

系外惑星大気の特徴付け

川島 由依

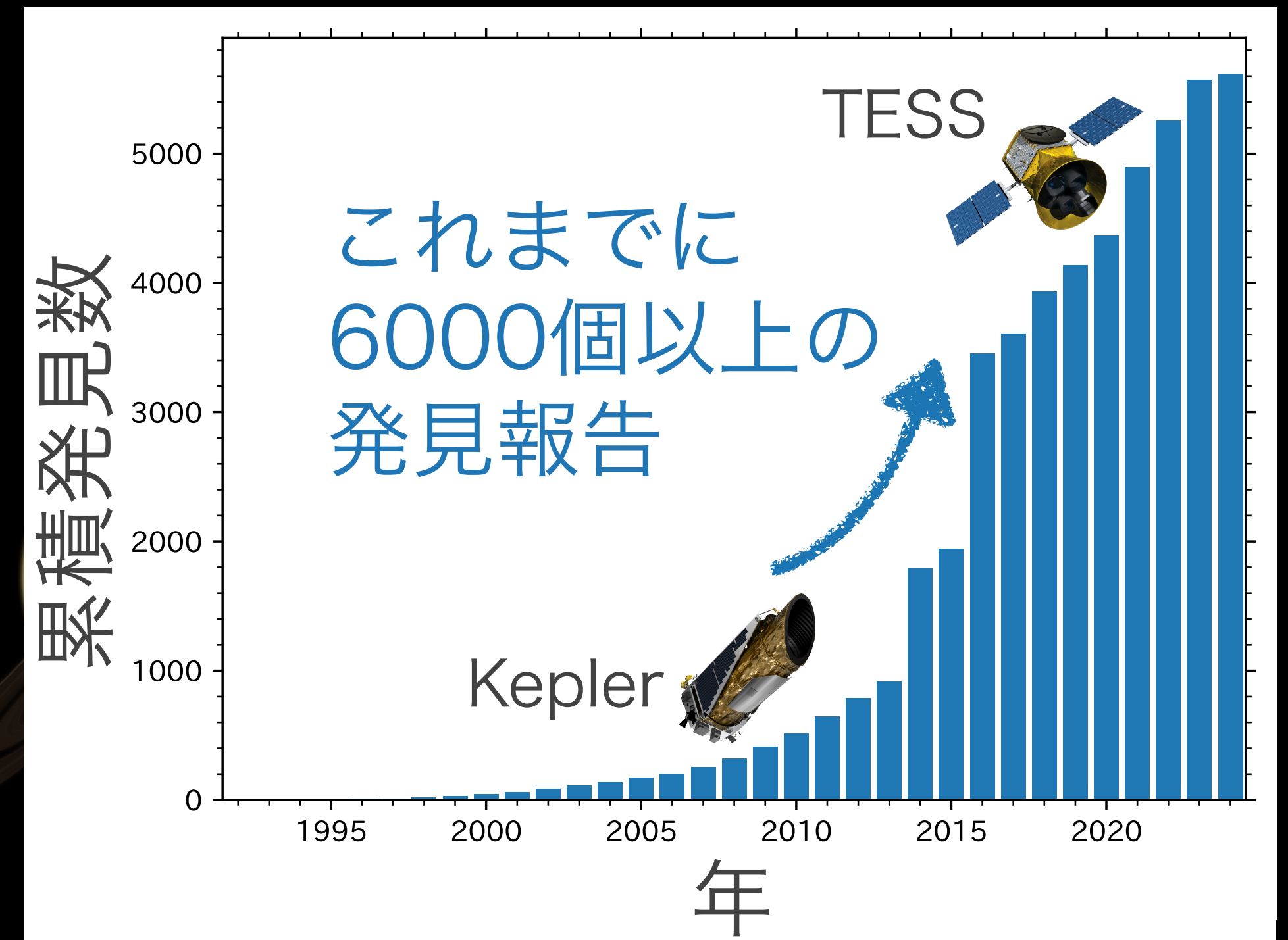
京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室

2025.12.2 初代星・初代銀河研究会2025

惑星系の統一的な理解にむけて

- ▶ 宇宙には他にどのような惑星系が存在するのか？
- ▶ 生命を育む惑星はあるのか？

太陽系外惑星の累積発見数

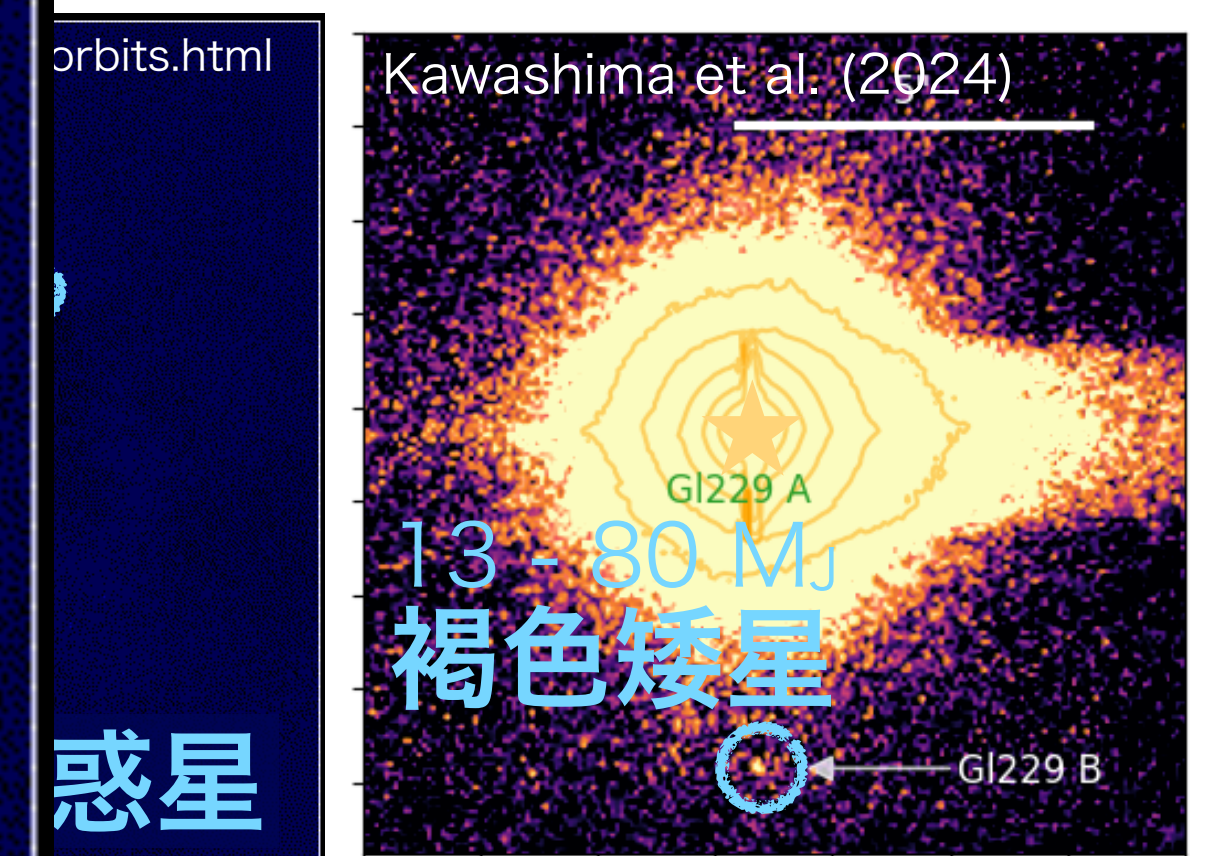
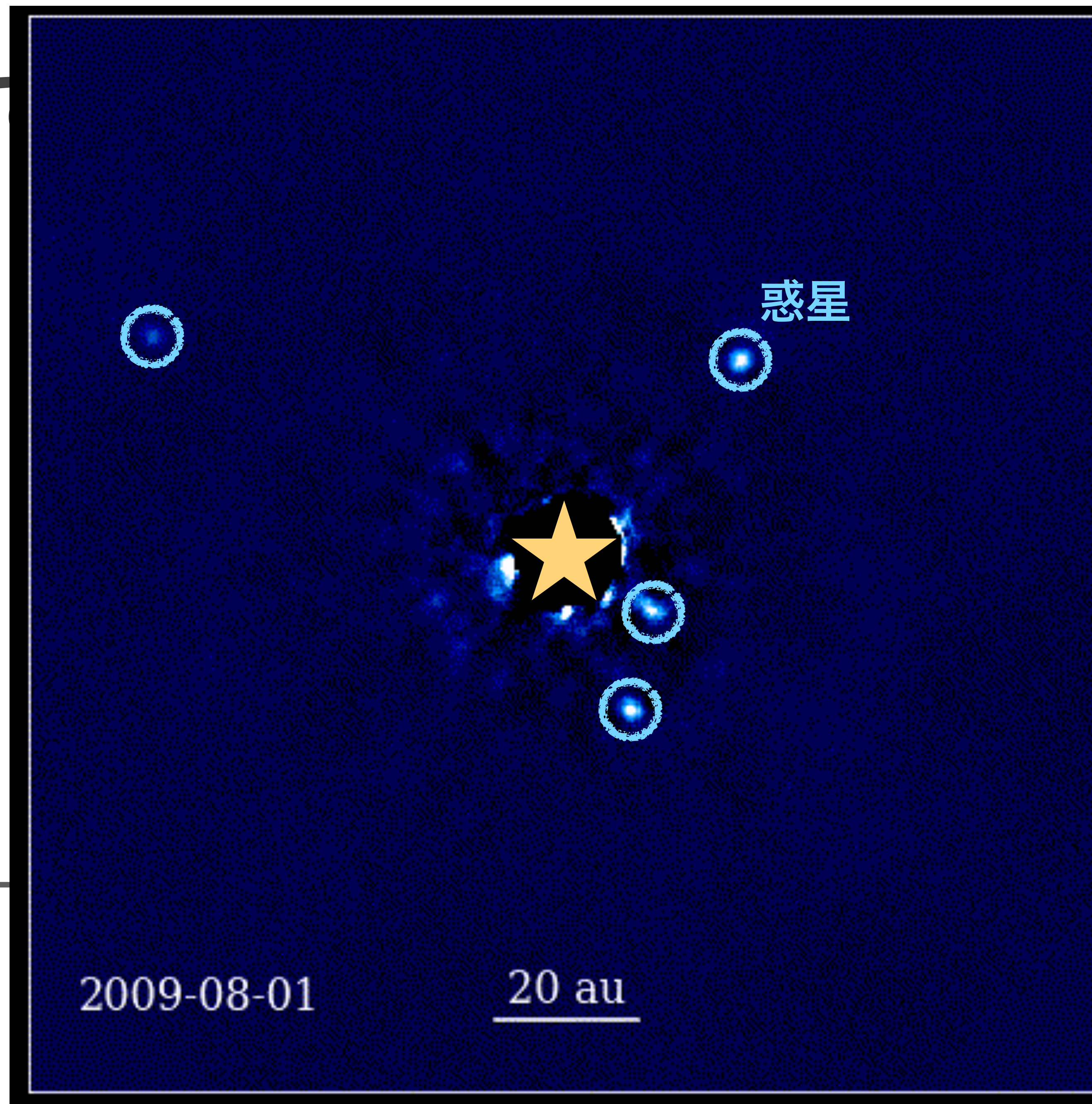


豊富な系外惑星系のサンプルを活用すれば、
惑星系の普遍的な性質の理解に迫れる

発見され

惑星：核融合を起こさない
褐色矮星：重水素の核融合
恒星：軽水素の核融合

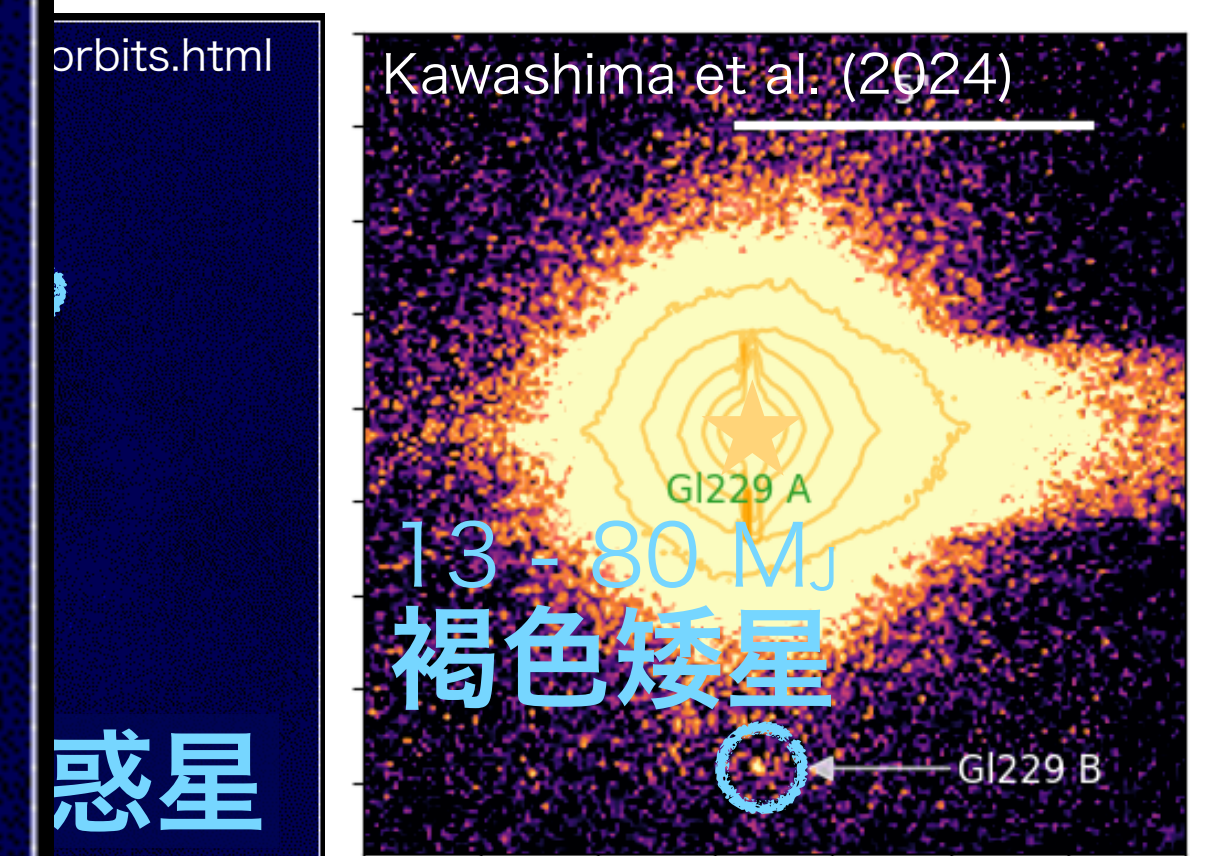
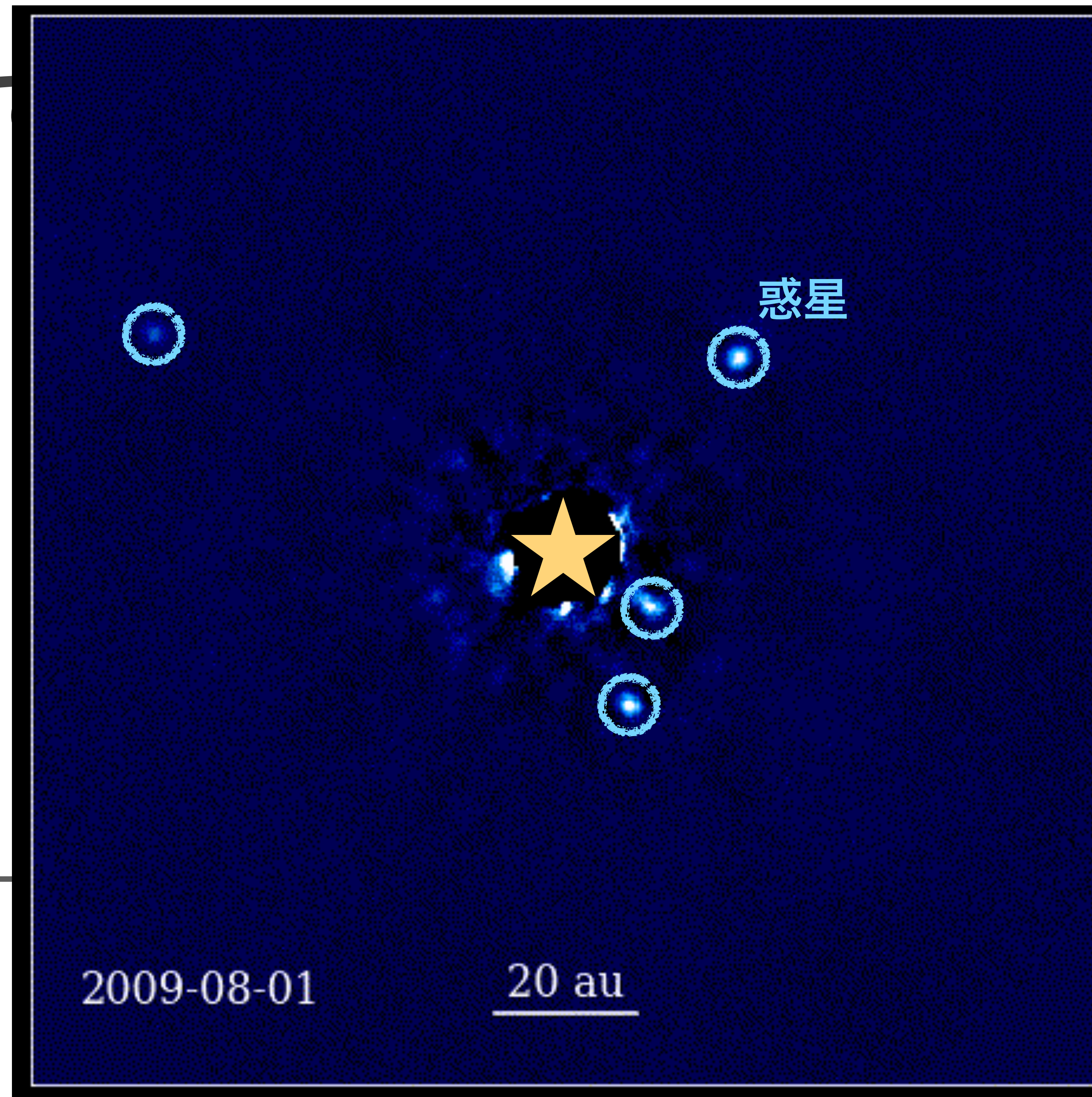
直接撮像惑星



発見され

惑星：核融合を起こさない
褐色矮星：重水素の核融合
恒星：軽水素の核融合

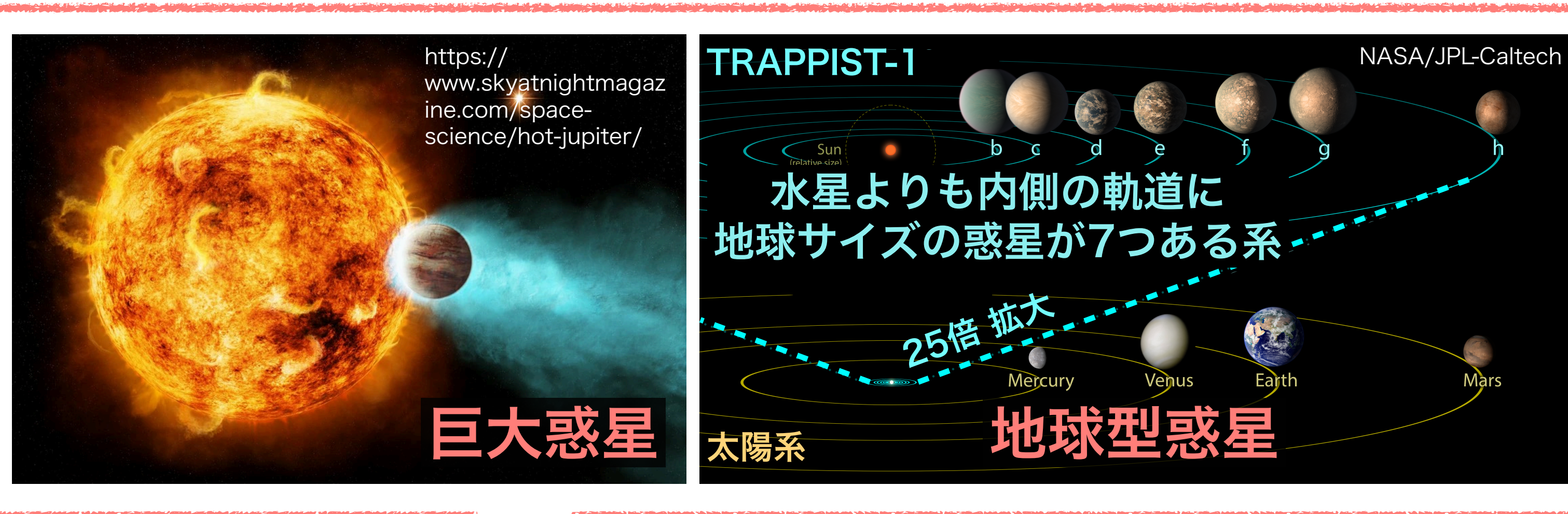
直接撮像惑星



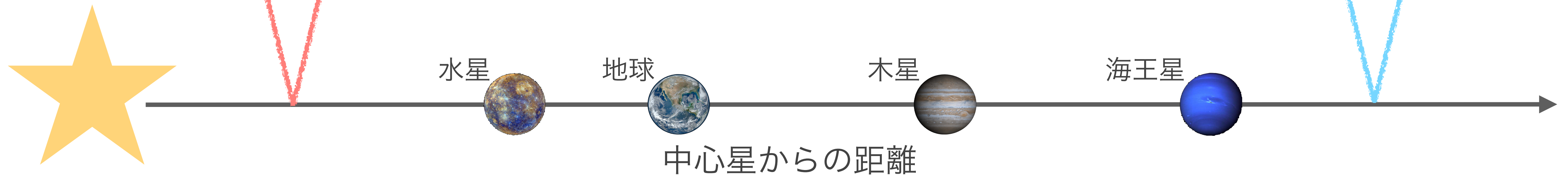
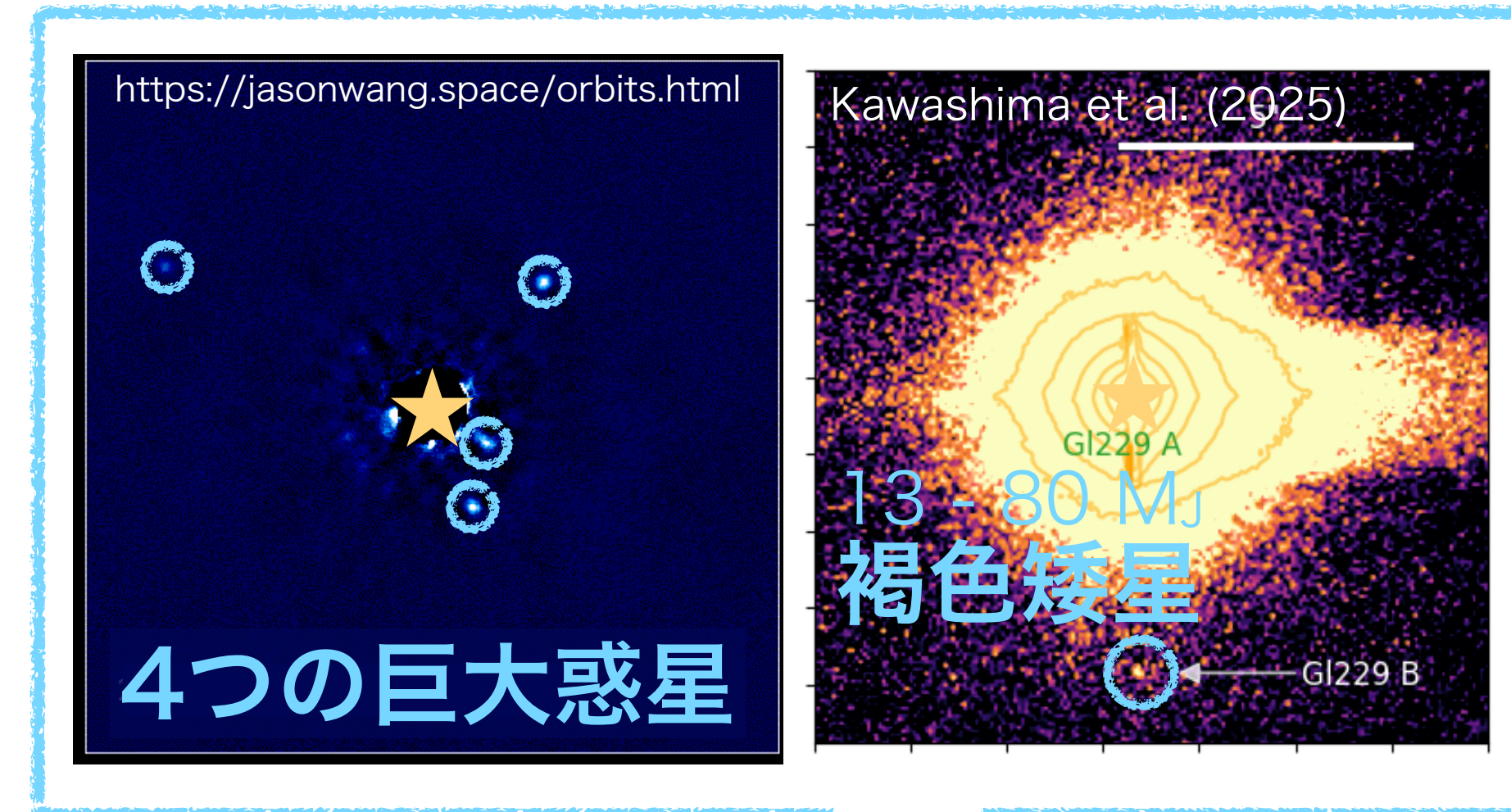
発見された多種多様な系外惑星

