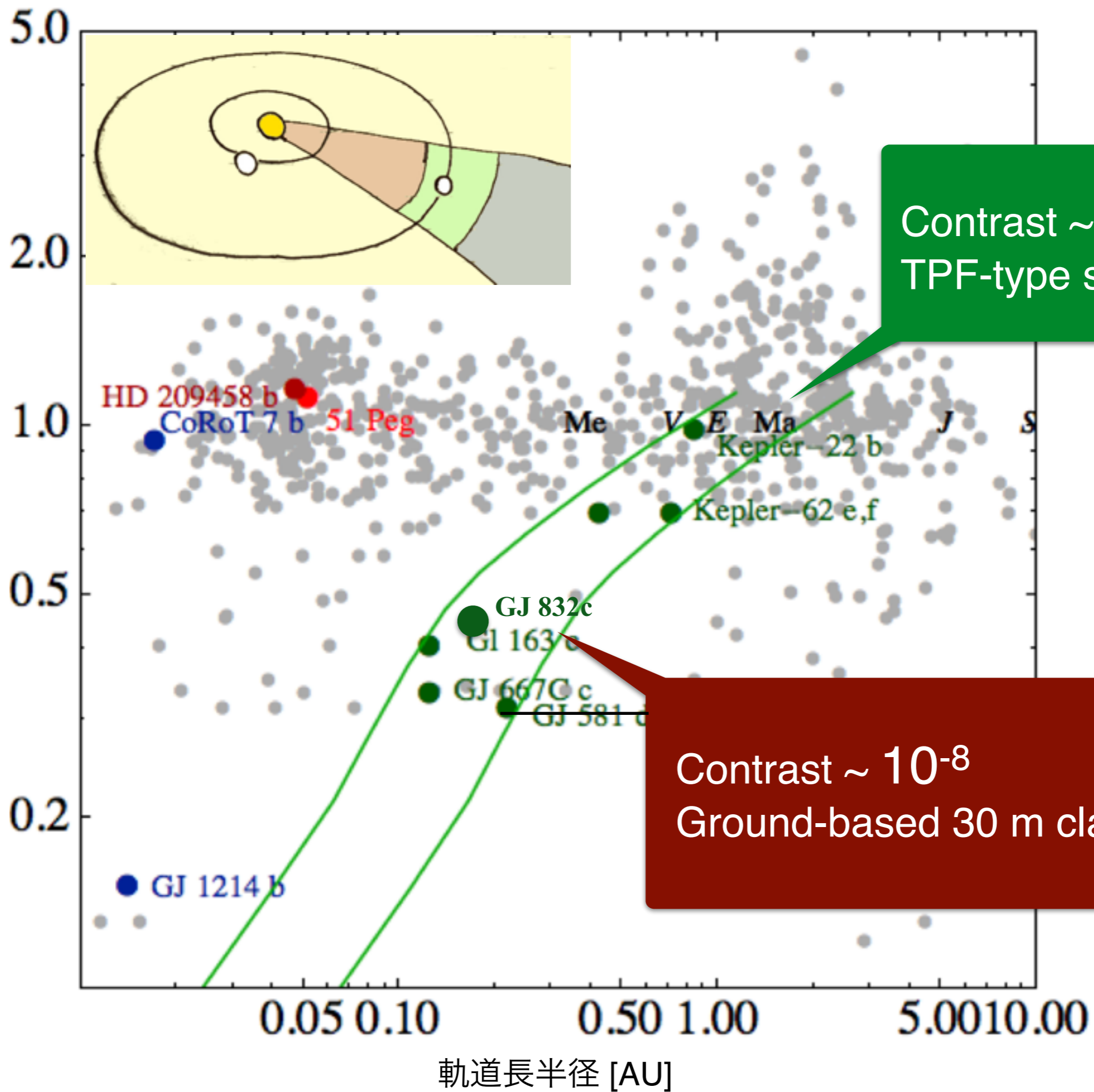


Planet-Star Contrast in HZ

$$L_{p,\text{ref}} = AF_{\text{in}}\pi R_p^2 = \frac{A}{1 - A}4\pi R_p^2\sigma_{\text{SB}}T_p^4 \approx \text{const. for a fixed } T_p$$