惑星：核融合を起こさない
褐色矮星：重水素の核融合
恒星：軽水素の核融合

中心星近傍の惑星 (姿を直接捉えることは現状できない)

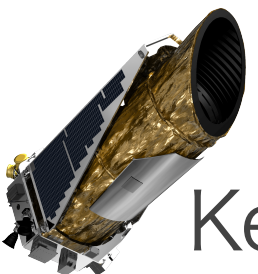


遠方の直接撮像惑星



～2010年代：発見の時代

2000s
惑星の発見

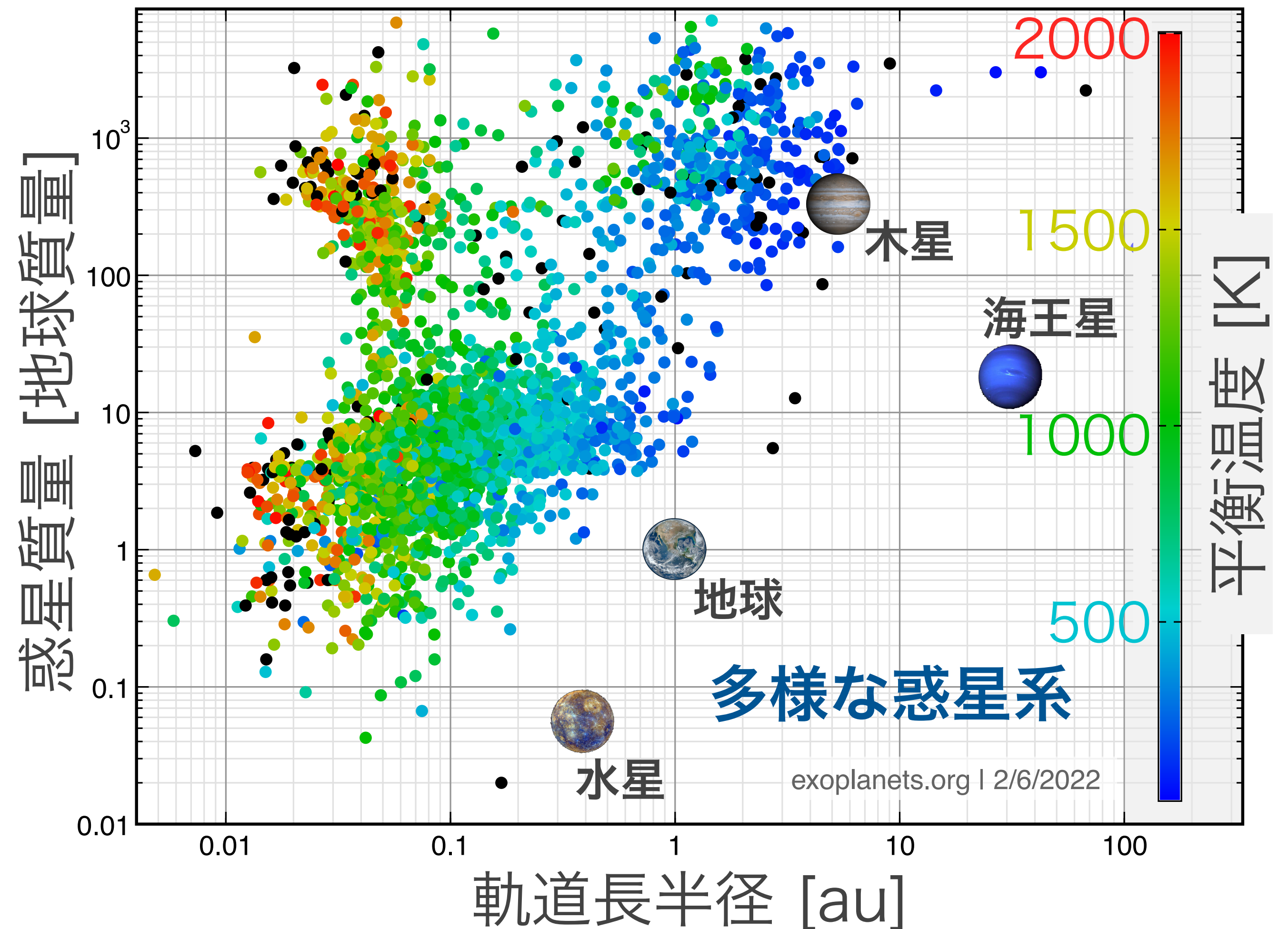
2010s  Kepler
惑星の系統的な発見

惑星の発見時にわかること

- 惑星の軌道
- 惑星の質量
- 惑星の半径

何で出来ている、
どういう環境の惑星なのか？

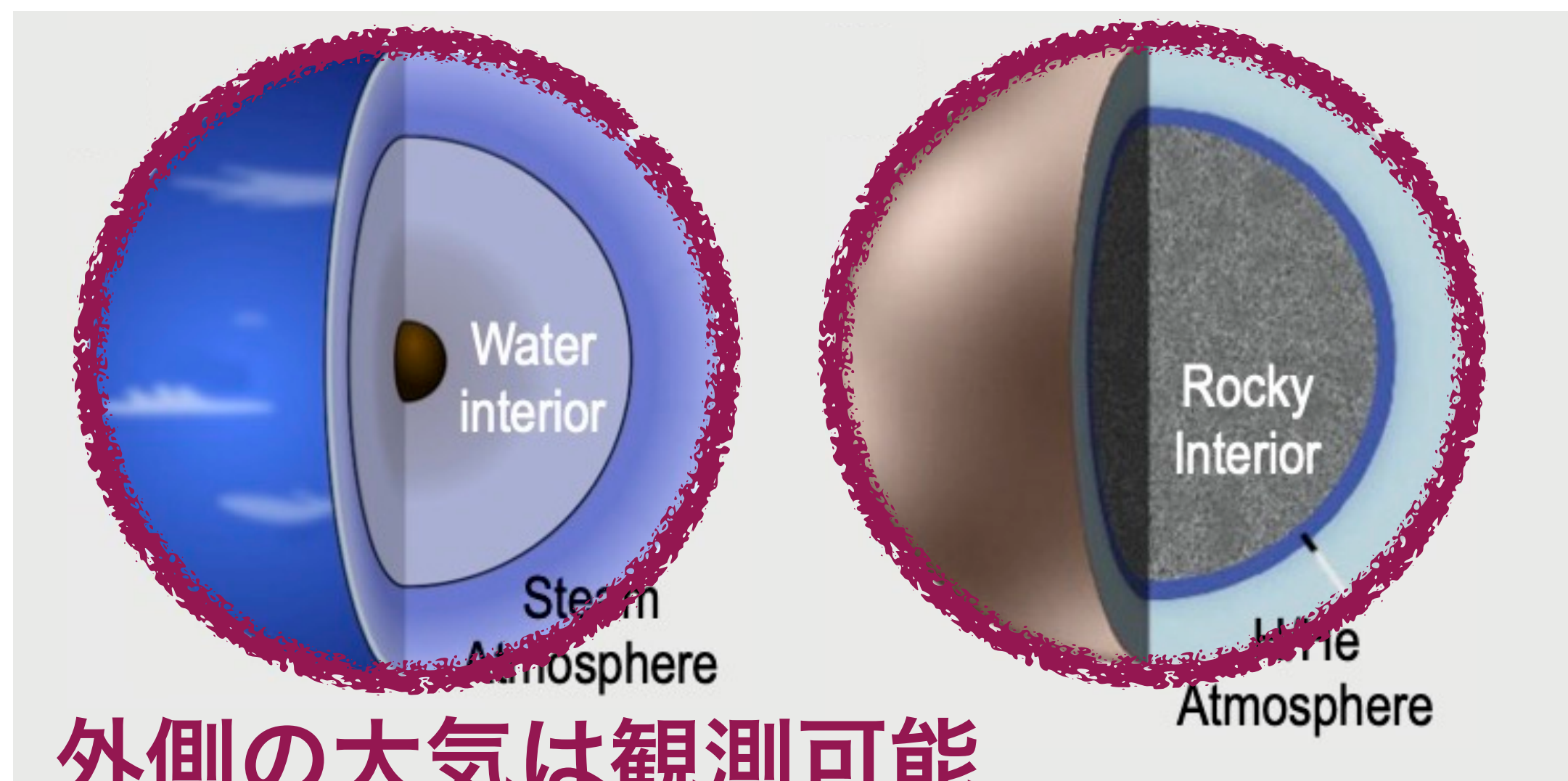
これまでに発見された系外惑星の分布



発見された惑星の特徴付け 「大気観測」

組成

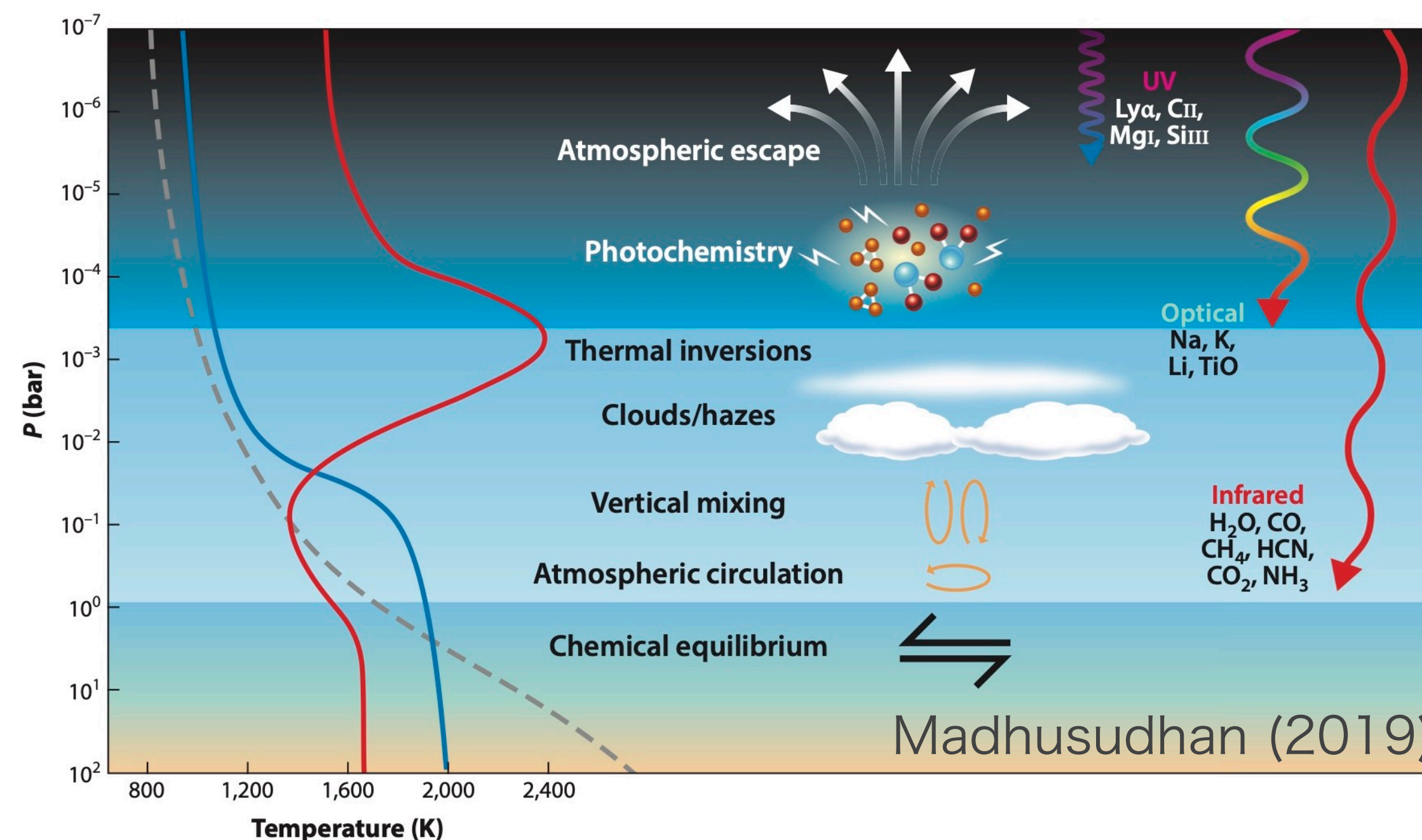
Tinetti et al. (2020)



外側の大気は観測可能

- ▶ 組成やコア質量：形成環境を反映
- ▶ 大気組成：
進化過程 (大気散逸・脱ガス等)を反映

大気・表層環境



- ▶ 大気特性：惑星大気過程の理解
- ▶ 大気・表層環境：ハビタビリティ推定等

系外惑星：特徴付けの時代へ

これまでに発見された系外惑星の分布

2000s 惑星の発見

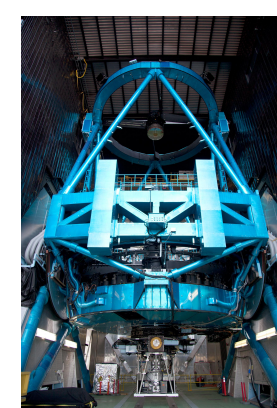
2010s 惑星の系統的な発見

ジェームス・ウェッブ
宇宙望遠鏡 (JWST)

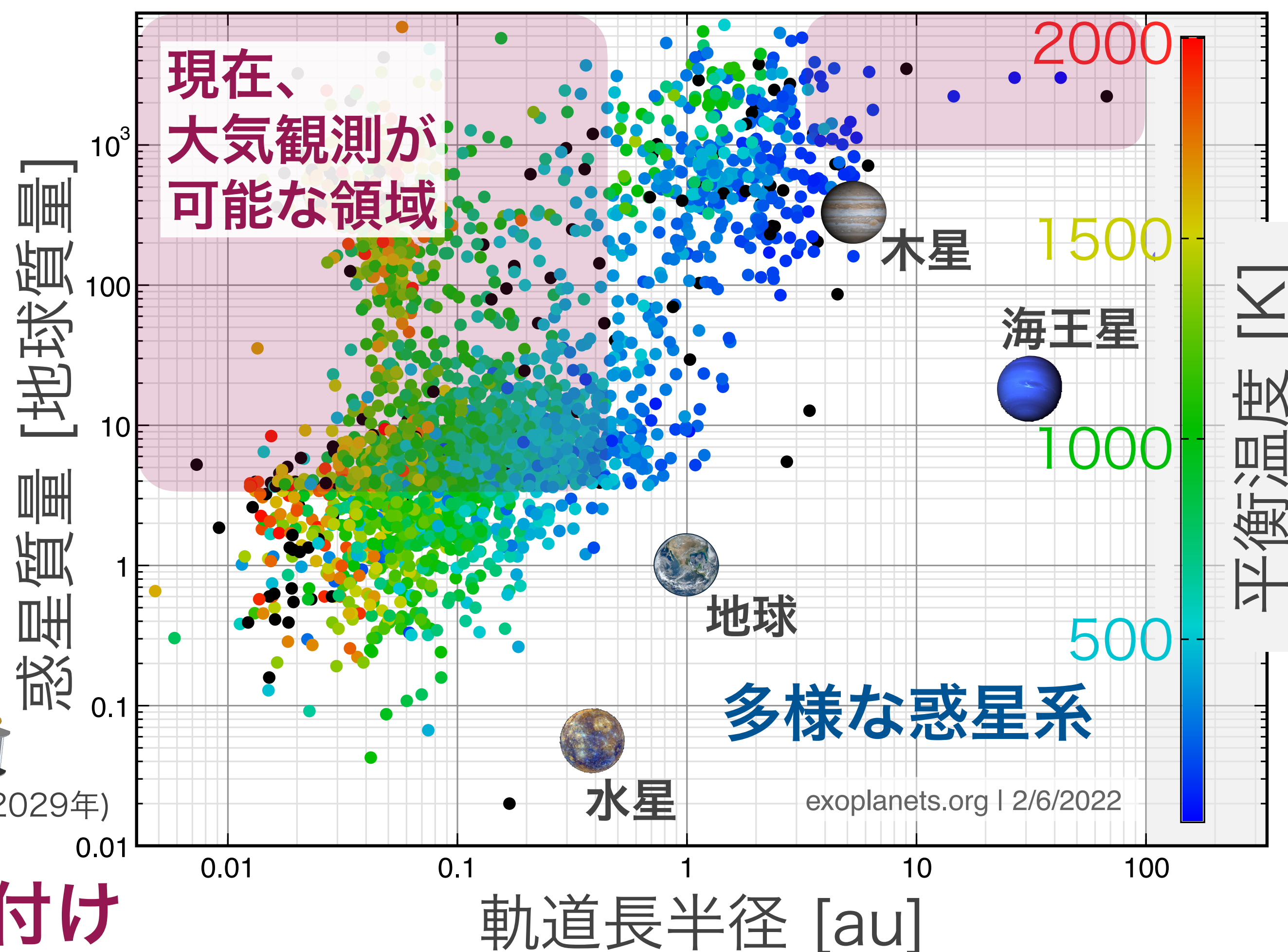
2020s～ 比較惑星学

惑星の形成・進化過程や 多様性の理解に向けた、 発見された個々の惑星の特徴付け

すばる望遠鏡
<https://subarutelescope.org/en/gallery/facility/1998/11/22/1941.html>

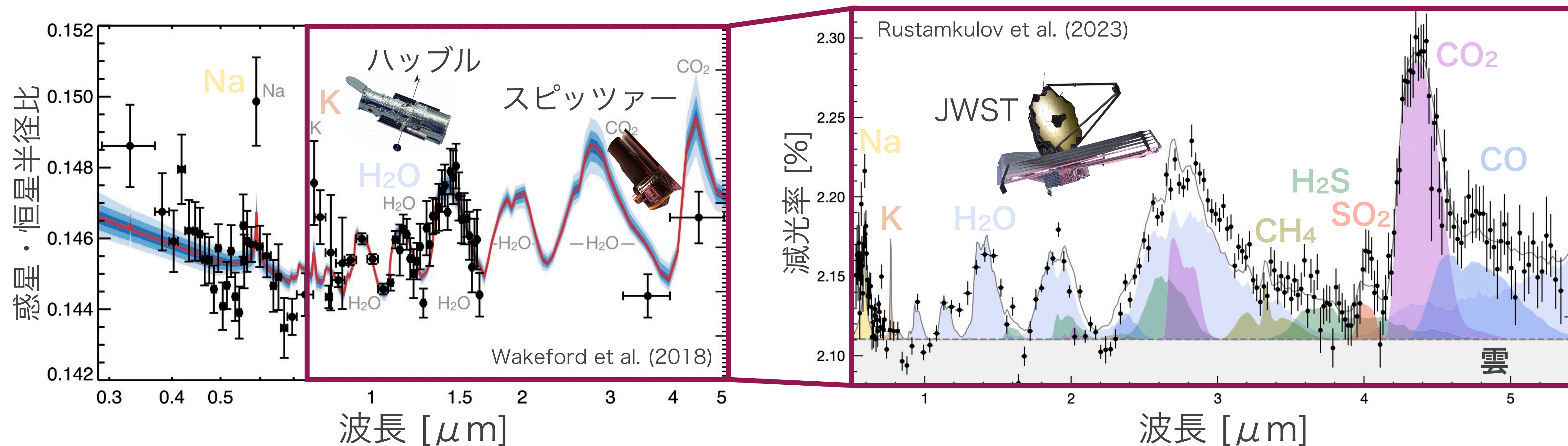


Ariel (2029年)



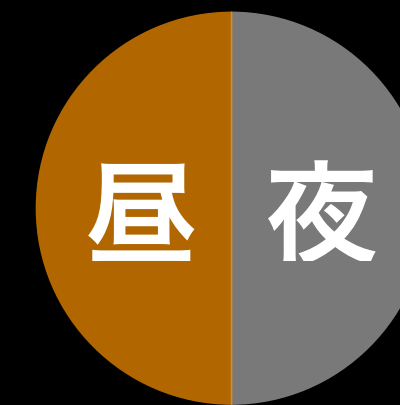
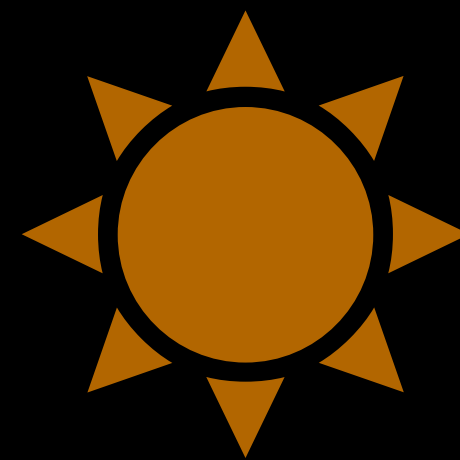
次世代観測装置による大気観測の本格的な幕開け

観測可能な分子種の増大



JWSTの打ち上げ + 地上大型望遠鏡における近赤外高分散分光器の発展
⇒ 可視から赤外に至るまでの**完全な大気スペクトルの観測が可能に**

分光観測



中心星近傍の惑星は
潮汐固定により
恒久的な昼面と夜面をもつ

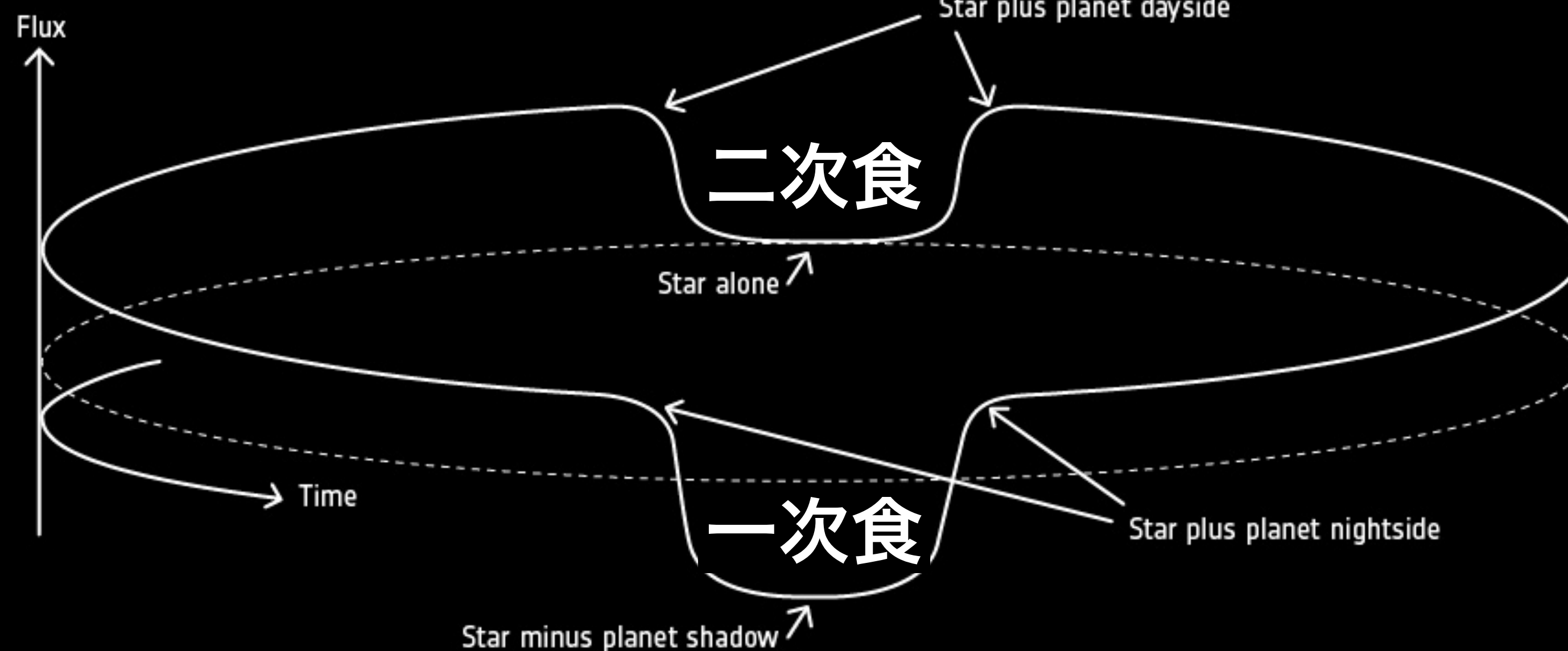
昼面のみ観測

朝方を観測

トランジット観測 (昼夜境界)