i.e. Contrast $\equiv L_{p,\text{ref}}/L_{\star} \propto L_{\star}^{-1}$

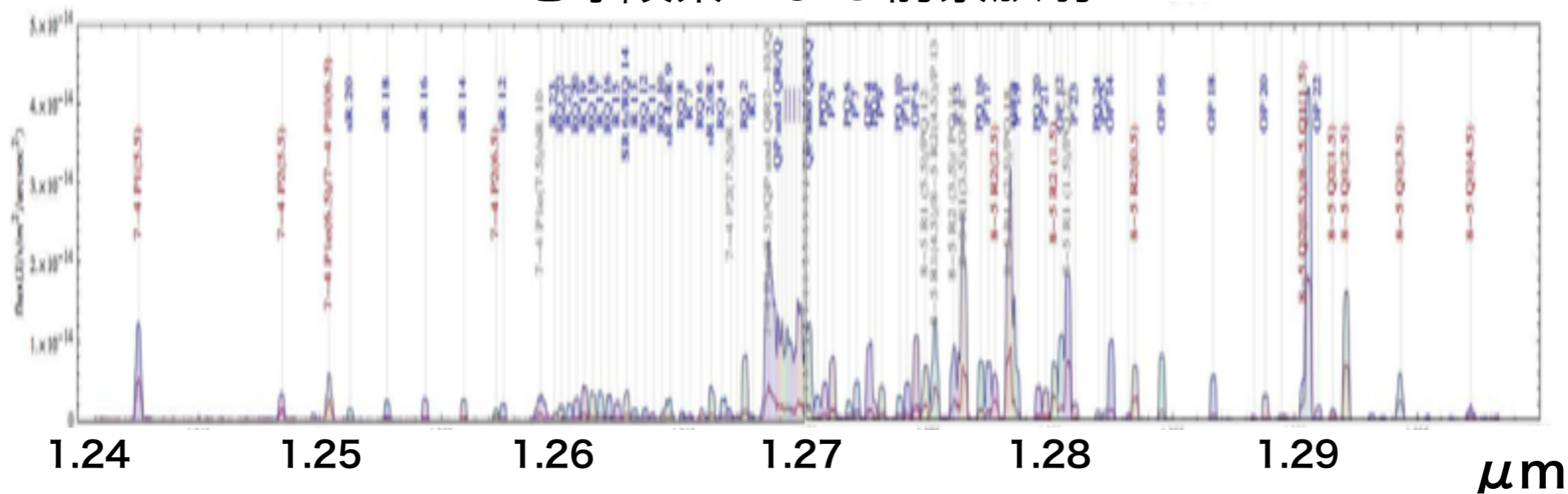
恒星質量 [太陽質量]



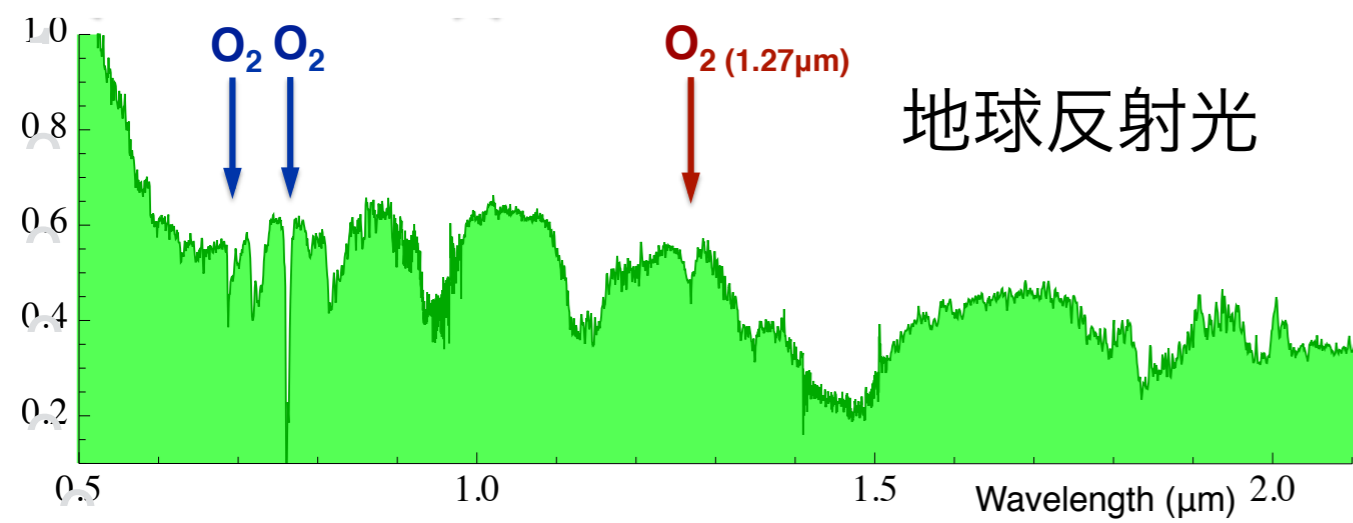
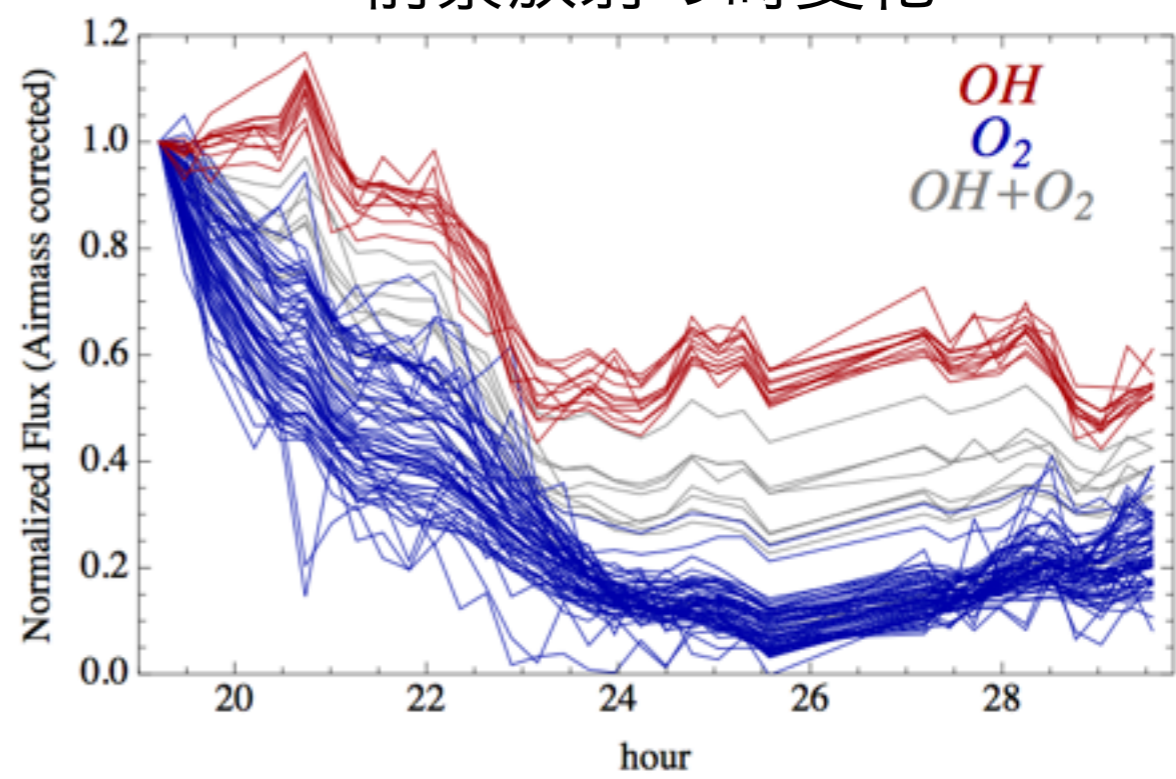
Contrast $\sim 10^{-10}$
TPF-type space missions