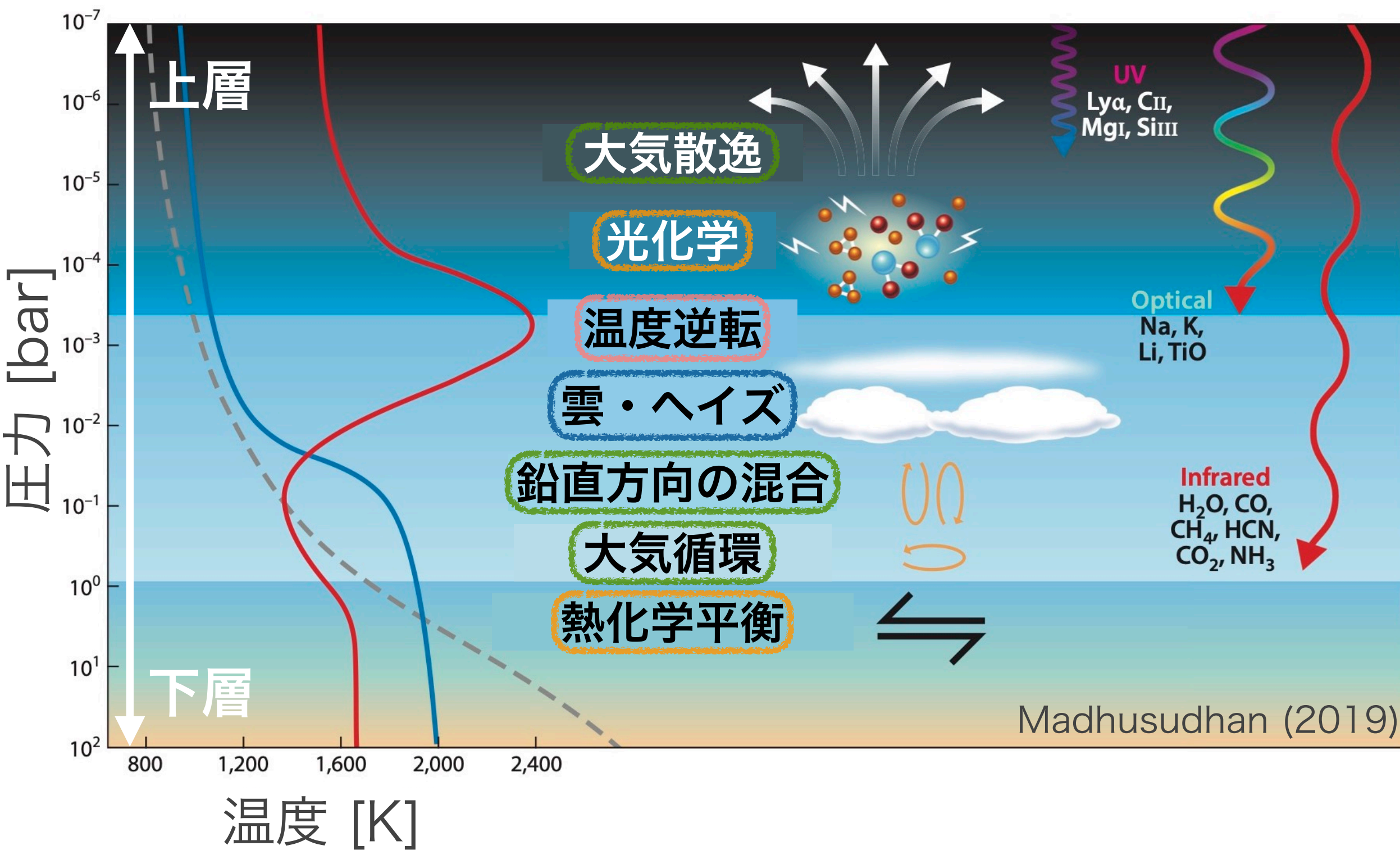
夕方を観測

夜面のみ観測

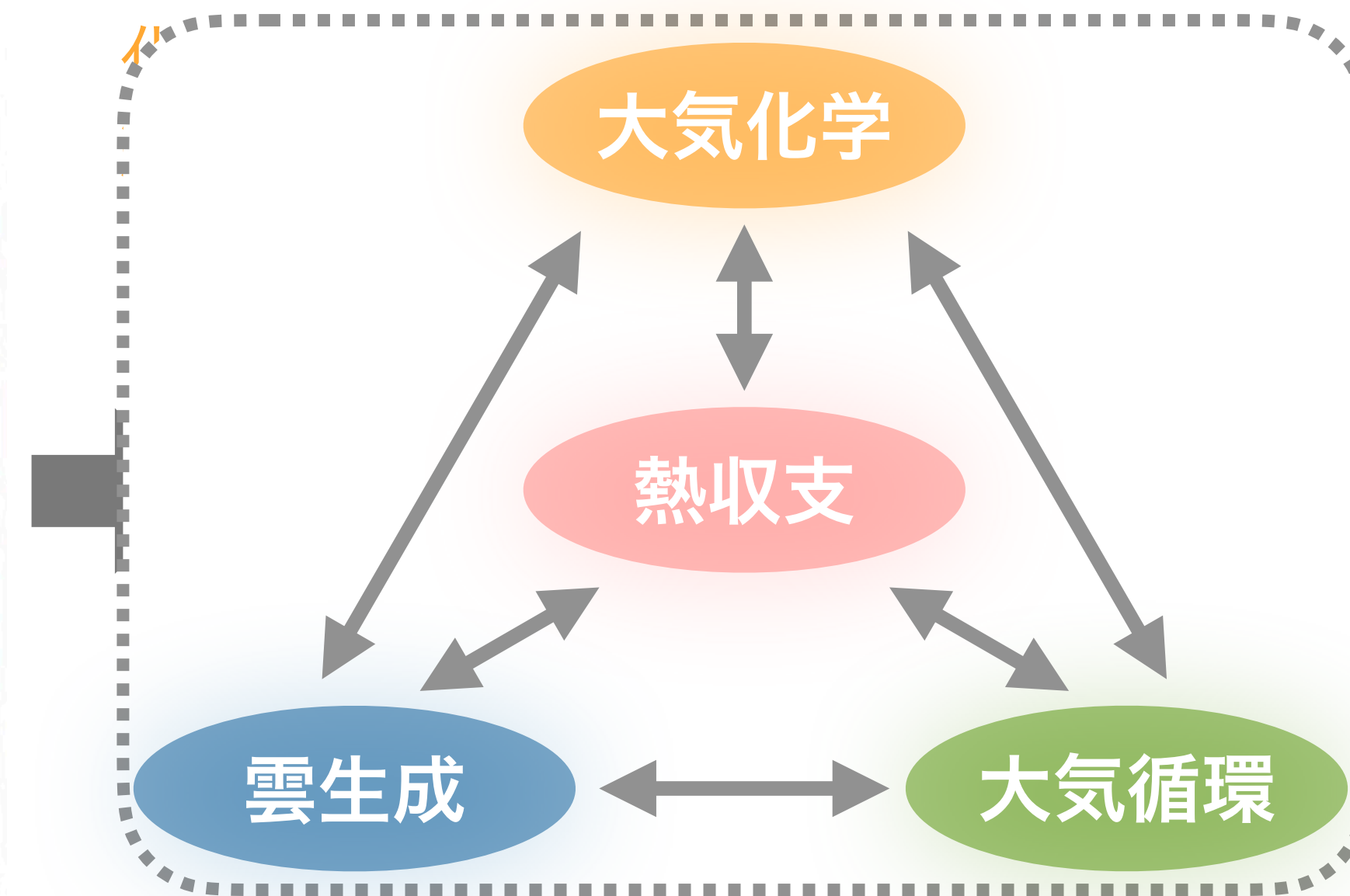


様々な大気の物理・化学過程

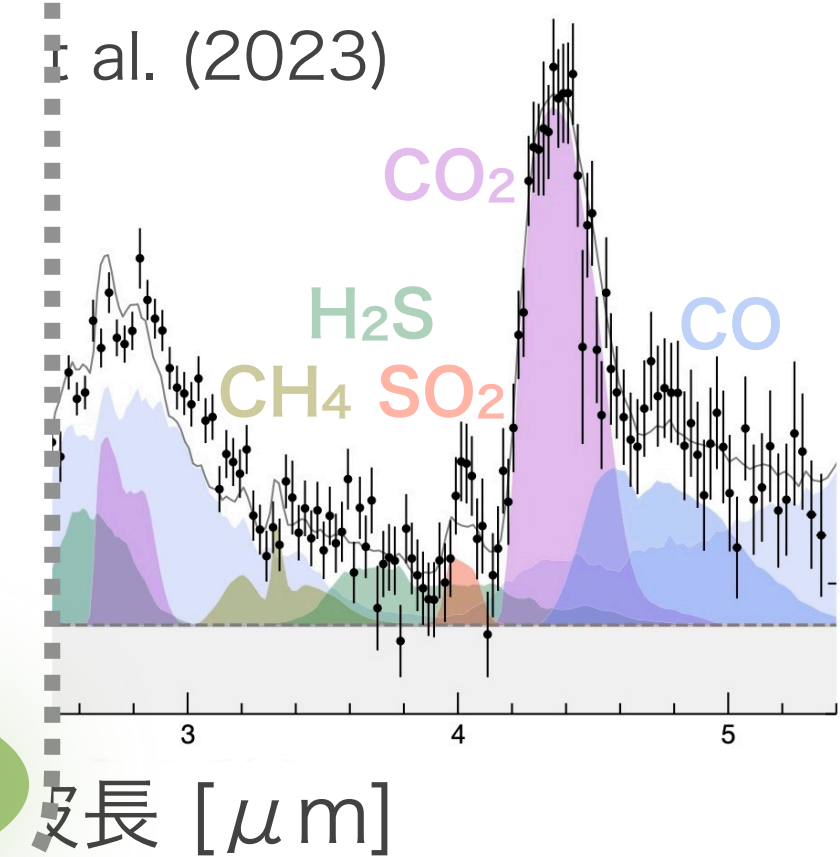
大気の物理・化学過程



大気特性



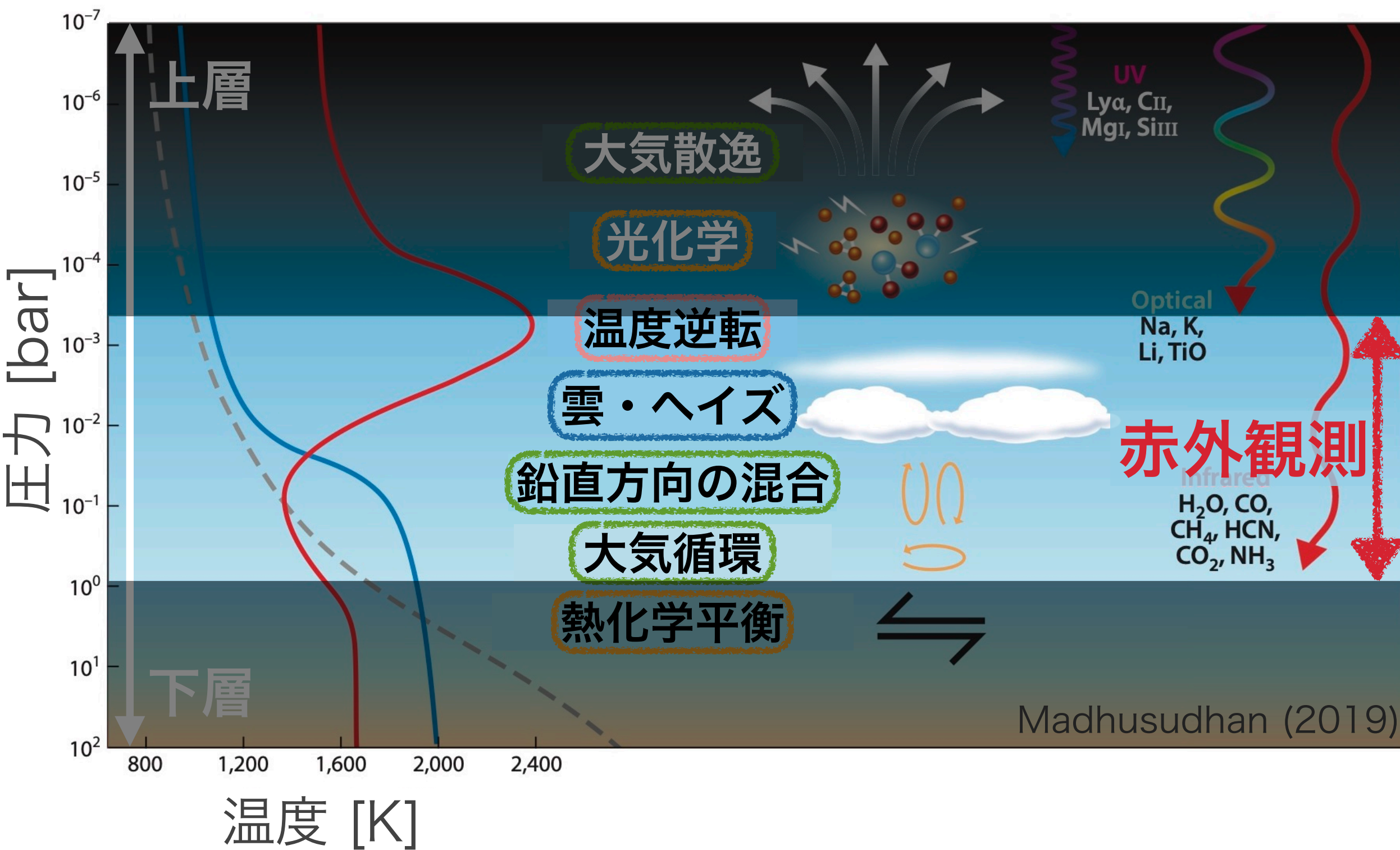
大気スペクトル



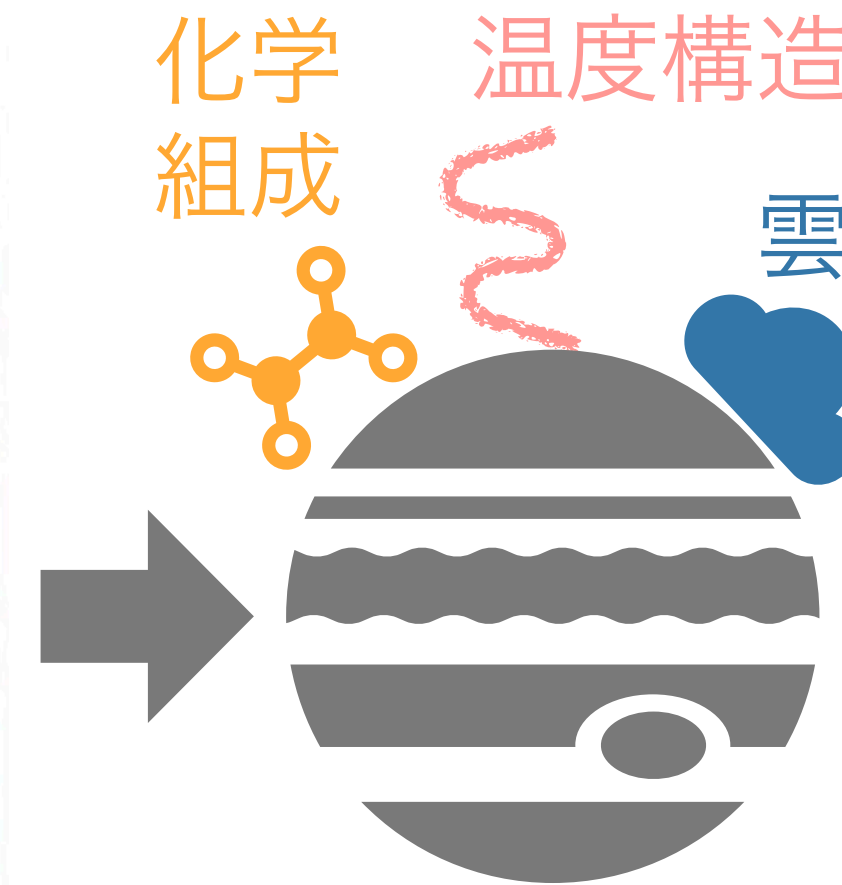
限られた観測量から大気・表層を理解するためには、
相互に絡み合う背景の物理・化学過程を理解する必要がある

様々な大気の物理・化学過程

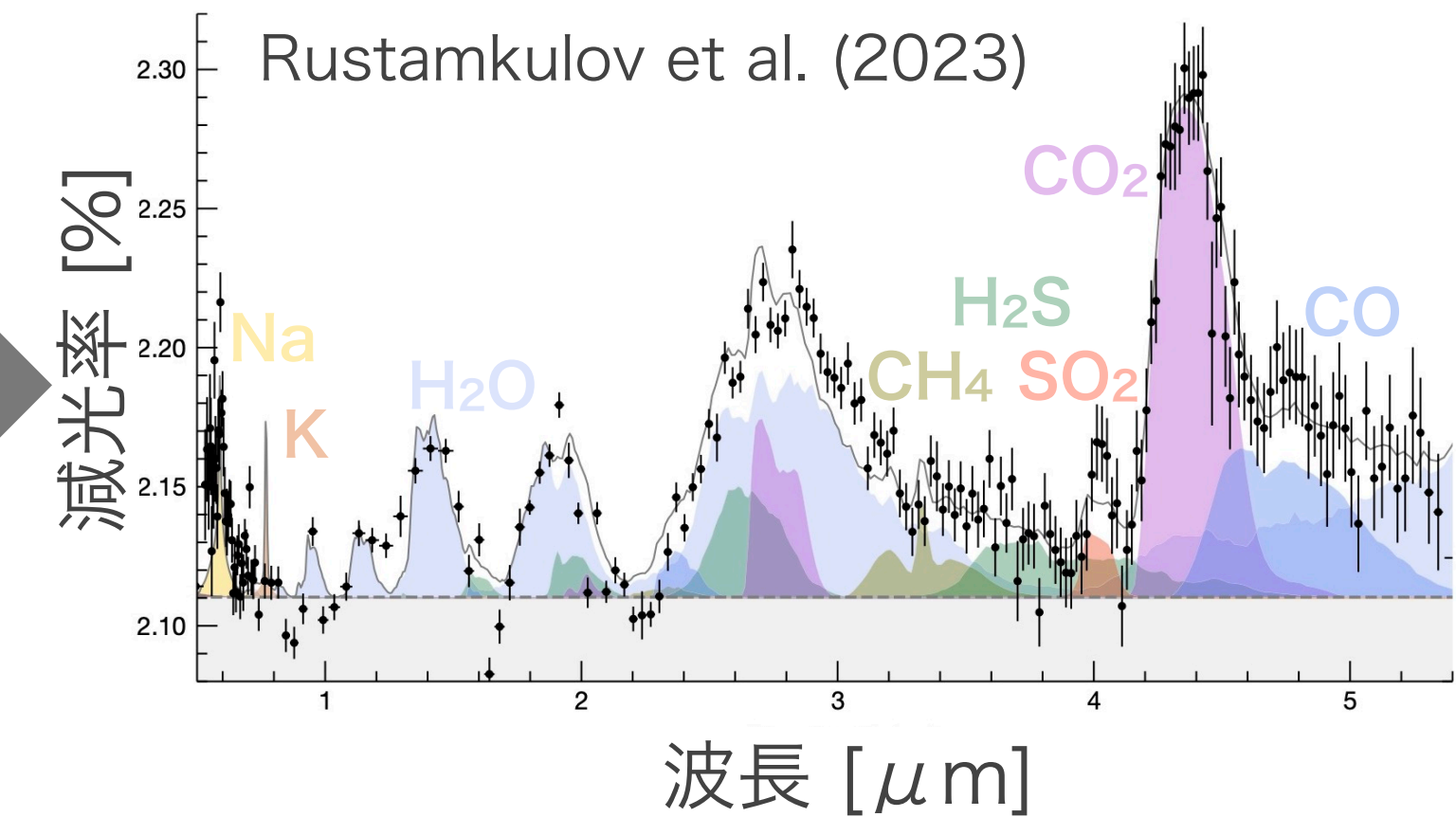
大気の物理・化学過程



大気の特徴



大気スペクトル



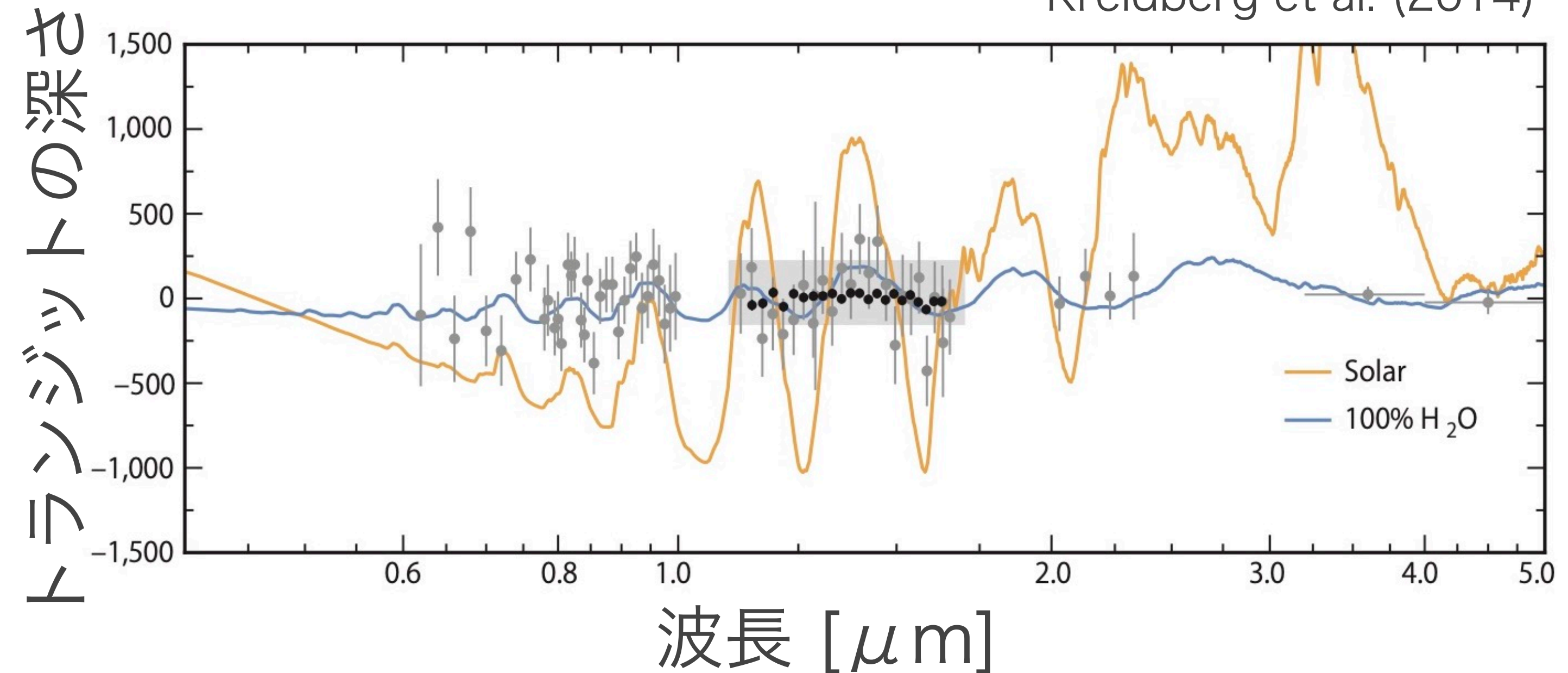
限られた観測量から大気・表層を理解するためには、
相互に絡み合う背景の物理・化学過程を理解する必要がある