Contrast $\sim 10^{-8}$
Ground-based 30 m class telescope

地球酸素による前景放射

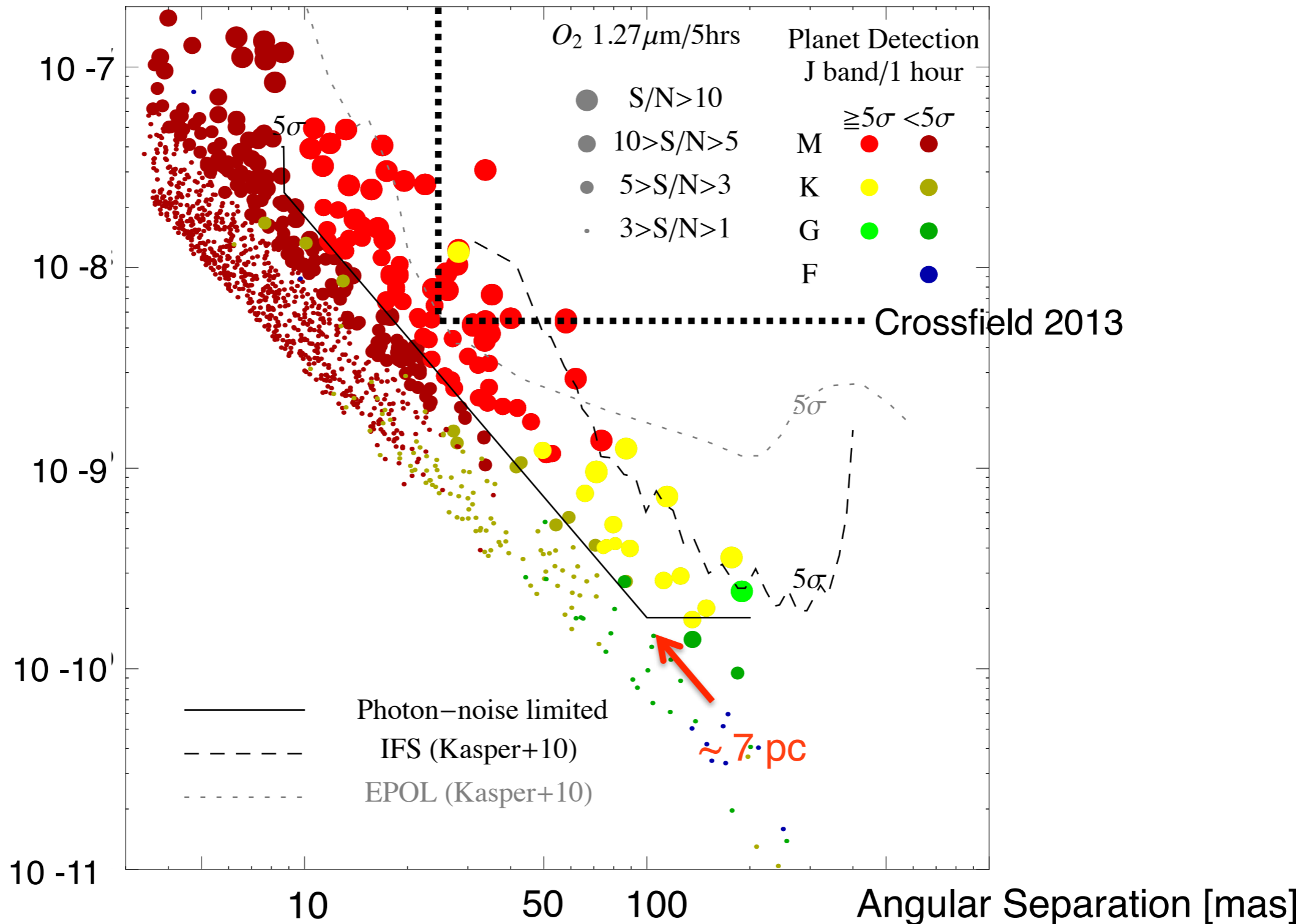


前景放射の時変化

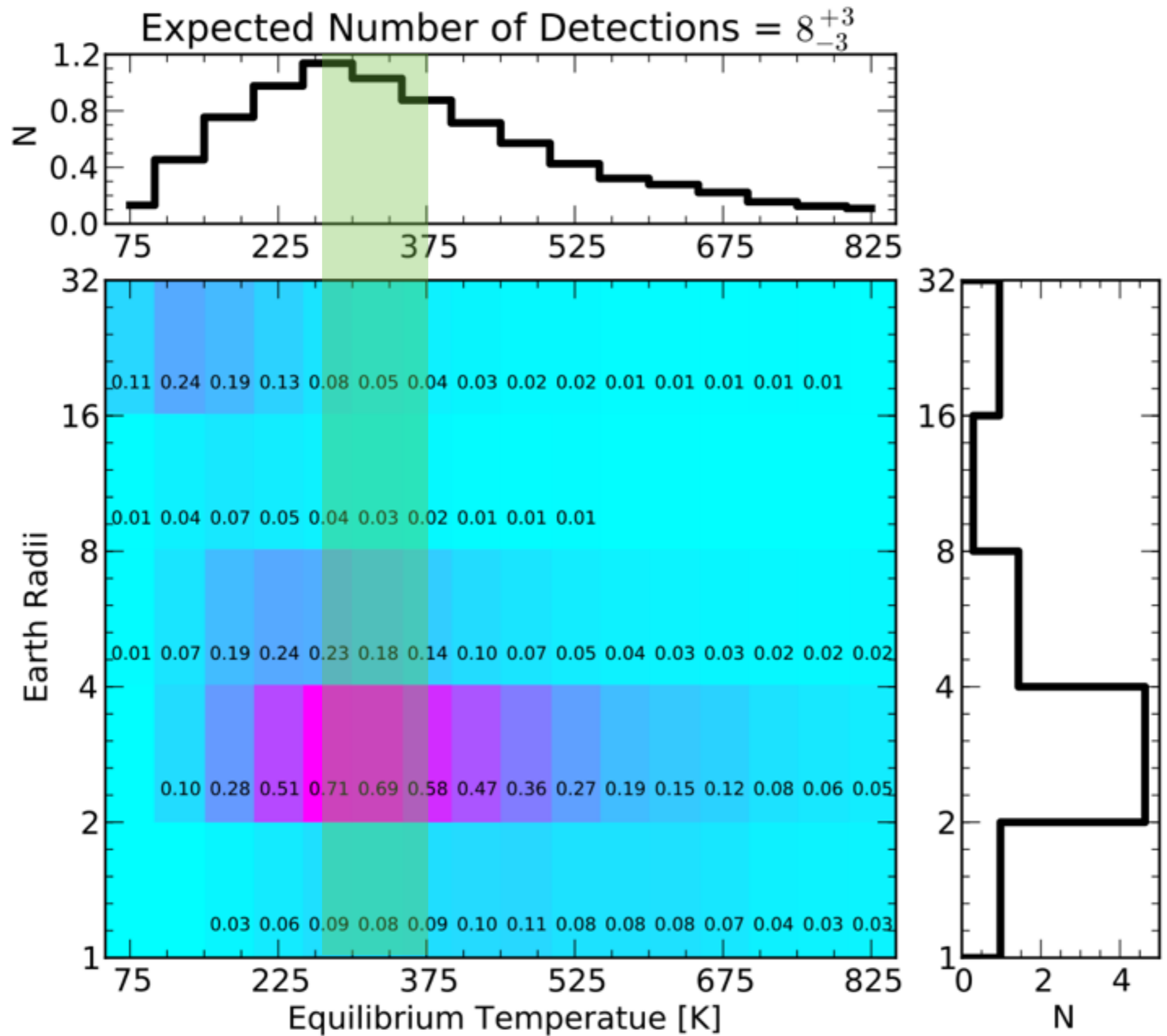


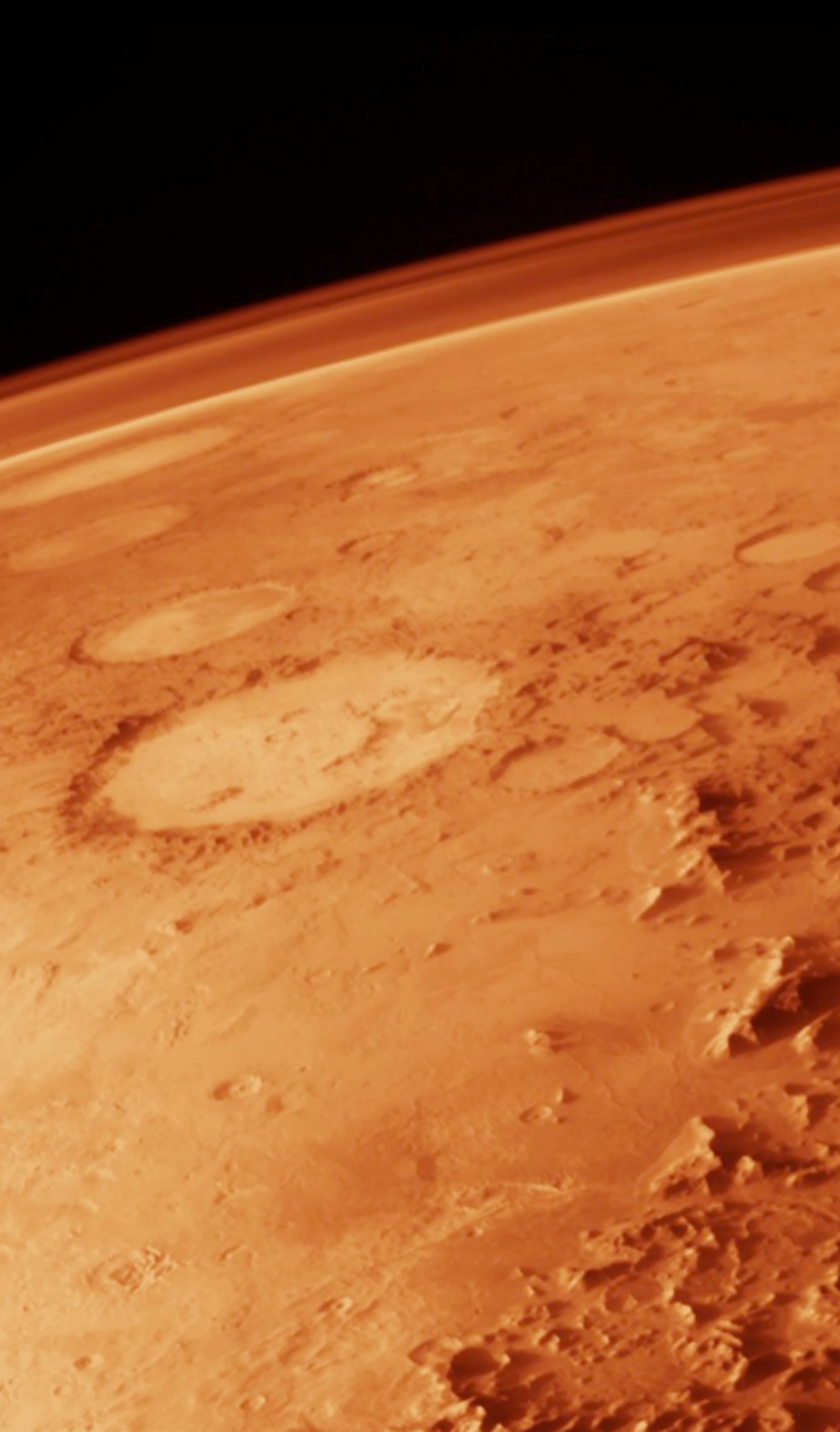
理想的な直接撮像装置なら、TMTで数十の近傍M型星を探索可能
 →TMTにおけるSEIT計画

Planet - Star Contrast



Expected number from Kepler results by I. Crossfield (2013) MNRAS





Spinrad et al. (1963)
Doppler-shifted **Water** Vapor
in **Martian** Reflection Spectra



Stacked H₂O lines
817.697 nm, 818.927 nm,
822.696 nm, 828.202 nm

Benchmark test using a simulated Earth-twin

for Earth twin @early M(5 pc)

D=30m (ground)

20 days, R=50,000

$$F_{\text{speckle}} : F_p \approx 2000 : 1$$



molecular binary template

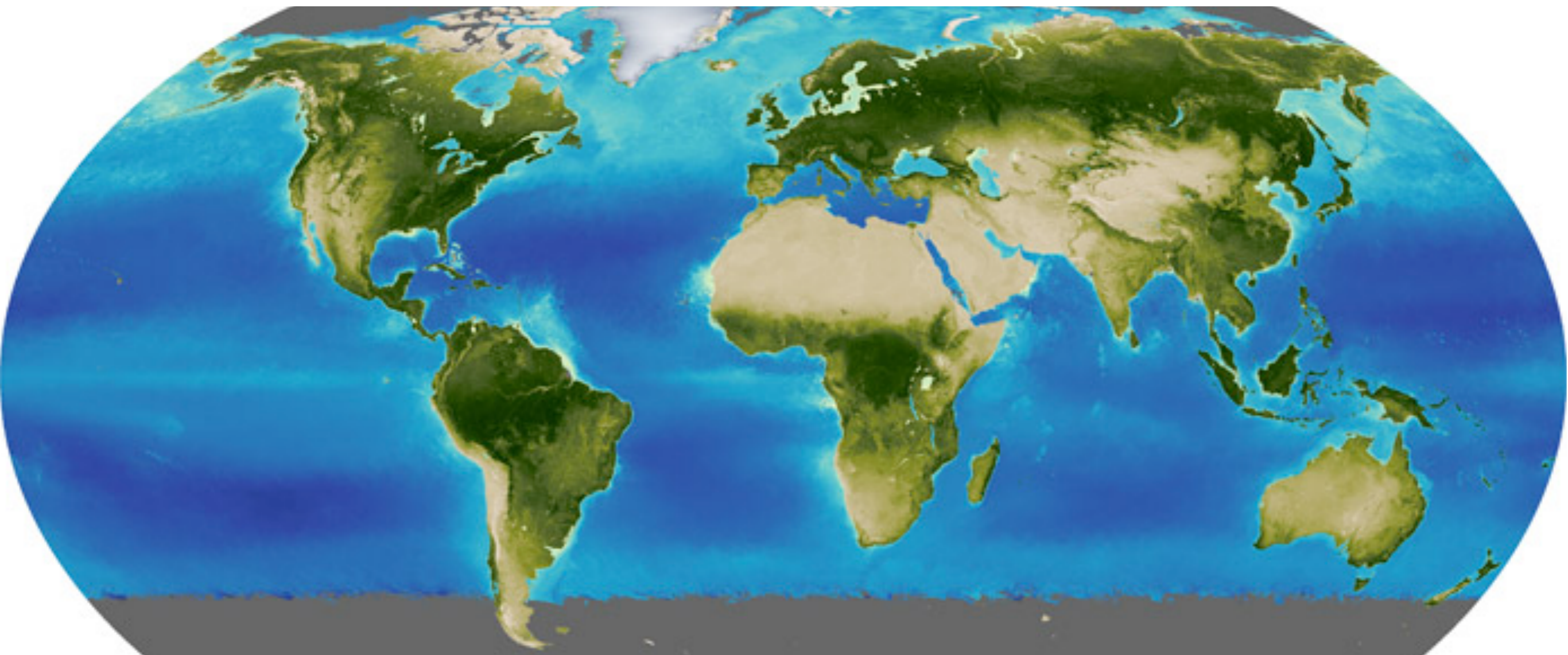
CCF



ExAO+Coronagraph (raw contrast = 10^{-5})
+ High-d spectroscopy (R = 50,000)

Water for line intensity = 10^{-24} - 10^{-22} cm²/cm

Oxygen 1.27 micron (J band)



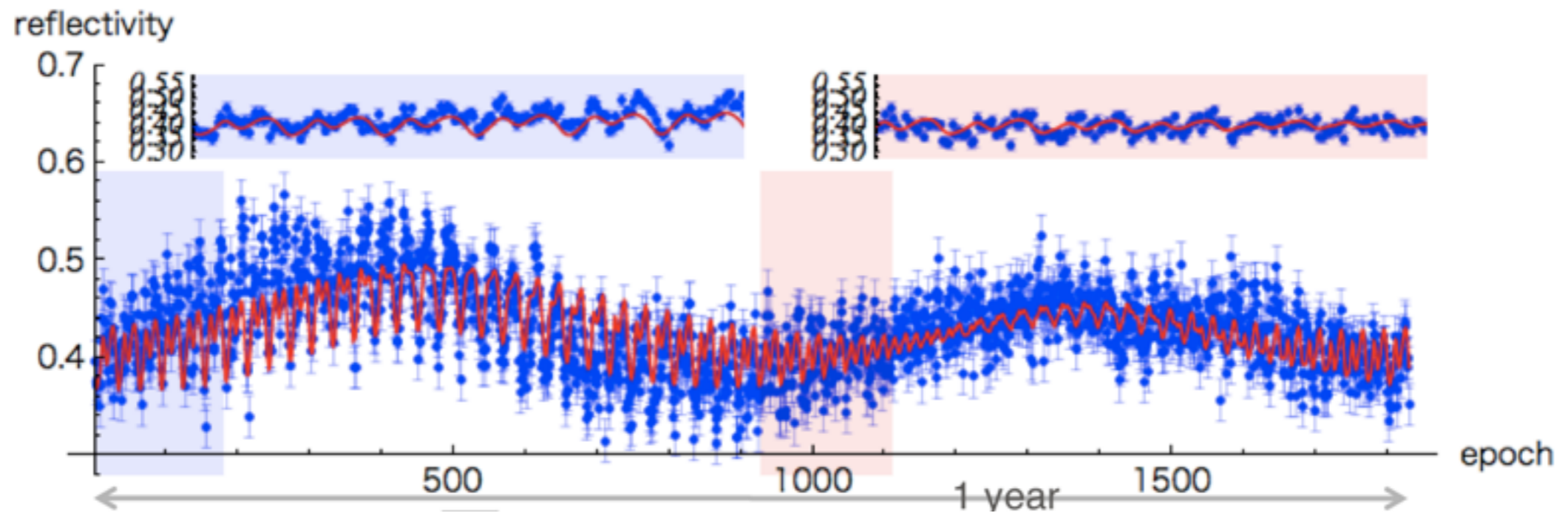
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)