分子の吸収が見えない

$$\Delta D = \frac{(R_p + H)^2}{R_s^2} - \frac{R_p^2}{R_s^2} \sim \frac{2R_p H}{R_s^2} \quad H \equiv \frac{RT}{\mu g}$$

Kreidberg et al. (2014)

- 黒色と灰色の点は観測点
- オレンジ色の線：
太陽のような水素に富んだ大気を持つ場合の波長ごとのトランジットの深さの予想
- 青色の線：
水蒸気H₂O 100%の大気を持つ場合の波長ごとのトランジット深さの予想

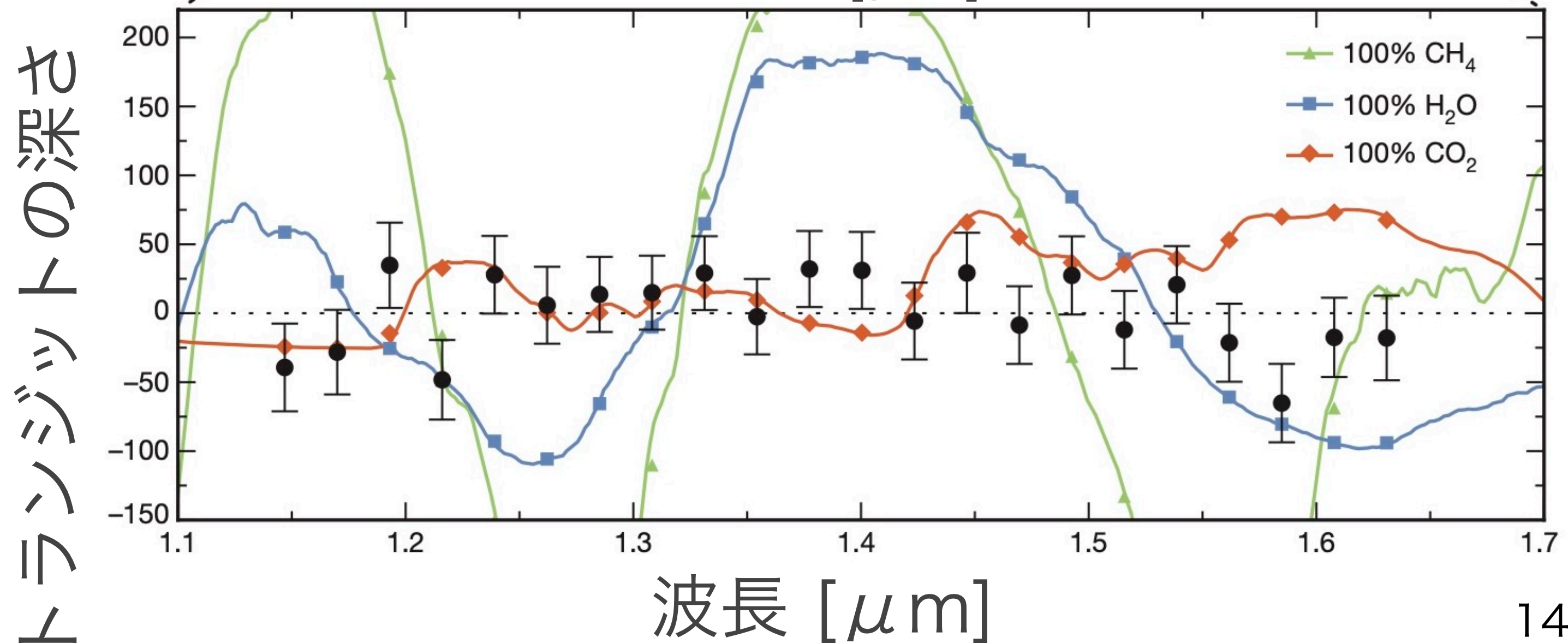
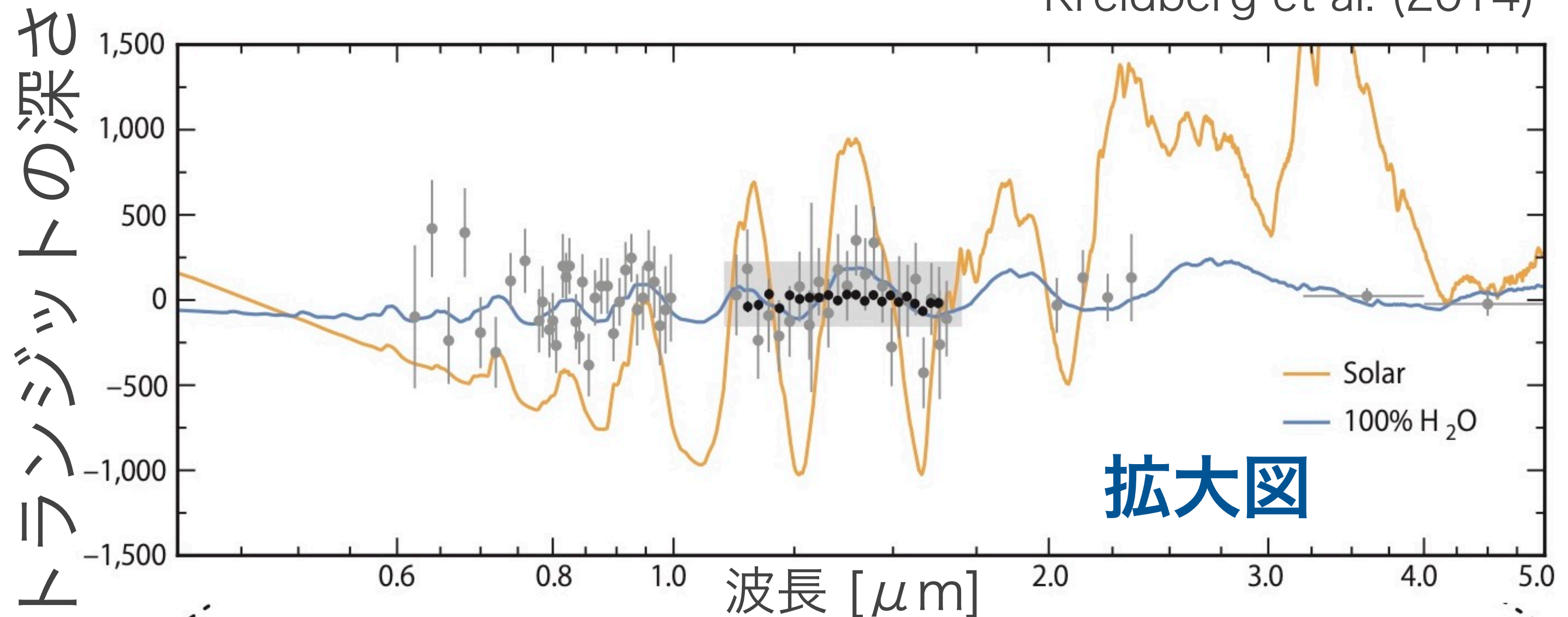


分子の吸収が見えない

- 黒色と灰色の点は観測点
- 緑色の線：
メタンCH₄ 100%の大気
- 青色の線：
水蒸気H₂O 100%の大気
- 赤色の線：
二酸化炭素CO₂ 100%の大気
- トランジットの深さの、
波長方向の変動が小さい
⇒ 大気中の雲の影響？

$$\Delta D = \frac{(R_p + H)^2}{R_s^2} - \frac{R_p^2}{R_s^2} \sim \frac{2R_p H}{R_s^2} \quad H \equiv \frac{RT}{\mu g}$$

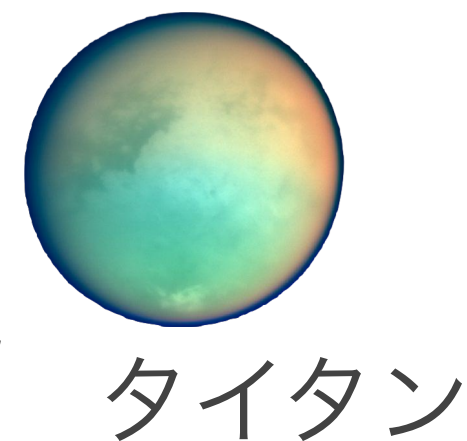
Kreidberg et al. (2014)



雲・ヘイズ生成

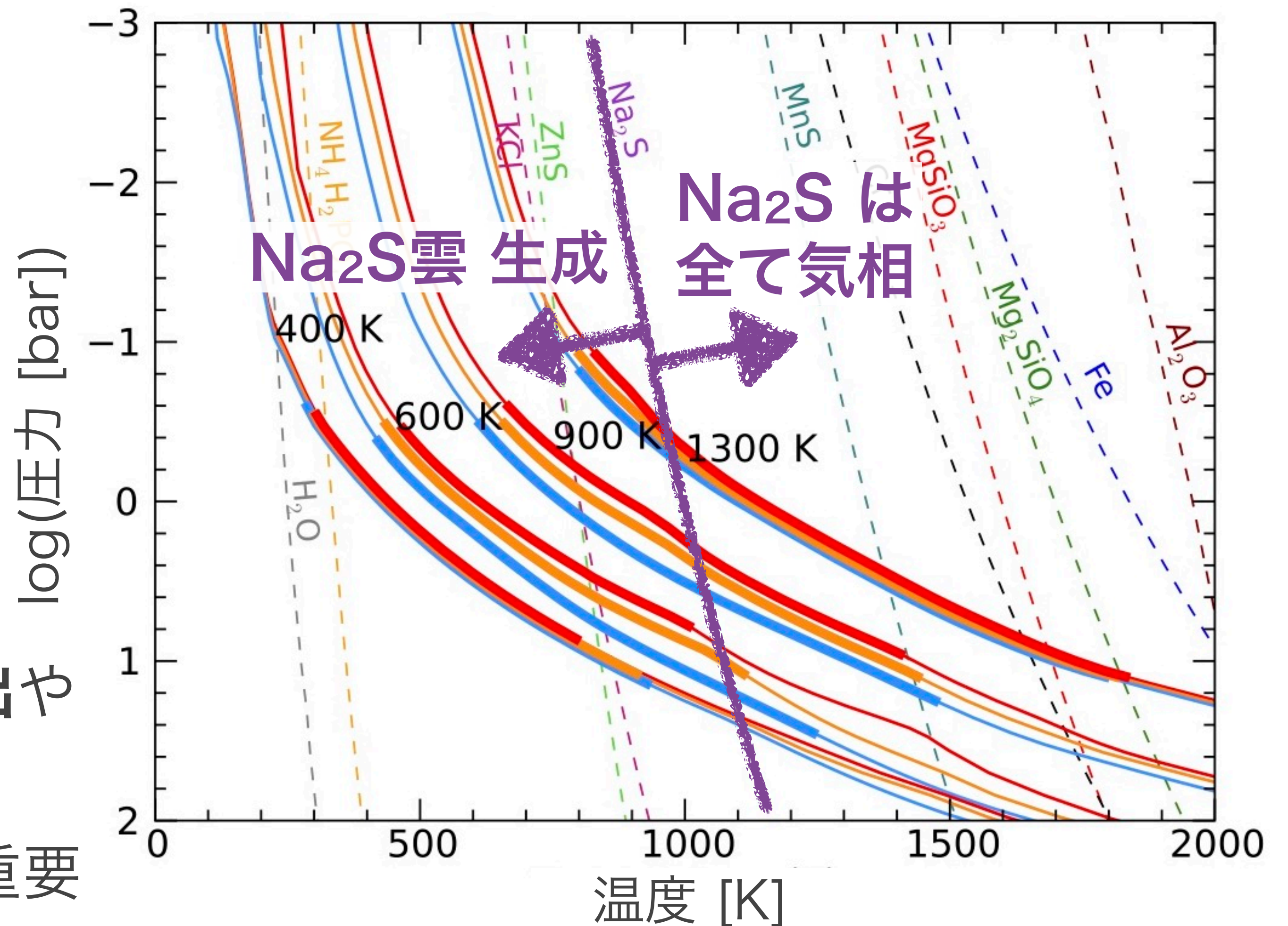
▶ 雲
熱化学反応による生成

▶ ヘイズ
光化学反応による生成



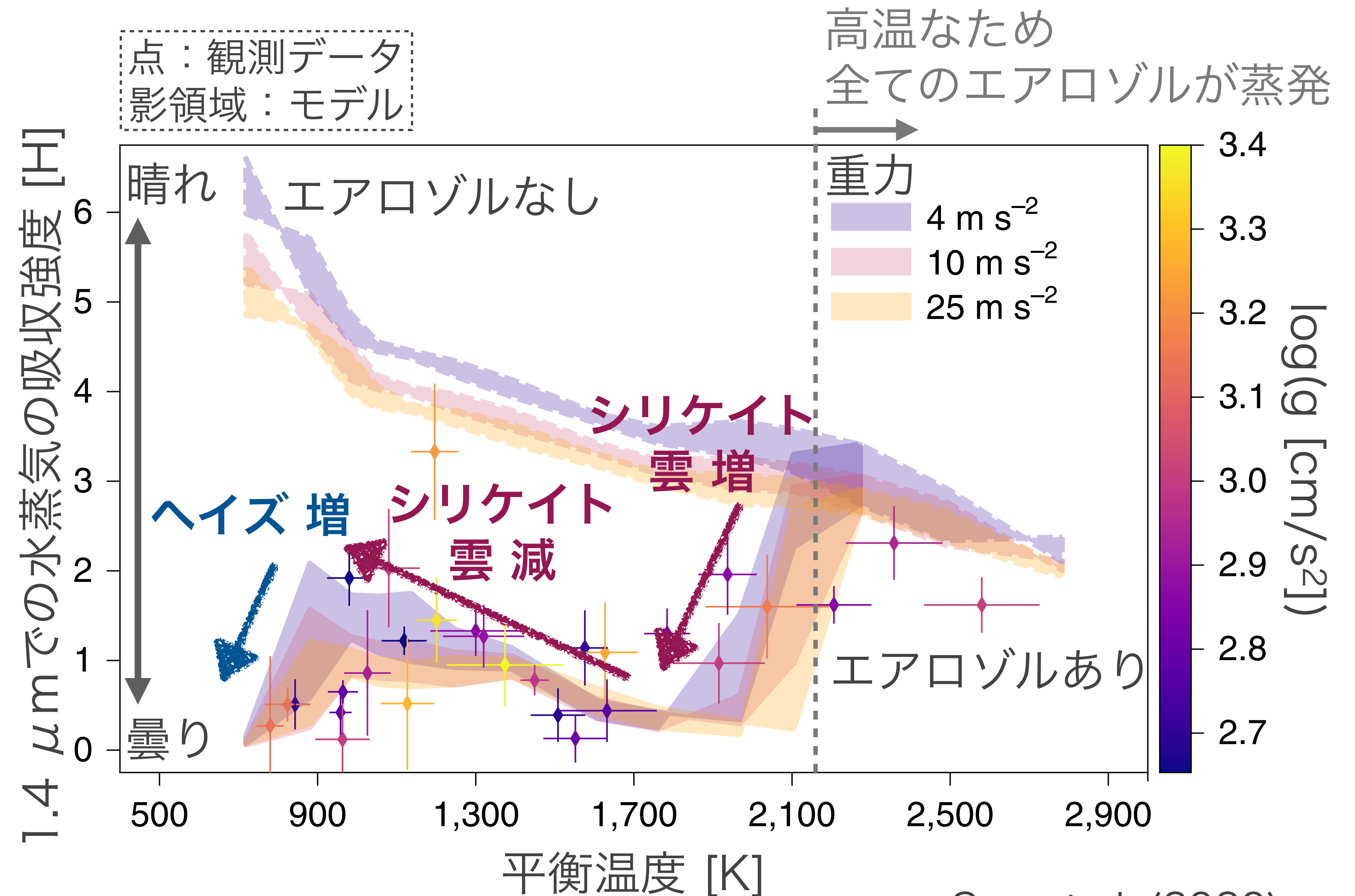
どのエアロゾルが
生成されているか不明
⇒ エアロゾルそのものの吸収検出や
温度やUVに対する
曇り度合いのトレンド調査が重要

太陽組成大気を想定した雲の凝縮曲線



曇り度合いの観測的トレンド

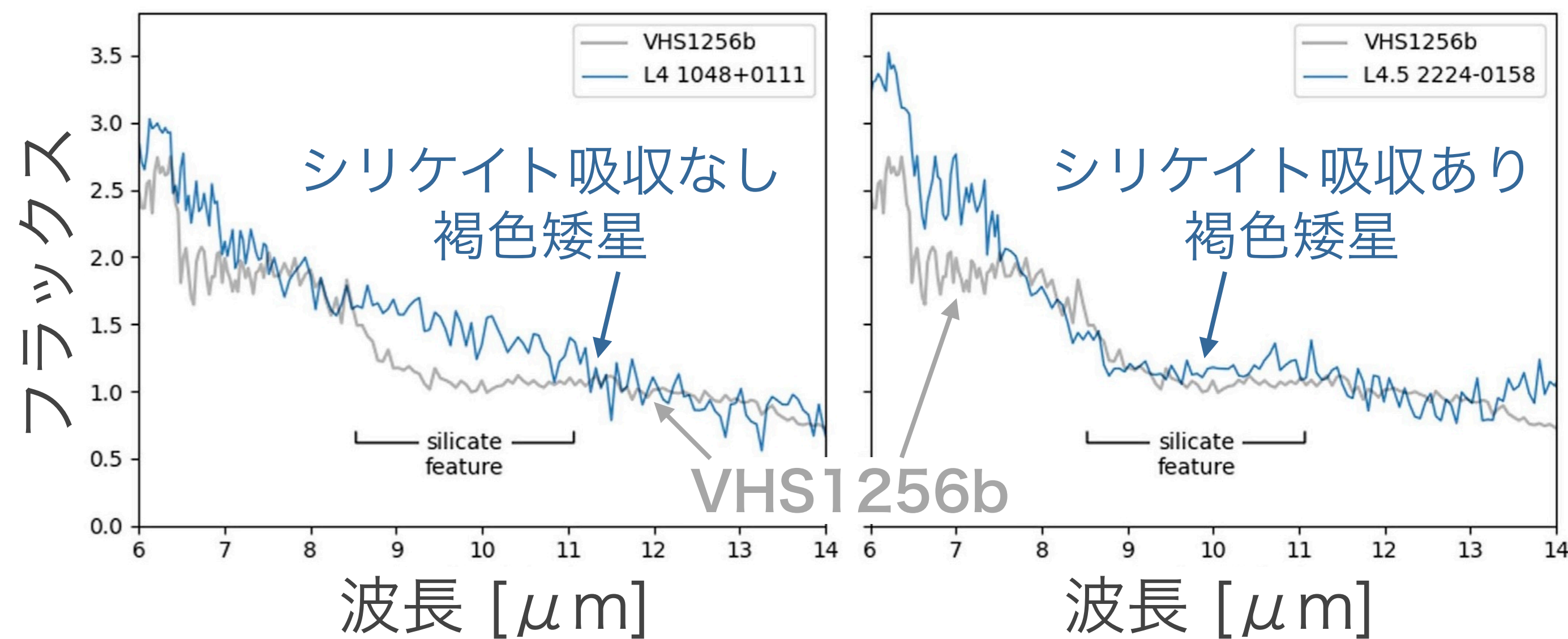
- **雲**と**ヘイズ**の両方について微物理を考慮
- 観測された**ホット・ジュピター**の水蒸気の吸収強度と比較
- **シリケート雲**と**ヘイズ**の量の温度依存性で観測を説明可能？



Gao et al. (2020)

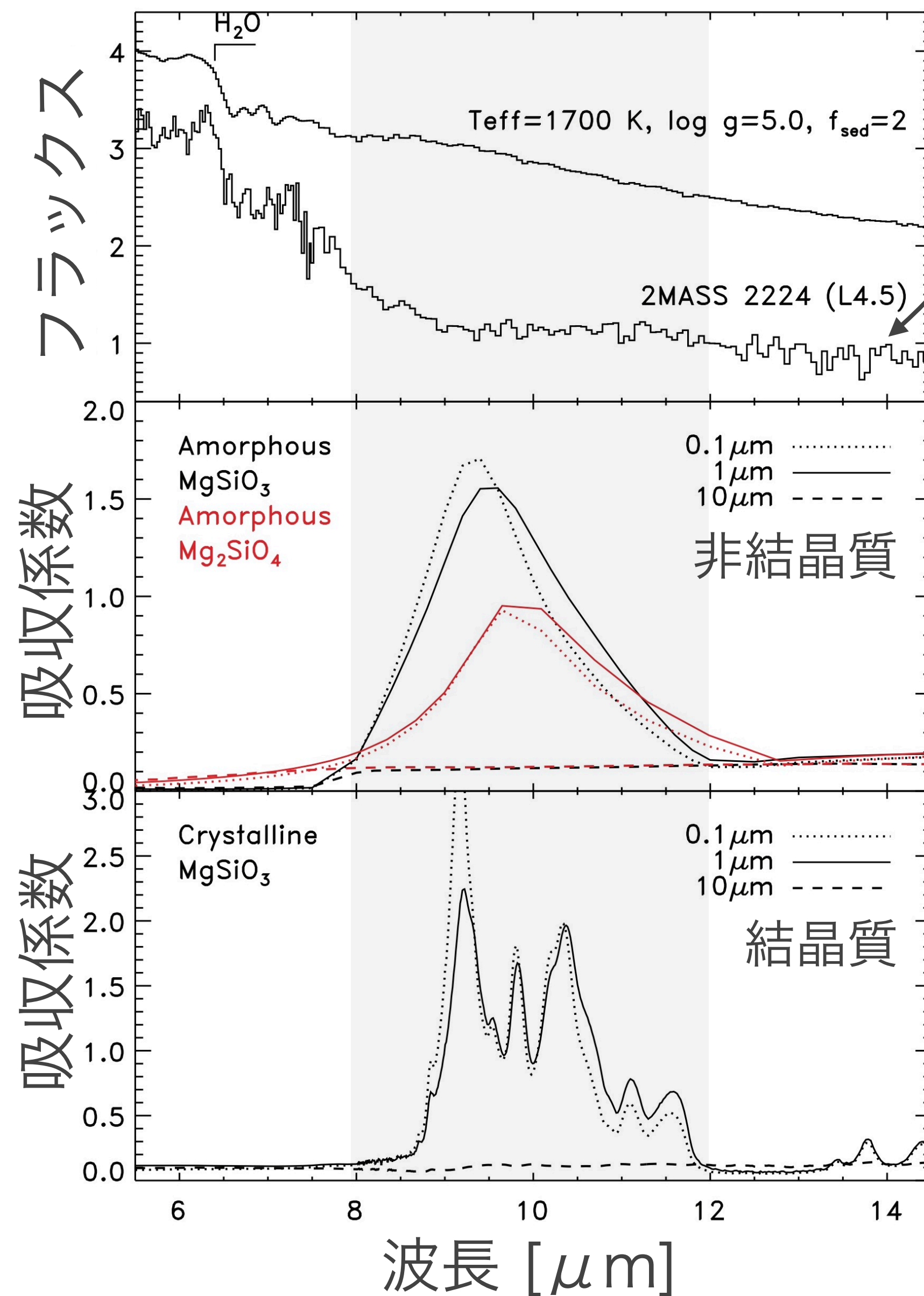
シリケート雲の10 μm 吸収

- これまで、Si-O 伸縮振動@10 μm が褐色矮星で暫定的？に検出
- JWST/MIRIの観測で惑星質量天体？VHS1256bに対して初検出



Miles et al. (2023)

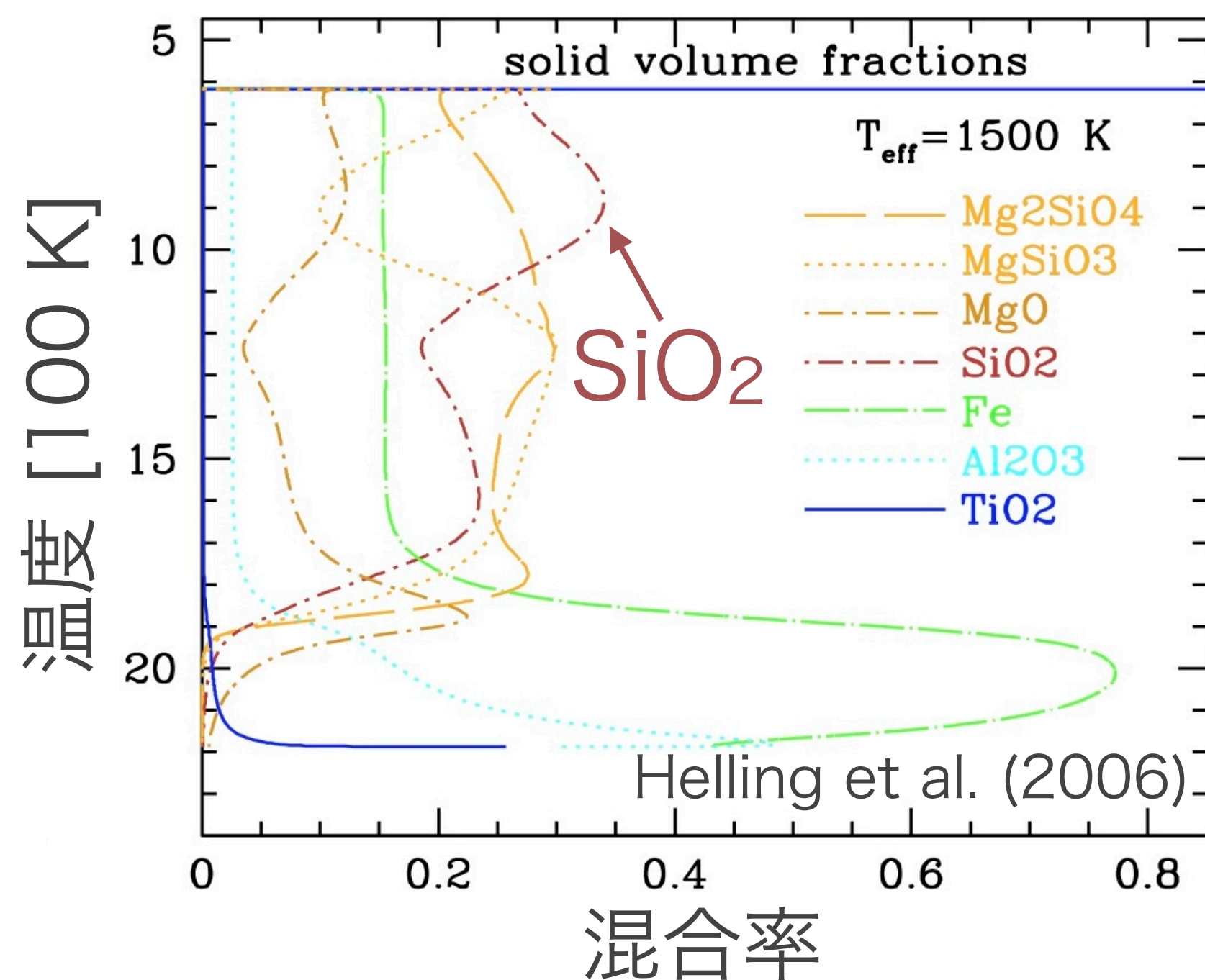
Spitzer/IRSによる
L4.5型褐色矮星のスペクトル



Cushing et al. (2006) 17

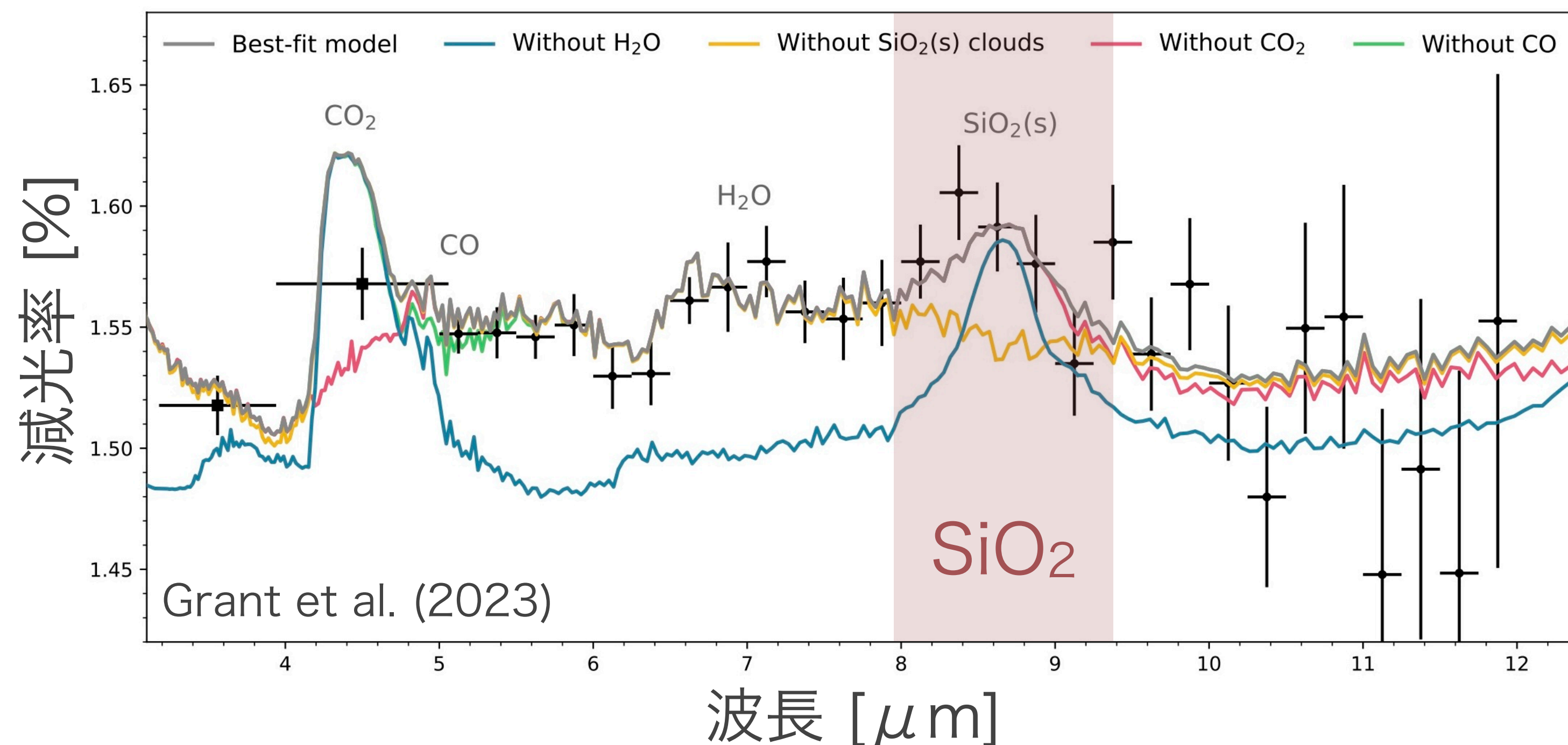
トランジット惑星での初の雲吸収 (SiO₂)検出

化学反応モデルに基づく
不均質ダスト雲生成計算



熱化学平衡状態では生成されない
SiO₂が支配的になる結果

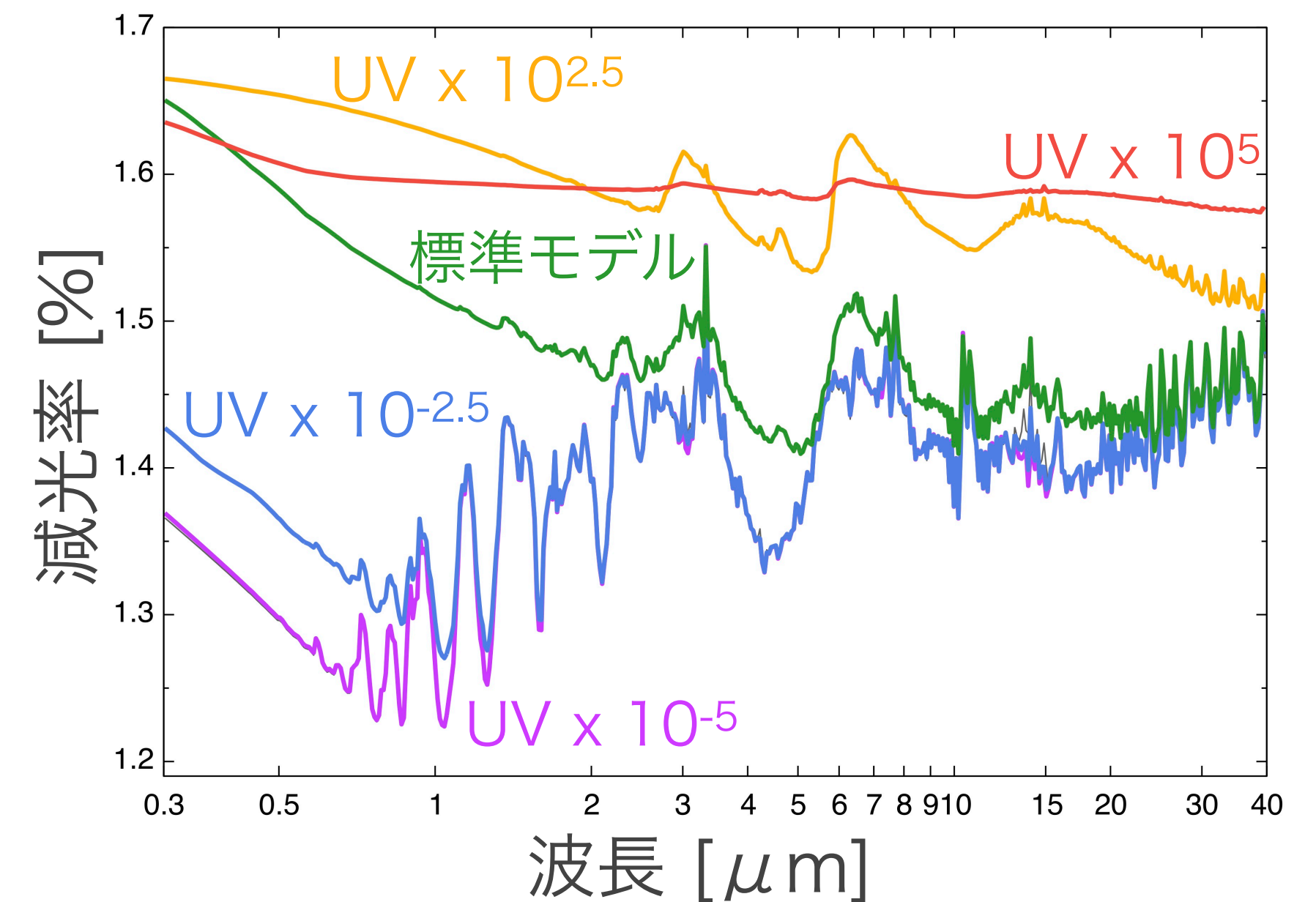
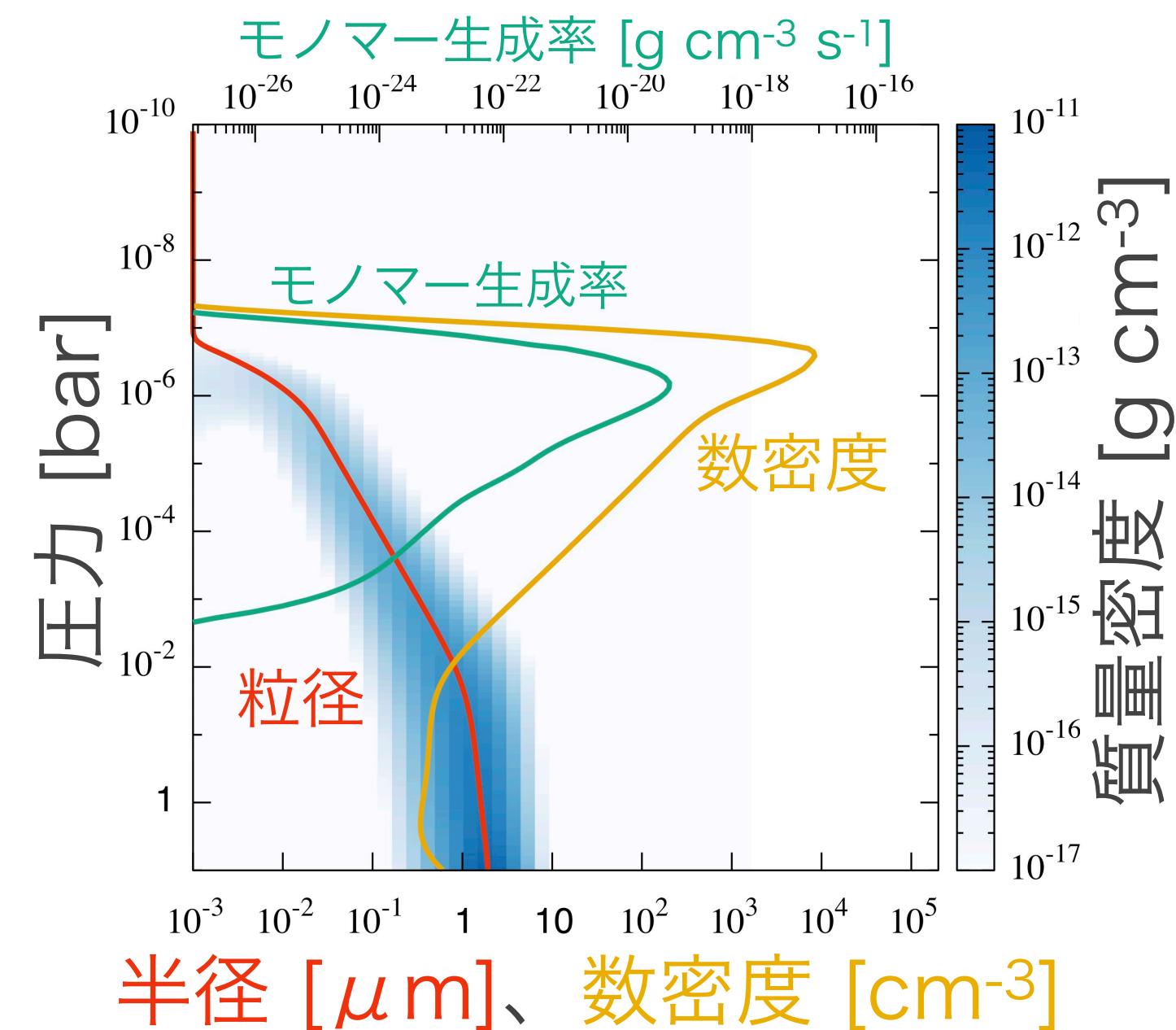
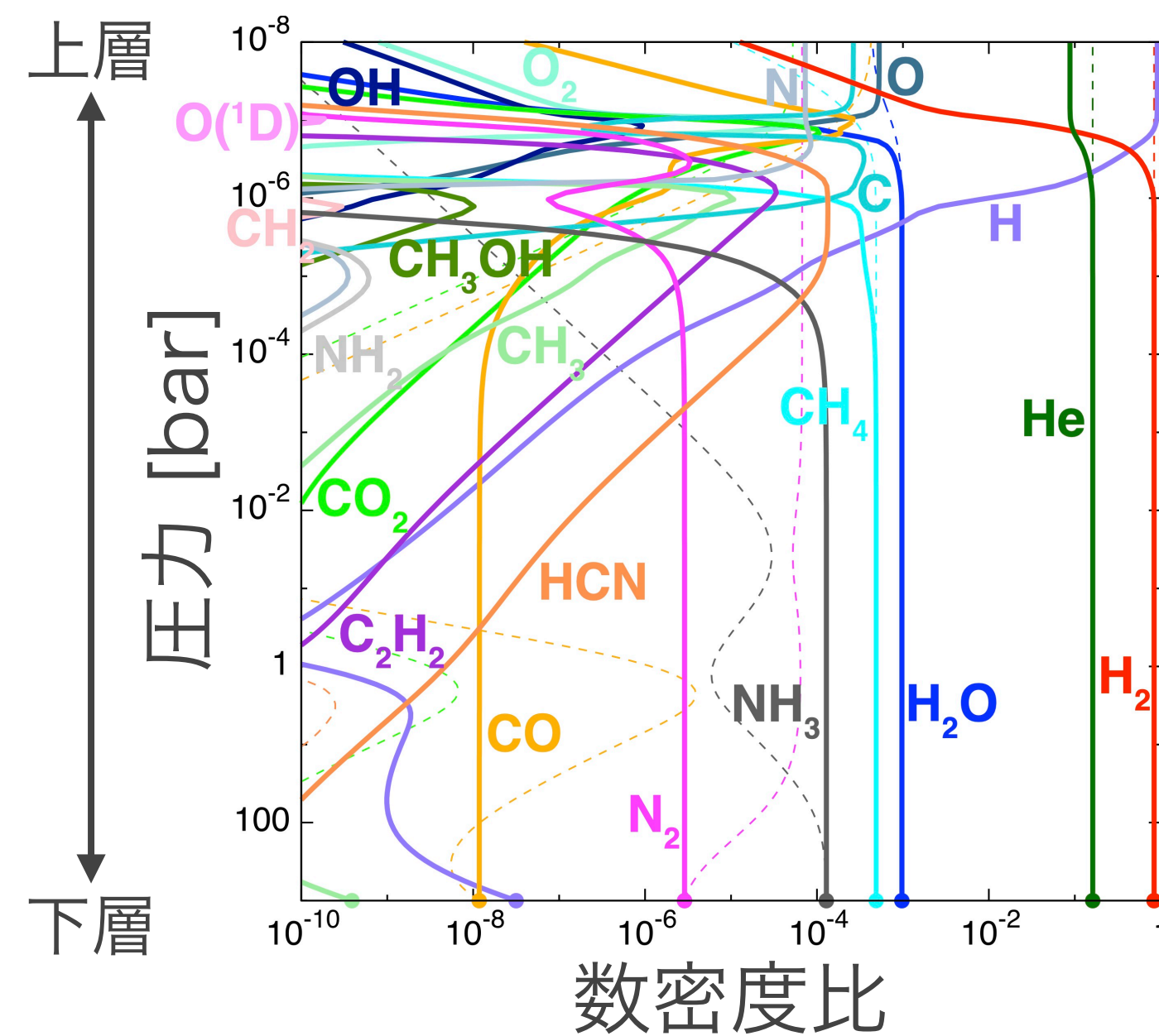
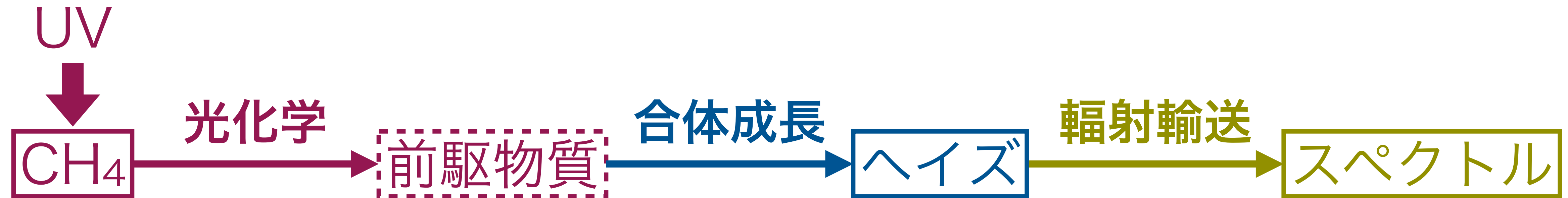
ホット・ジュピターWASP-17bの透過スペクトル