Chlorophyll Concentration (mg/m³)



Flux variation of an Earth-twin @ G-star, d=10 pc
 D=16 m (space), 0.5 yr



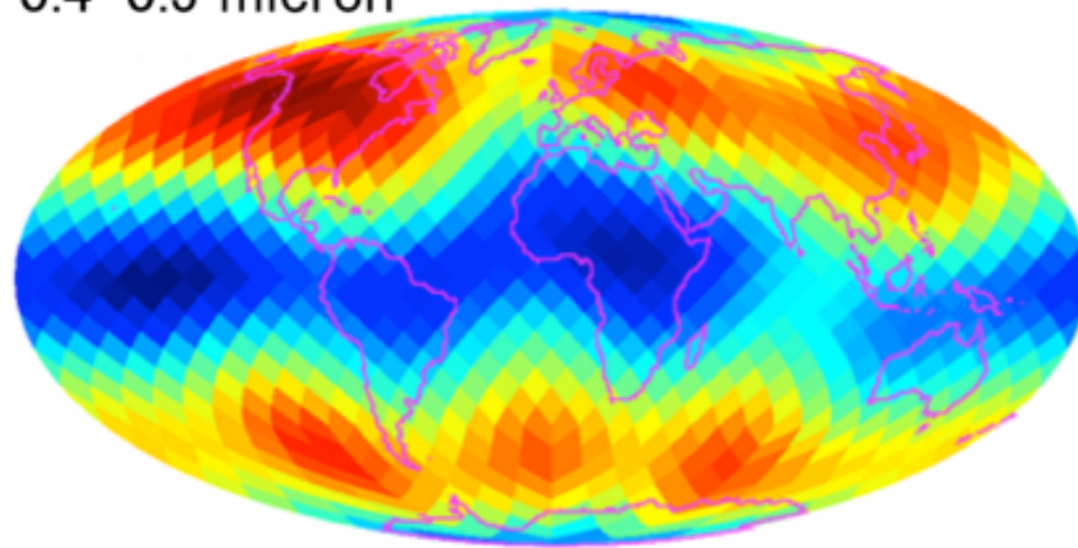
ライトカーブ
 $I(t) = \int d\Omega W(\phi, \theta; t) S(\phi, \theta)$
 反射の重み 惑星表面輝度

Tomography

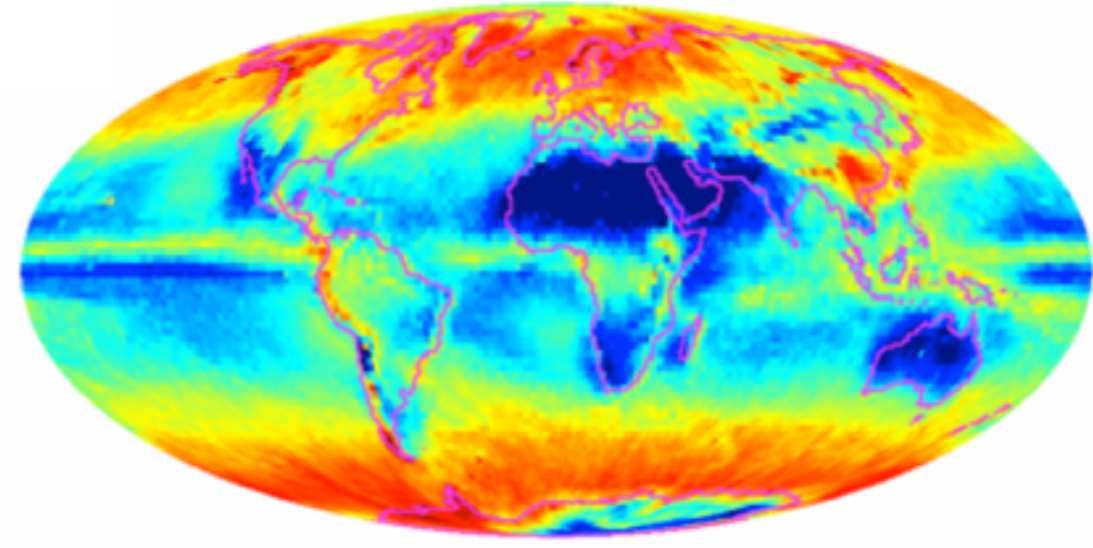
Kawahara and Fujii, 2010, 2011, Fujii and Kawahara 2012
 see also Ford+2005, Cowan+2009, Oakley & Cash 2009, Fujii+ 2010,2011

Inversion の結果

0.4-0.5 micron

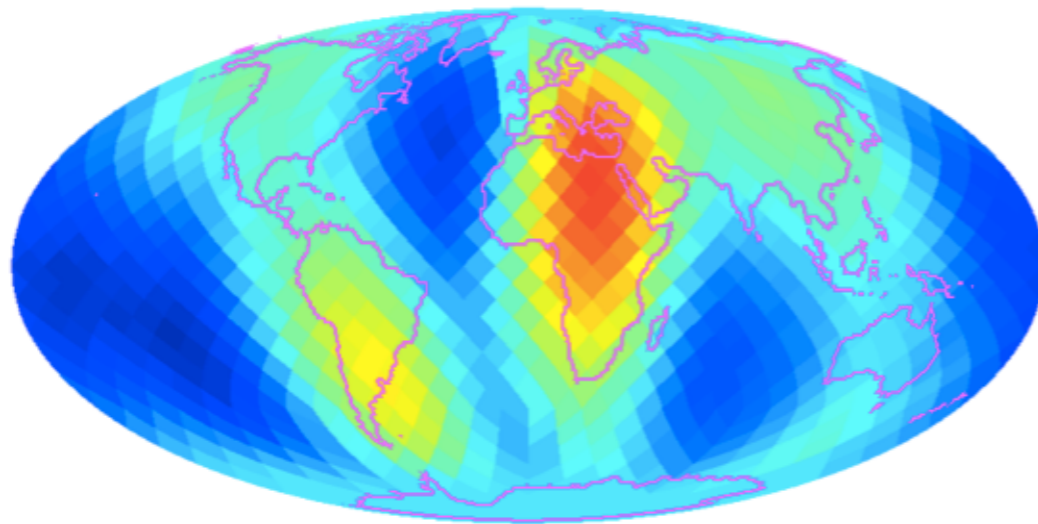


0.34 Reflectivity 0.94



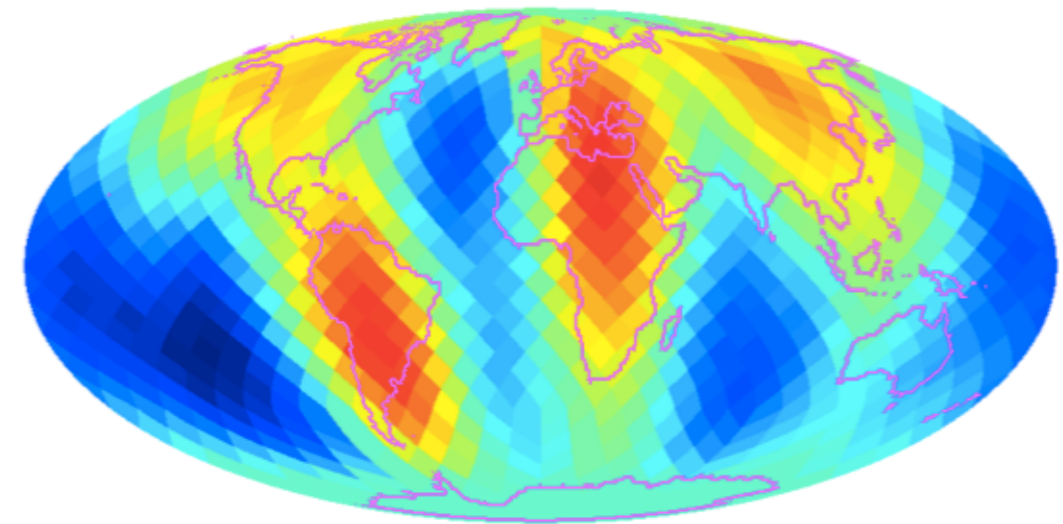
3.0 annual mean optical depth of clouds (log scale) 30.0

Reflectivity (0.8-0.9 micron) - (0.4-0.5 micron)



-0.12 Reflectivity Difference 0.12

Reflectivity (0.8-0.9 micron) - (0.6-0.7 micron)



-0.02 Reflectivity Difference 0.12

Kawahara and Fujii, 2010, 2011, Fujii and Kawahara 2012
see also Ford+2005, Cowan+2009, Oakley & Cash 2009, Fujii+ 2010,2011

地球型系外惑星の探査手法の現状まとめ

恒星に近い**高温岩石惑星**
初期の**熱い地球型惑星**



輻射スペクトルに含まれる大気組成から惑星の状態がわかる
惑星内部は**蒸発惑星(?)**の**透過光**に（疑いつつも）期待

もう少し**低温の地球型惑星**



まだよく探査方法がわからない
モデルも?、高分散が鍵か?

ハビタブルゾーンの地球型惑星



高コントラスト装置をもちいた**反射スペクトル観測**が有望
地上では**高分散化**も?

ハビタット探査



反射光強度変化を用いたマッピング手法で表面空間情報が得られる