不均質雲形成が起きていることを示唆？

SiO₂吸収の普遍性を調べることが重要

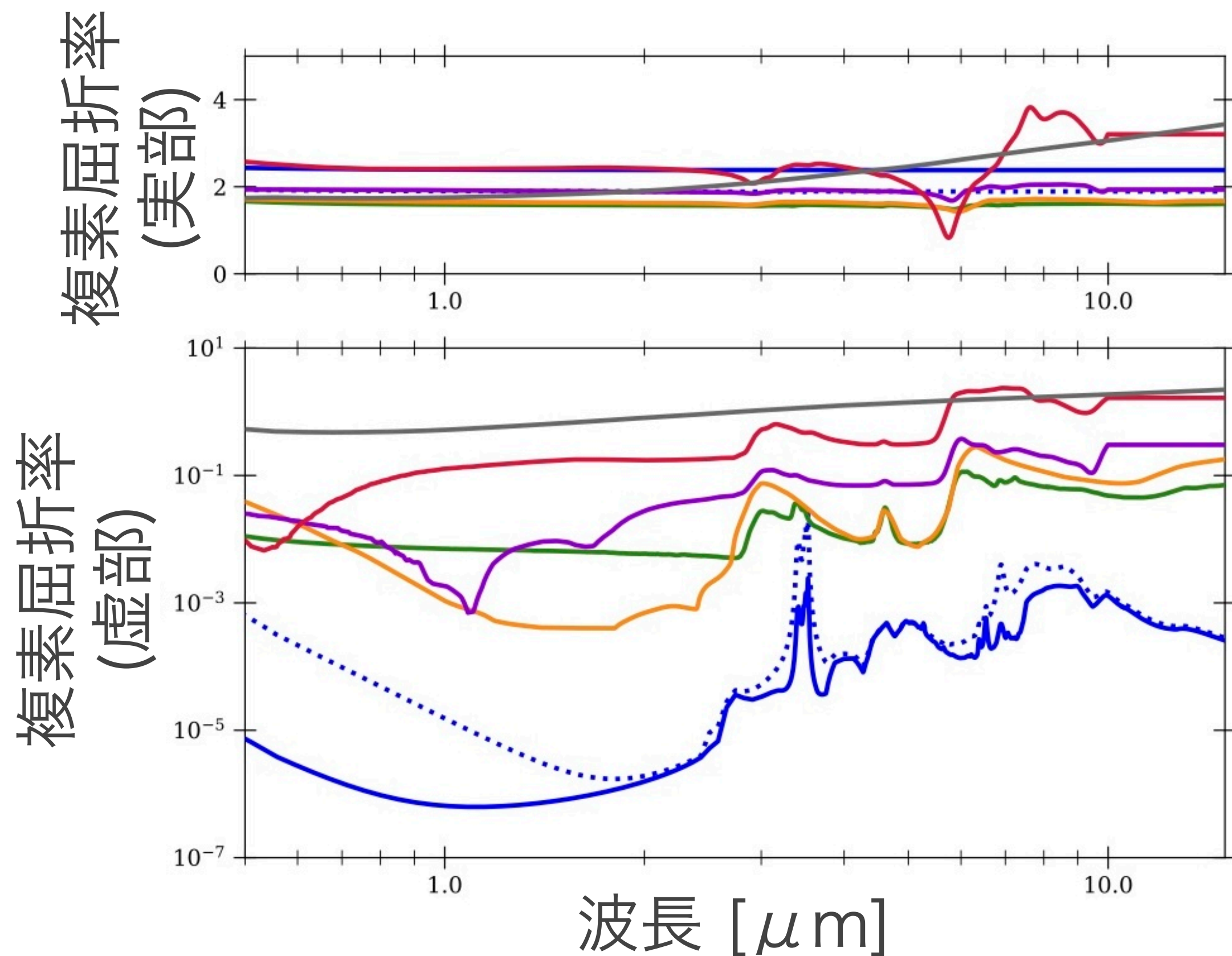
ヘイズ：UV強度依存性を調べるのが鍵



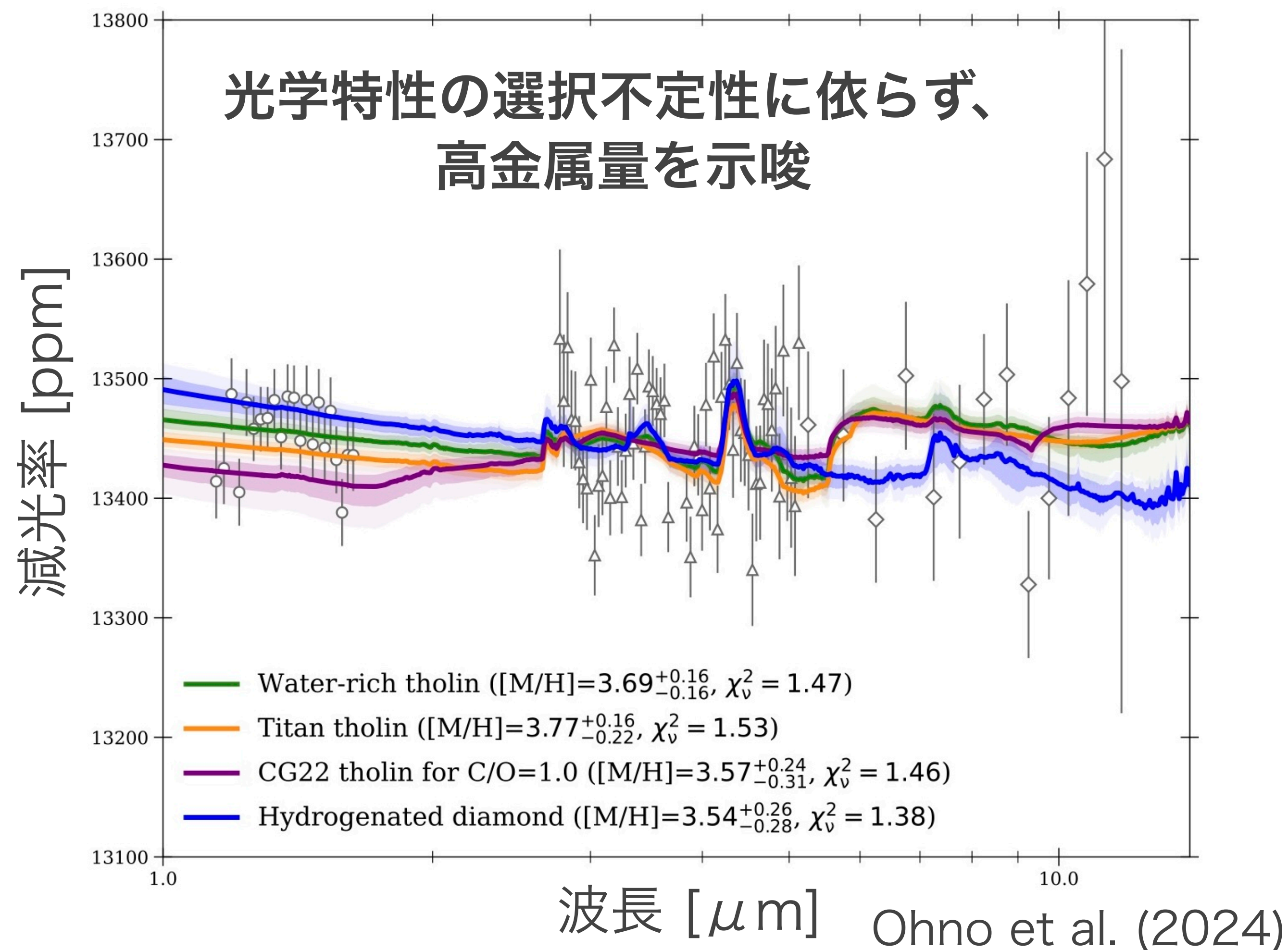
ヘイズによる曇り具合は**UV強度**に依存するはず

ヘイズの光学特性の不定性：実験の重要性

系外惑星大気中で生成され得る
ヘイズの組成・光学特性は未解明

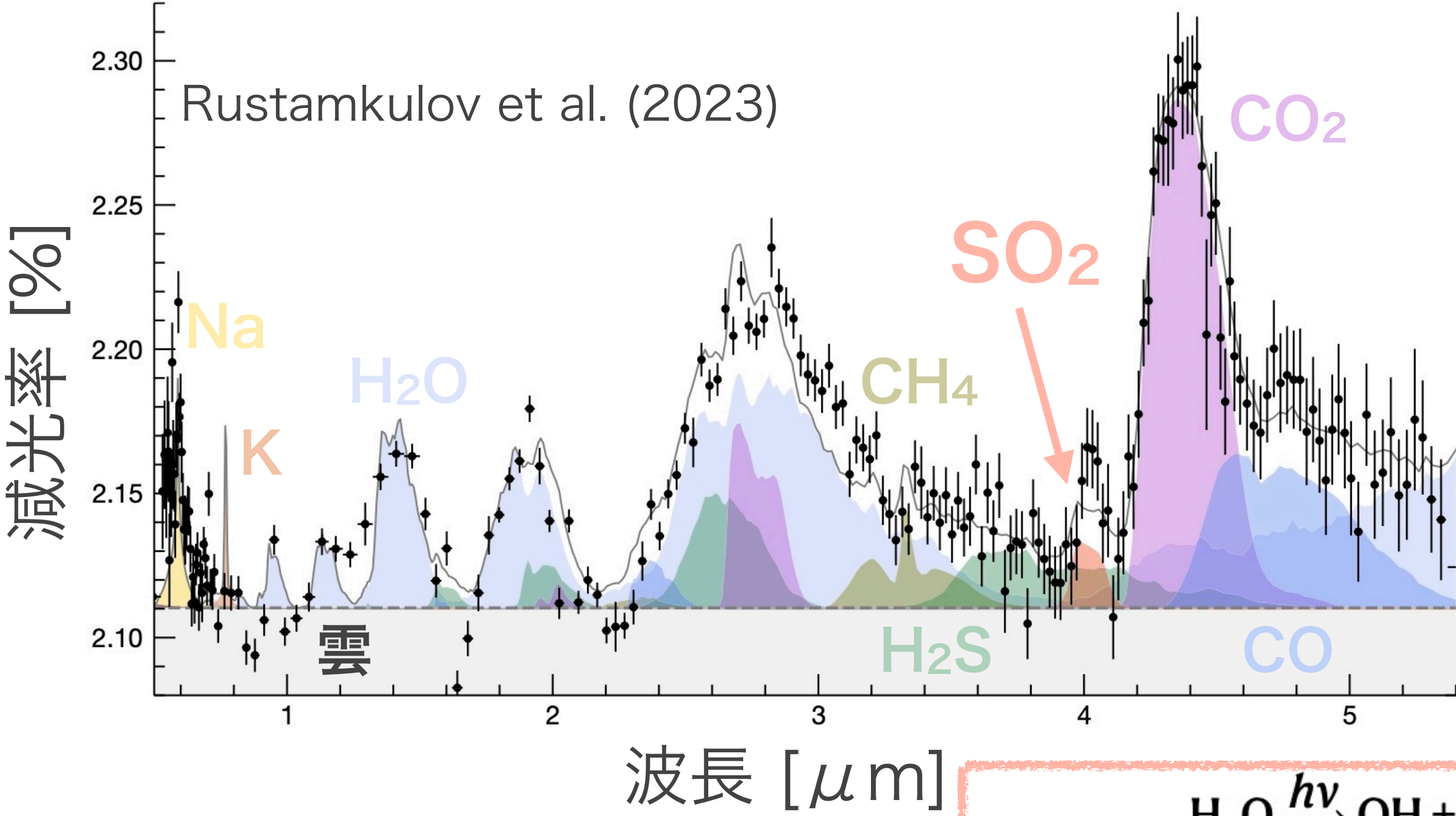


サブ・ネプチューンGJ 1214bの透過スペクトル

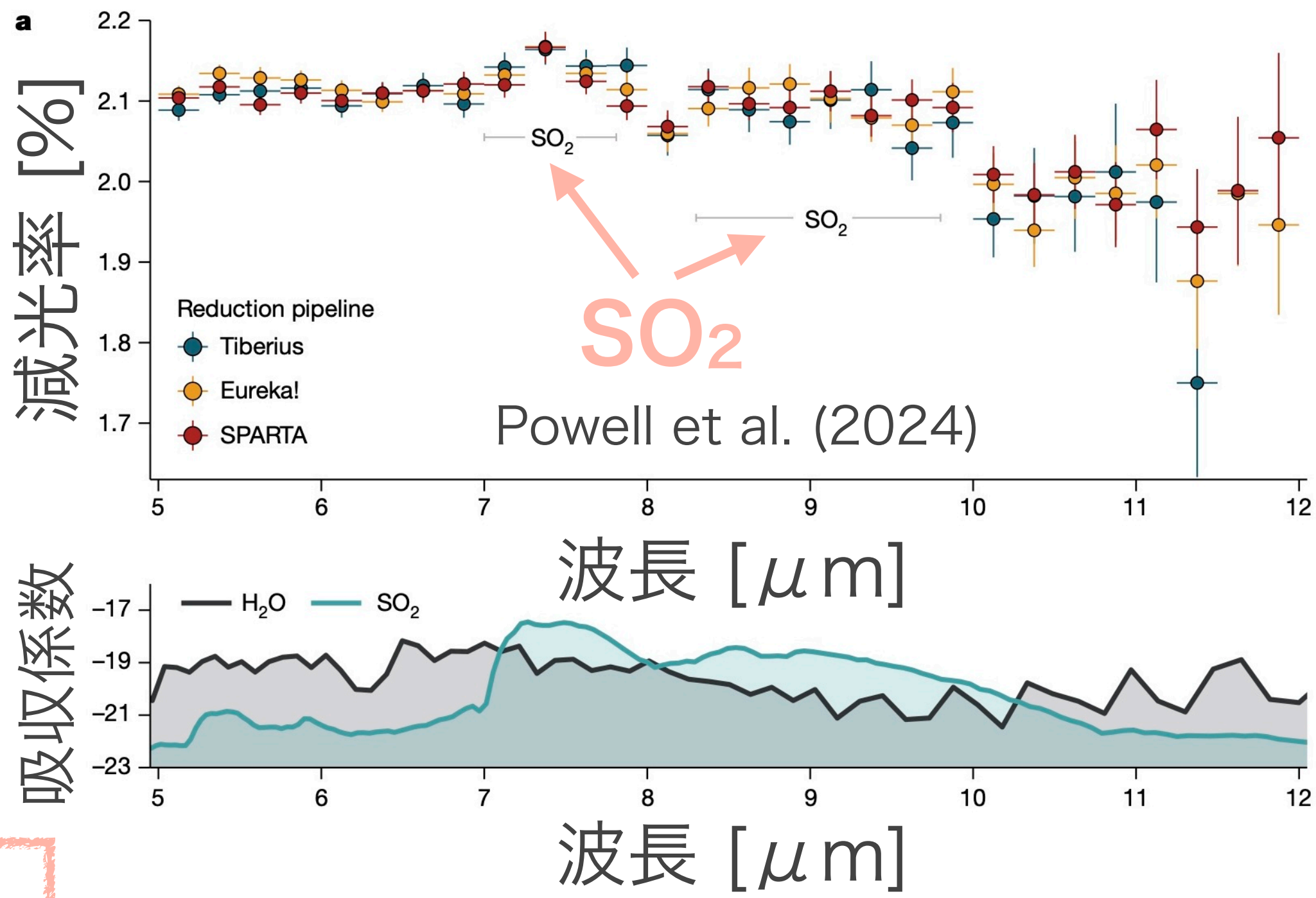
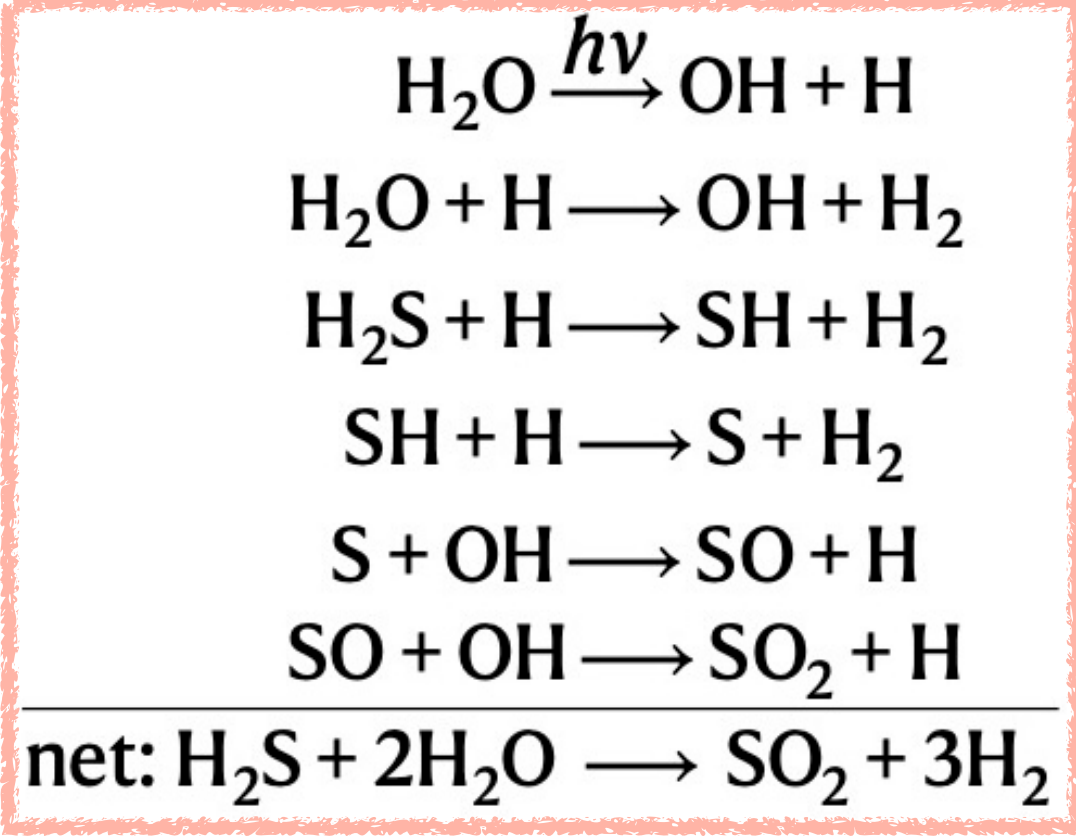


大気化学：光化学反応の初検出

WASP-39bの透過スペクトル



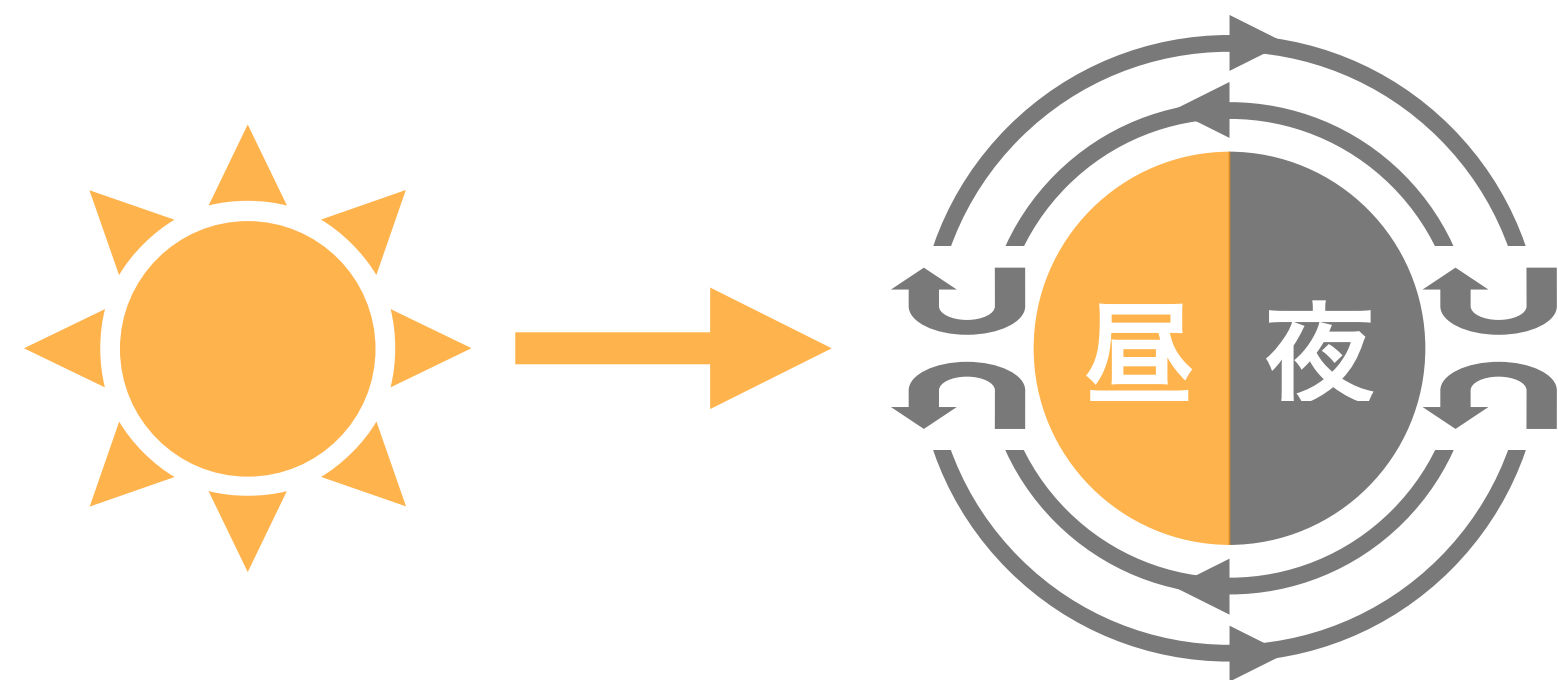
H₂Oの光分解から
生成されるOHが
H₂Sの一部をSO₂に変換



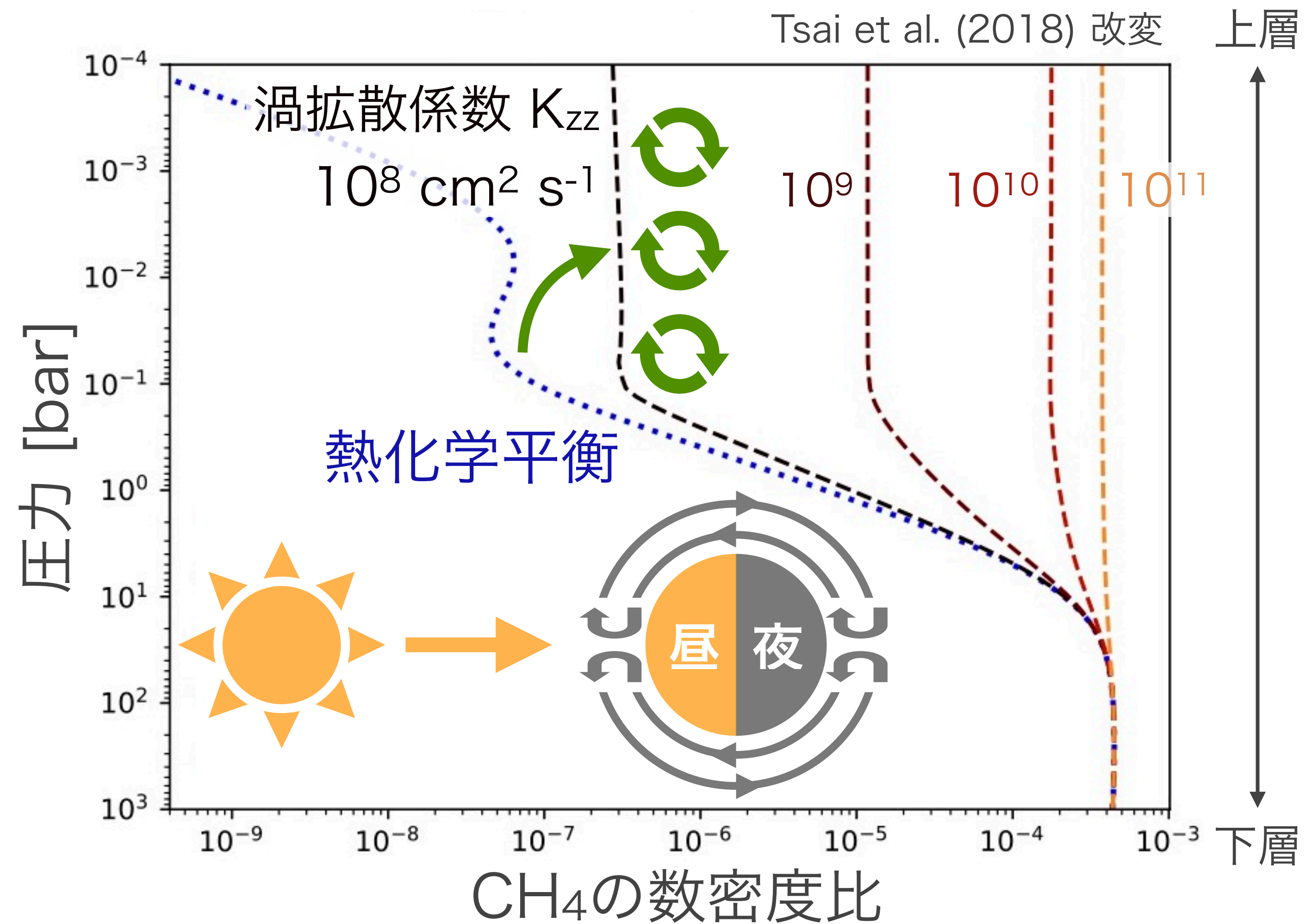
MIRIの観測で、
長波長側のSO₂の吸収特徴も確認

大気化学に対する大気混合の影響

- 透過スペクトルで探ることのできる大気中層は、 $\tau_{\text{chem}} \gtrsim \tau_{\text{mix}}$
- 鉛直方向の大気混合を拡散過程としてパラメータ化
- ある場所より上層は混合率一定



恒星からの加熱が生み出す
大気の運動



逆問題スペクトルコードへの非平衡化学の導入

連続の式

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \boxed{P - L} - \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

熱化学反応による生成・損失

渦拡散フラックス

$$\Phi = -K_{zz}N\frac{\partial f}{\partial z}$$

渦拡散係数

大気の混合

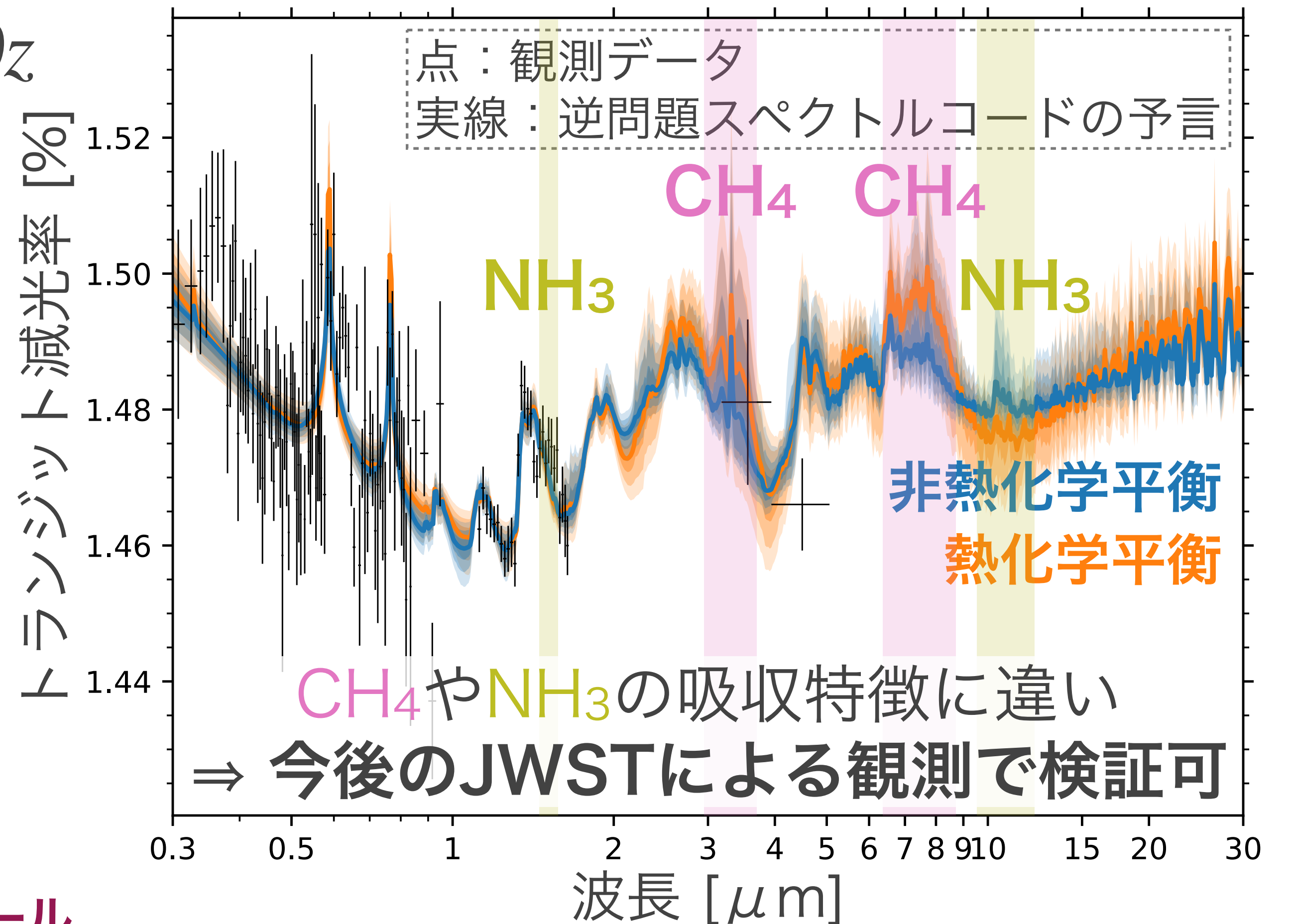
化学緩和法

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \boxed{\frac{n - n_{eq}}{\tau_{chem}}} - \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

熱化学平衡の数密度

熱化学反応のタイムスケール

※ τ_{chem} はTsai et al. (2018)を使用



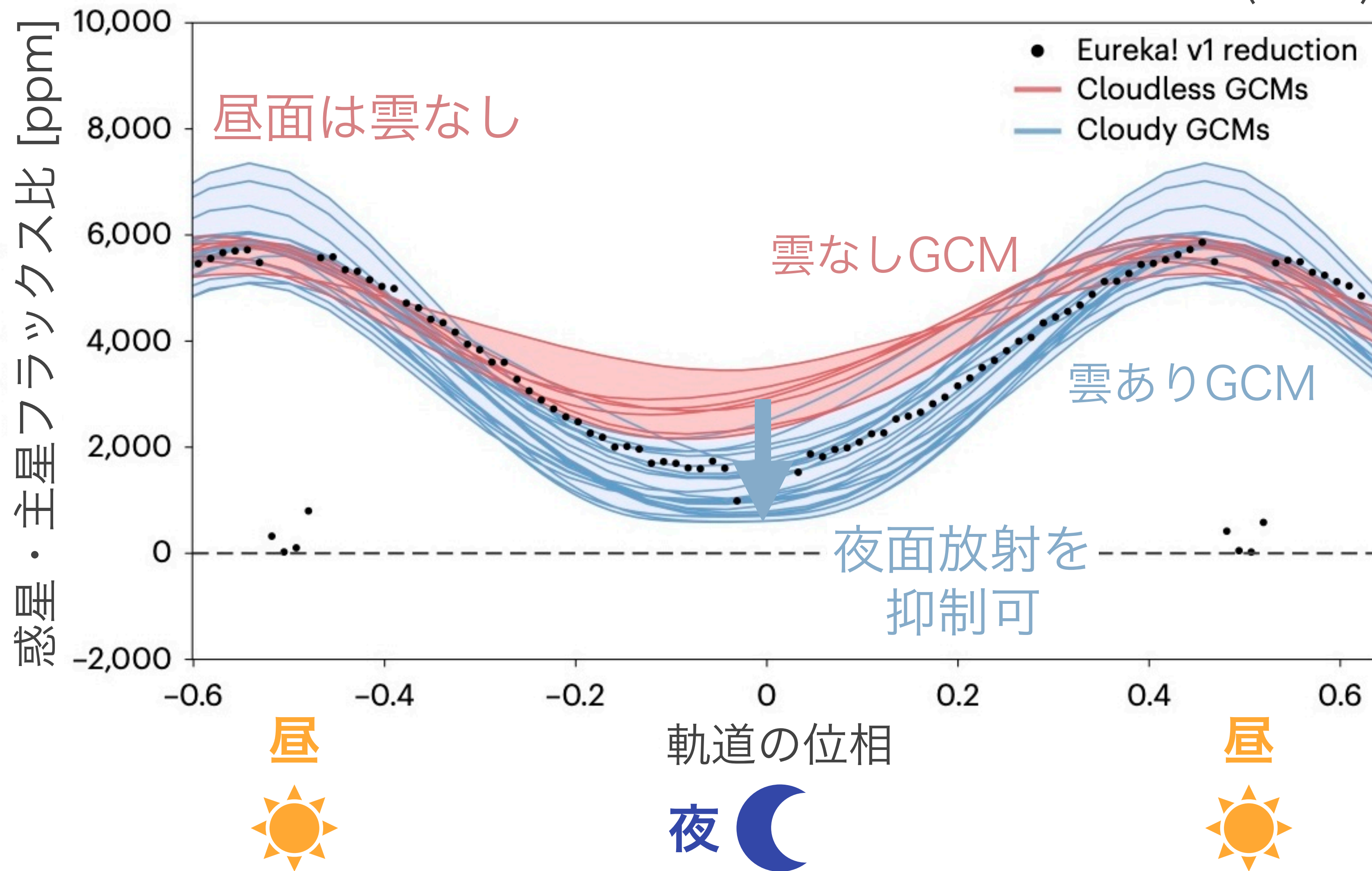
※ CH₄はJWST/NIRCamで受からず (Xue et al. 2024)



大気循環・雲生成・熱収支

JWST/MIRIによる
ホット・ジュピター
WASP-43bの
位相曲線観測

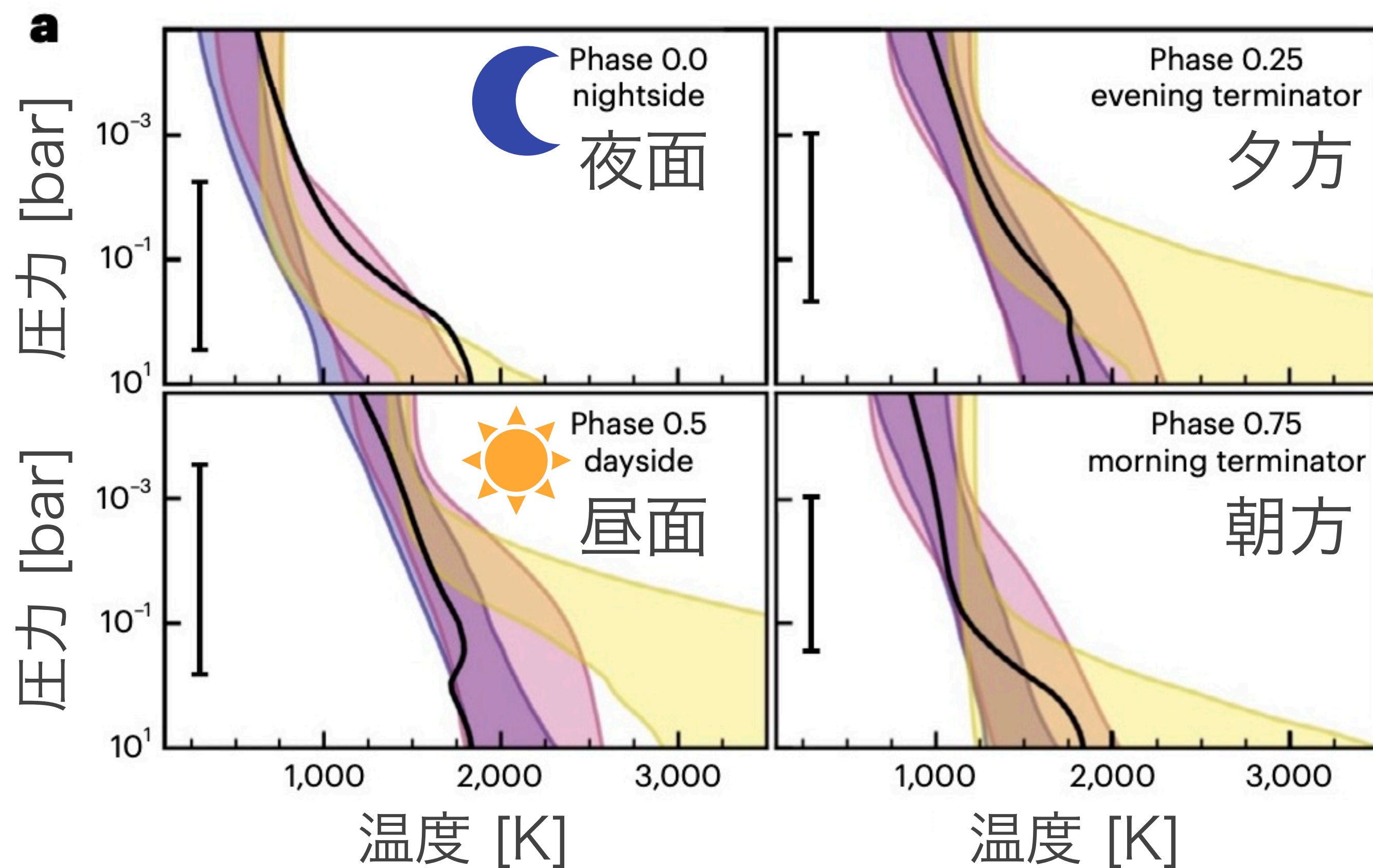
Bell et al. (2024)



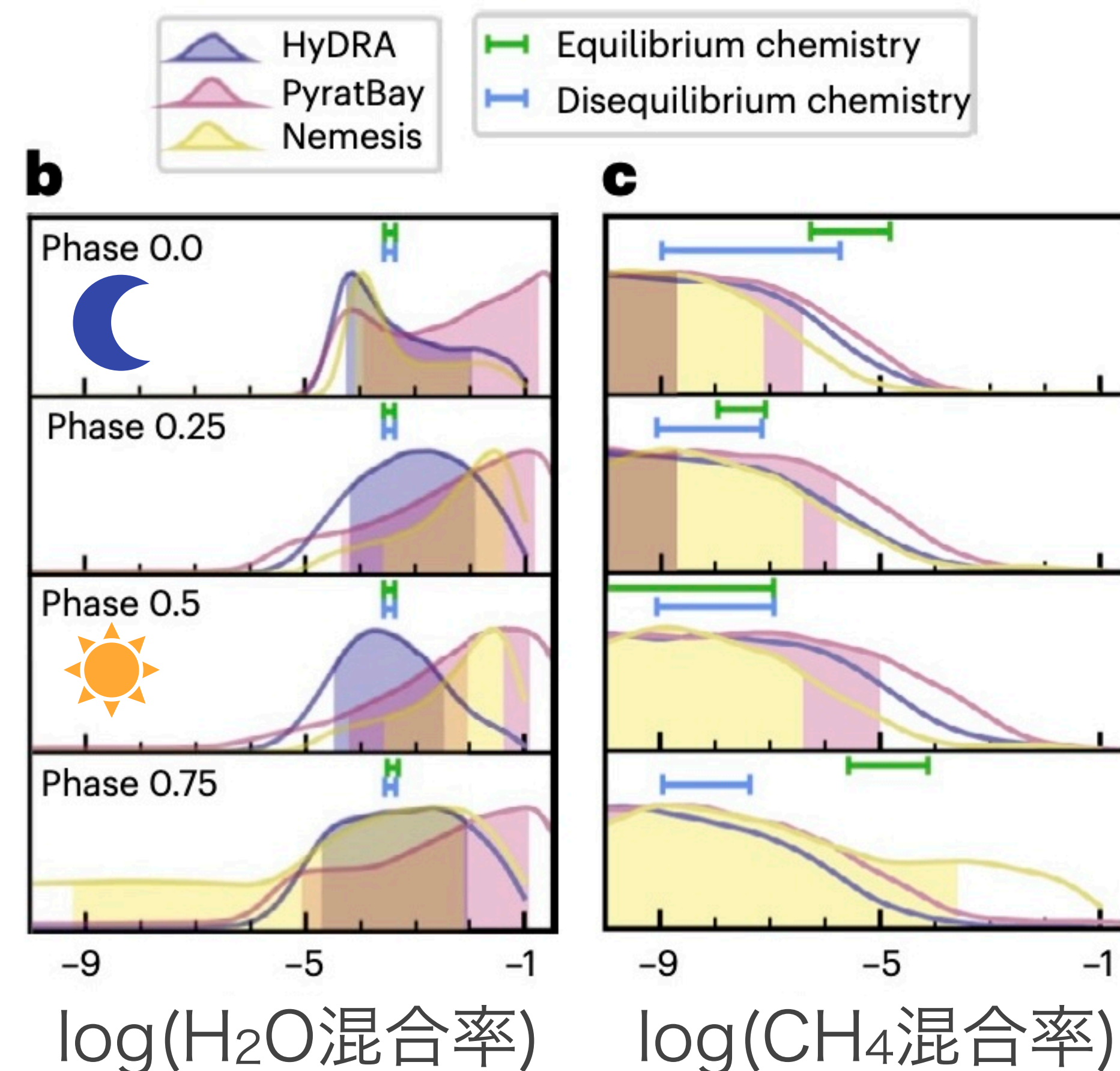


大気化学・大気循環・熱収支

温度構造の推定

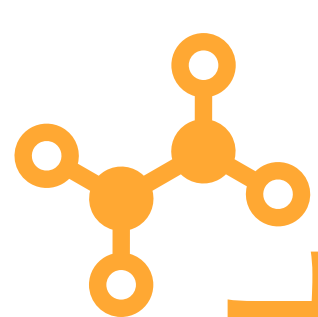


化学組成の推定



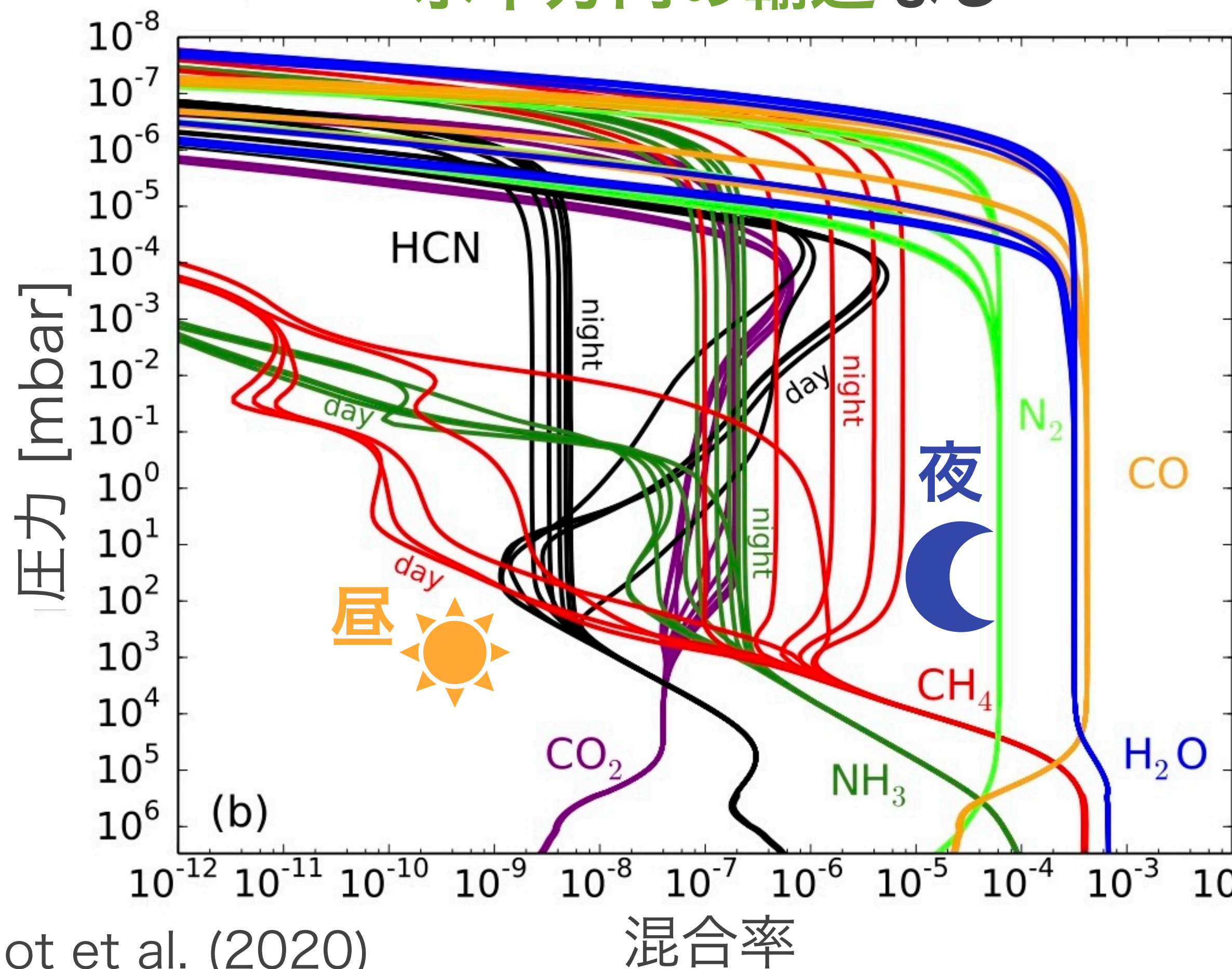
Bell et al. (2024)

CH₄未検出 ⇒ 水平方向の輸送の影響？



大気化学に対する水平方向の大気混合の影響

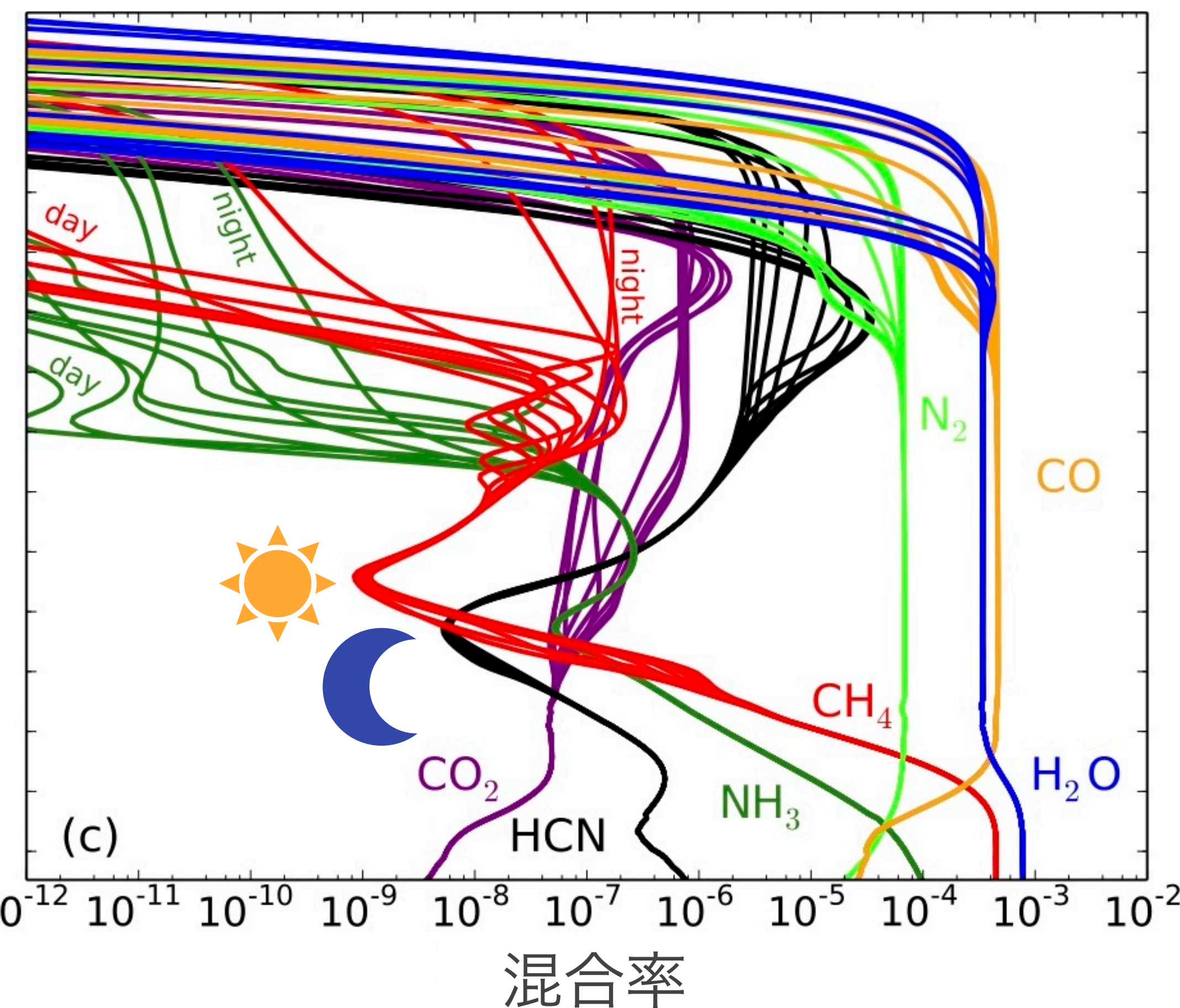
水平方向の輸送なし



Venot et al. (2020)

夜面は昼面と異なる化学組成

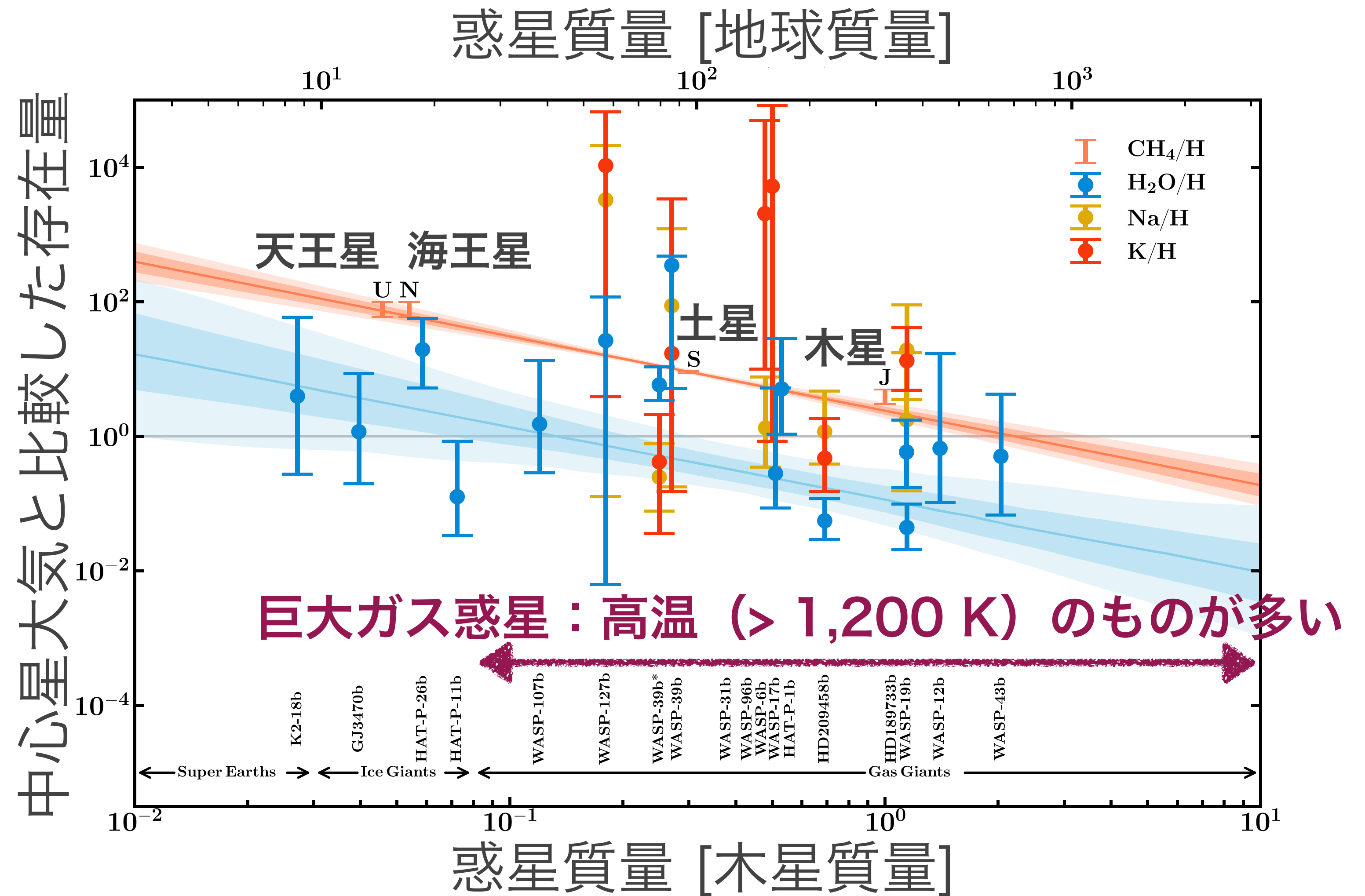
水平方向の輸送あり



夜面の化学組成も昼面と同様の組成に

観測されている系外惑星大気のエ元素存在度

- **Na**と**K**はおおよそ
太陽系内巨大惑星の
CH₄のトレンドと一致？
- **H₂Oのトレンド**は、
太陽系の**トレンド**と比べて低い
- **高温の場合**、C/O比が高いと
H₂Oの存在量は枯渇：
C/O比が高いことを示唆？
- **炭素の存在量**も観測出来る
JWSTに期待



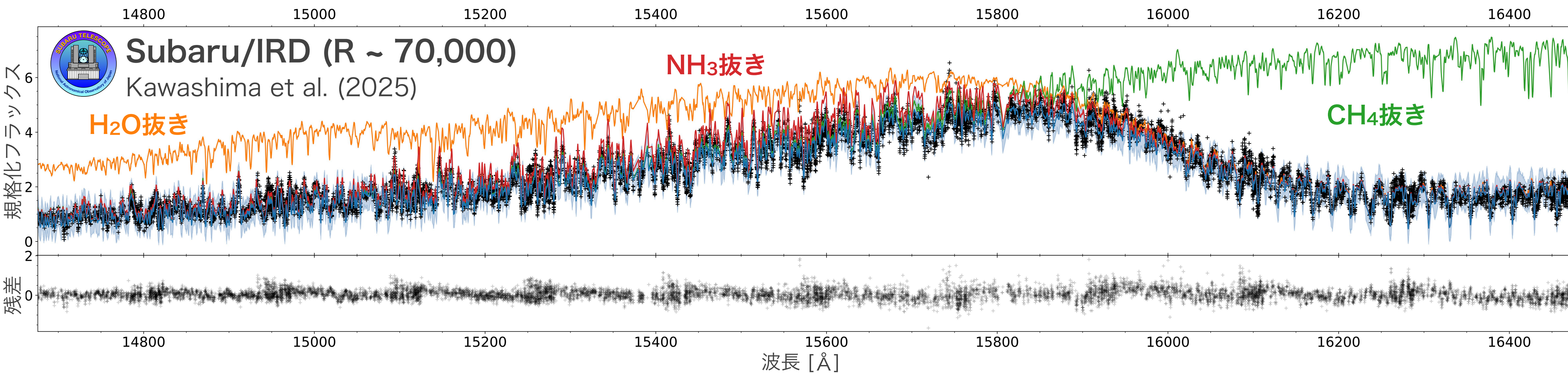
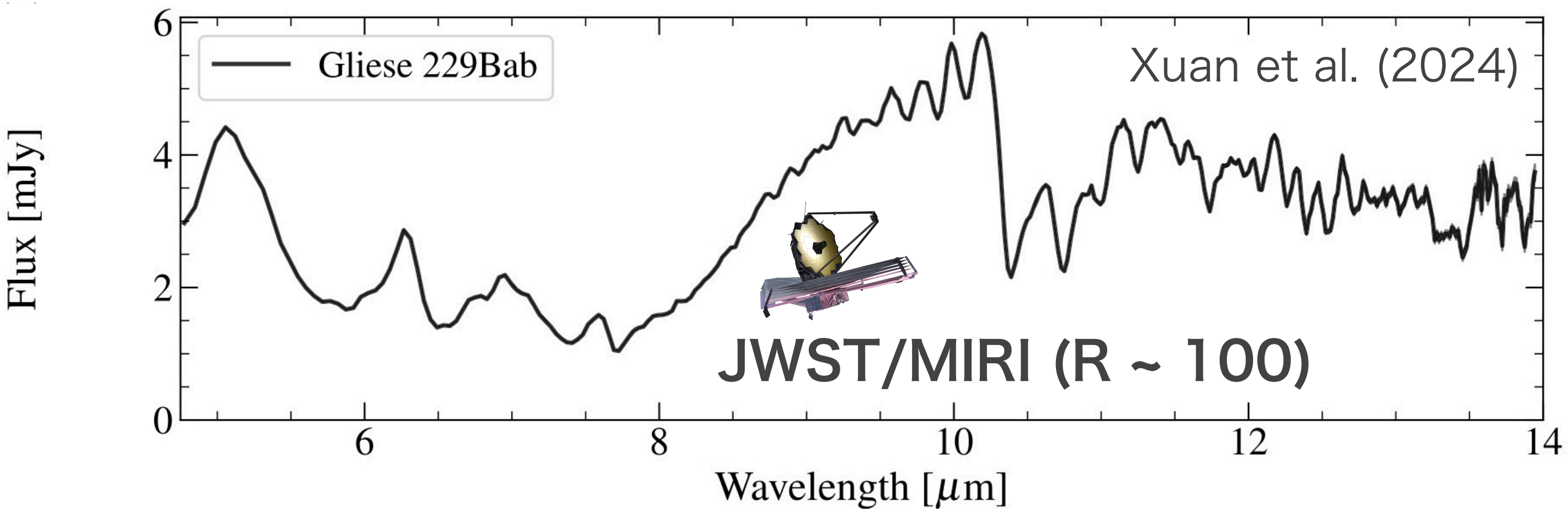
すばる望遠鏡によるT型褐色矮星の高分散分光観測

高分散分光観測による
1本1本の吸収線の分解



相補的な情報

- ▶ 化学種のロバストな検出
- ▶ 温度構造
- ▶ 自転・風

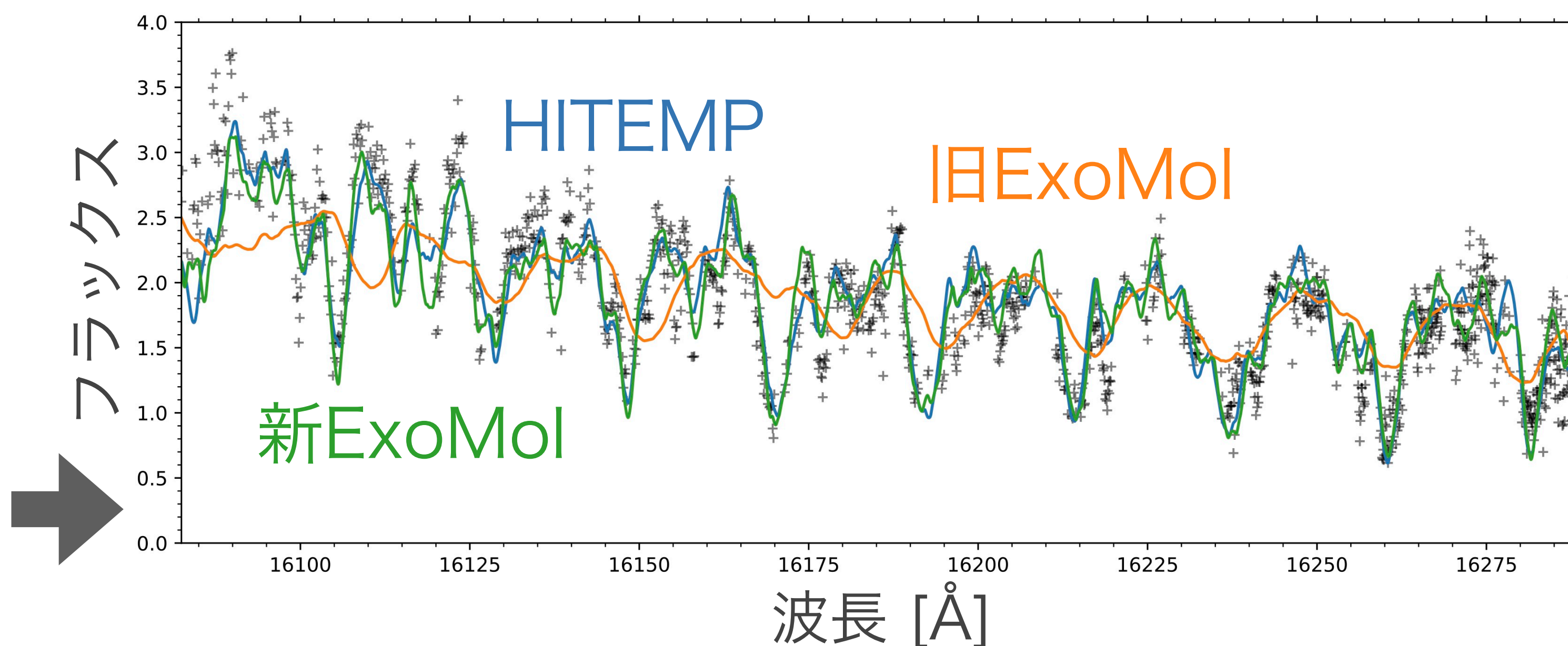


褐色矮星を用いた吸収線リストの観測的検証

- 高温 (≥ 500 K) 環境下では分子の吸収線リストの確立が急務
- 高分散分光観測における、テンプレートとの相関有無による分子検出は、吸収線の波長・強度の情報の正確性が鍵

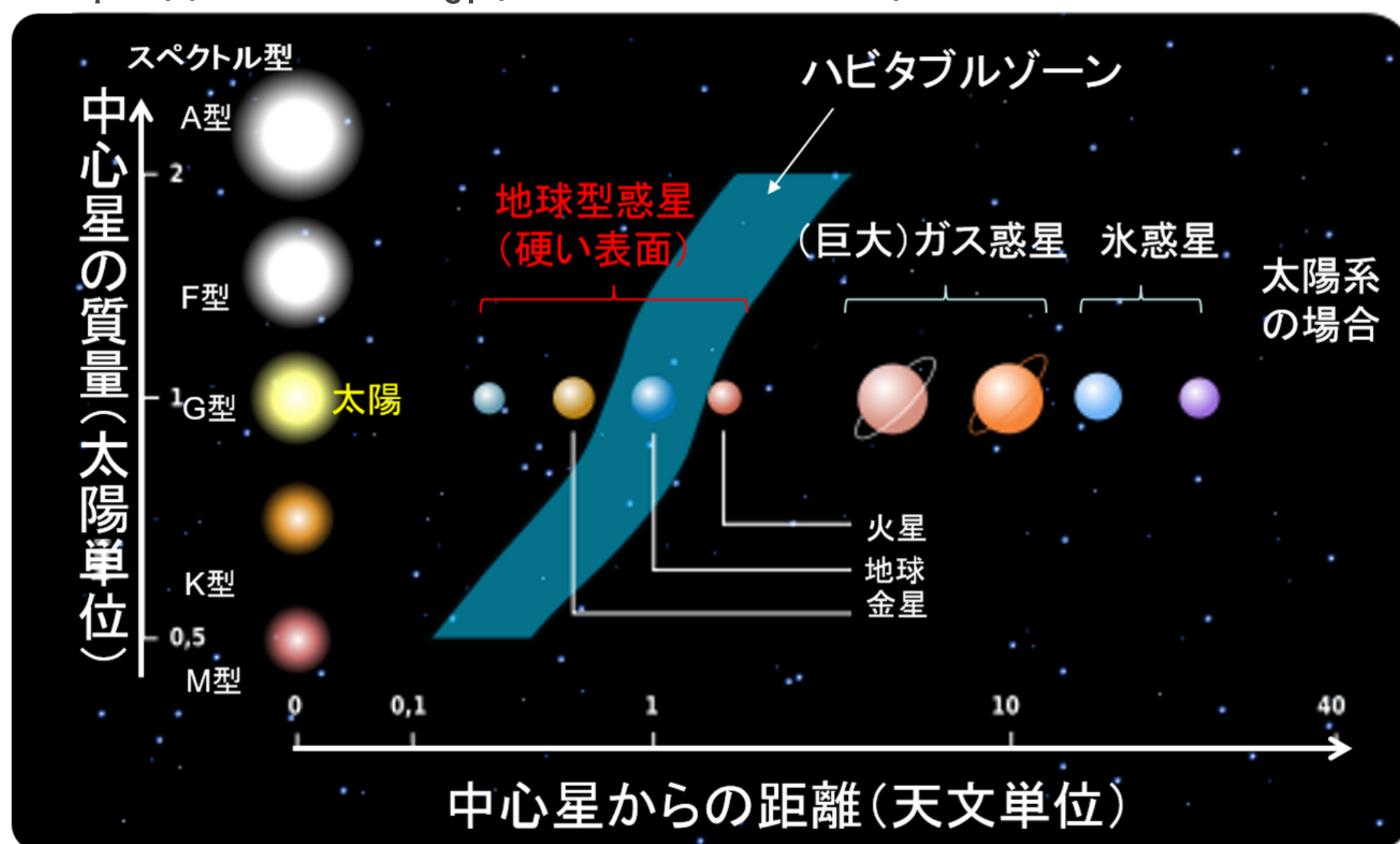
- 褐色矮星の
高分散分光スペクトルは
最適な検証材料

CH₄がスペクトルを支配する
波長領域のデータに対する
フィット



生命を宿す系外惑星はあるのだろうか

<https://astro-dic.jp/habitable-zone/>

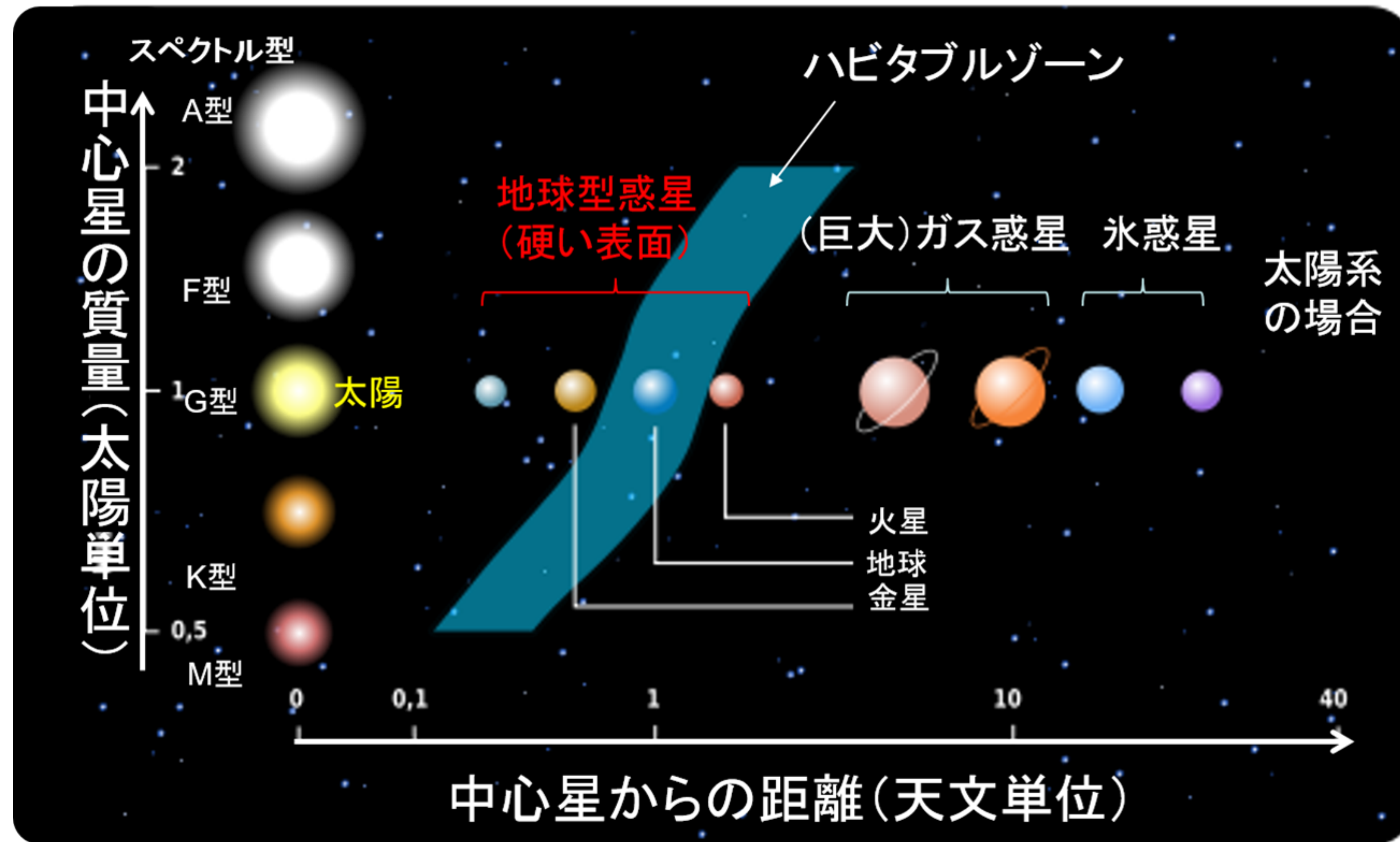


ハビタブルゾーン：
地球と似た生命に必要な液体の水を、
惑星表面に保持できる領域

- 米国国立科学アカデミー発表の、今後10年間の天文学の最優先課題：
ハビタブルゾーン内地球型惑星を有意な数 (25個程度)、観測可能な宇宙望遠鏡HWO (Habitable Worlds Observatory)の建設 (2040年代前半、打ち上げ)
- 我々とは全く異なった環境で生きる生命もいるかもしれないが、未知
=> まずは地球の生命をベースに考える

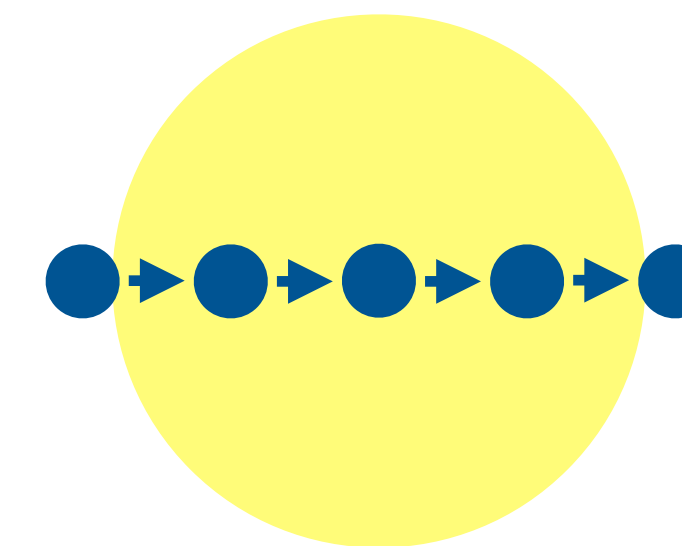
小さな地球型惑星の大気観測

<https://astro-dic.jp/habitable-zone/>



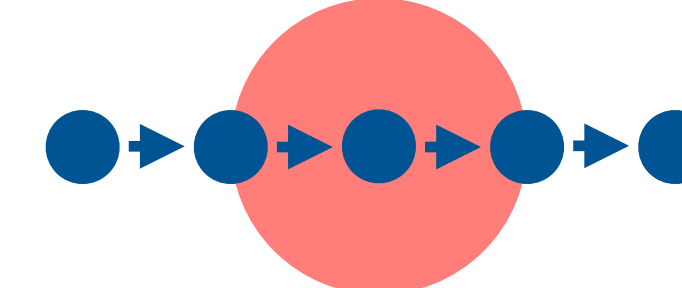
トランジット法

G型星



主星が大きいと
難しい

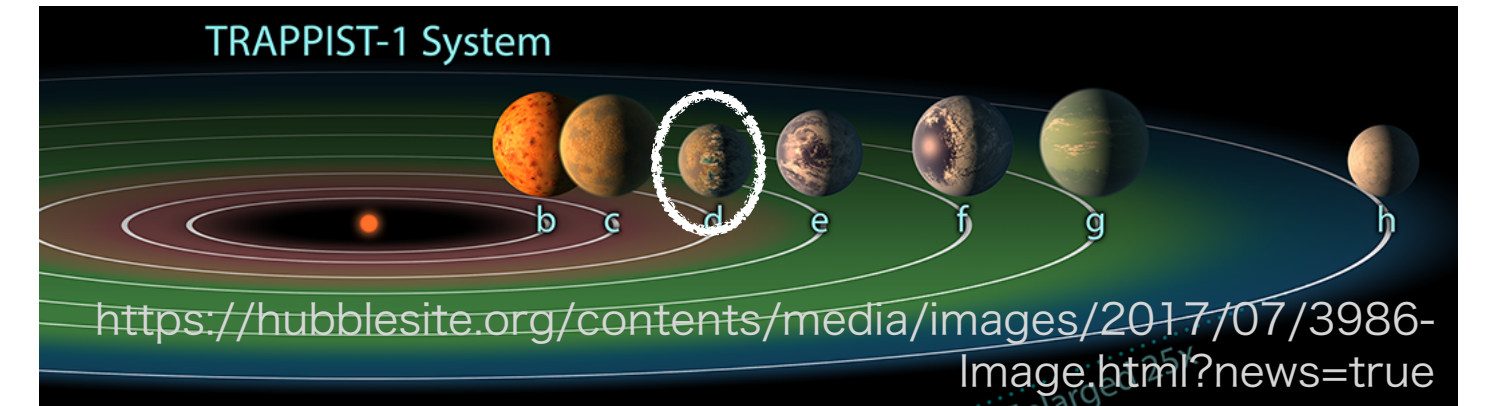
M型星



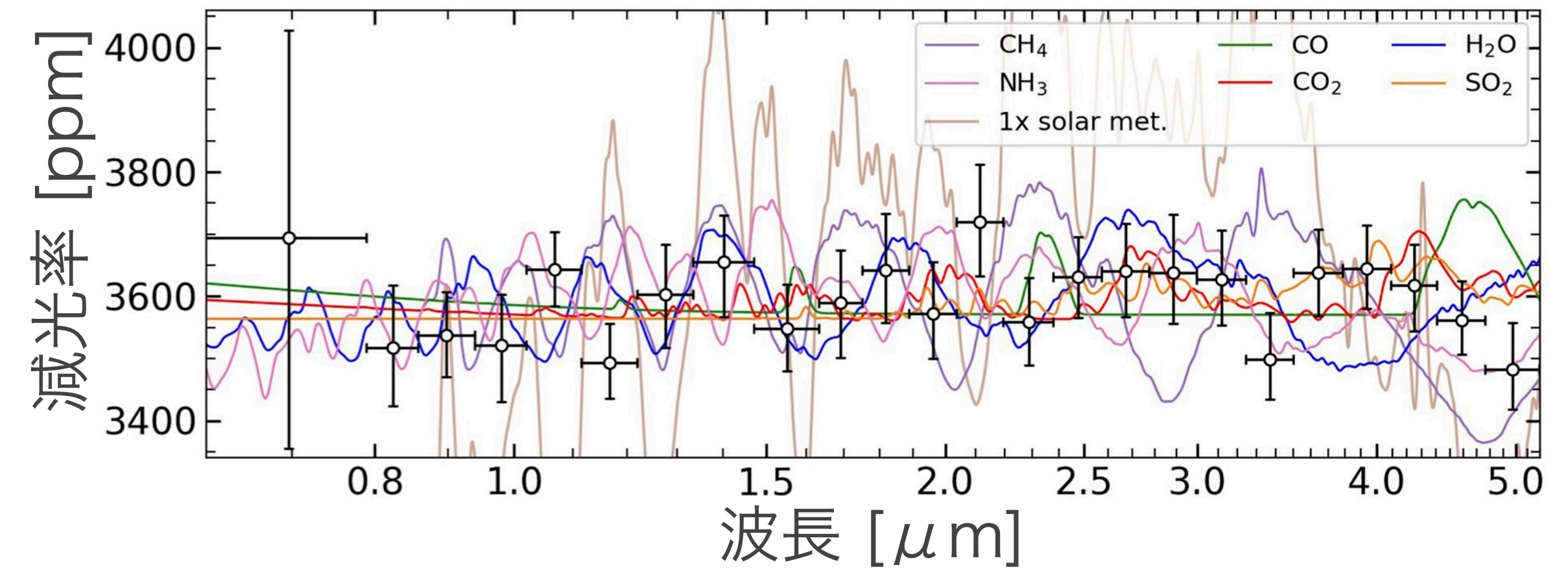
まだ観測しやすい

JWSTによる観測が幕開け

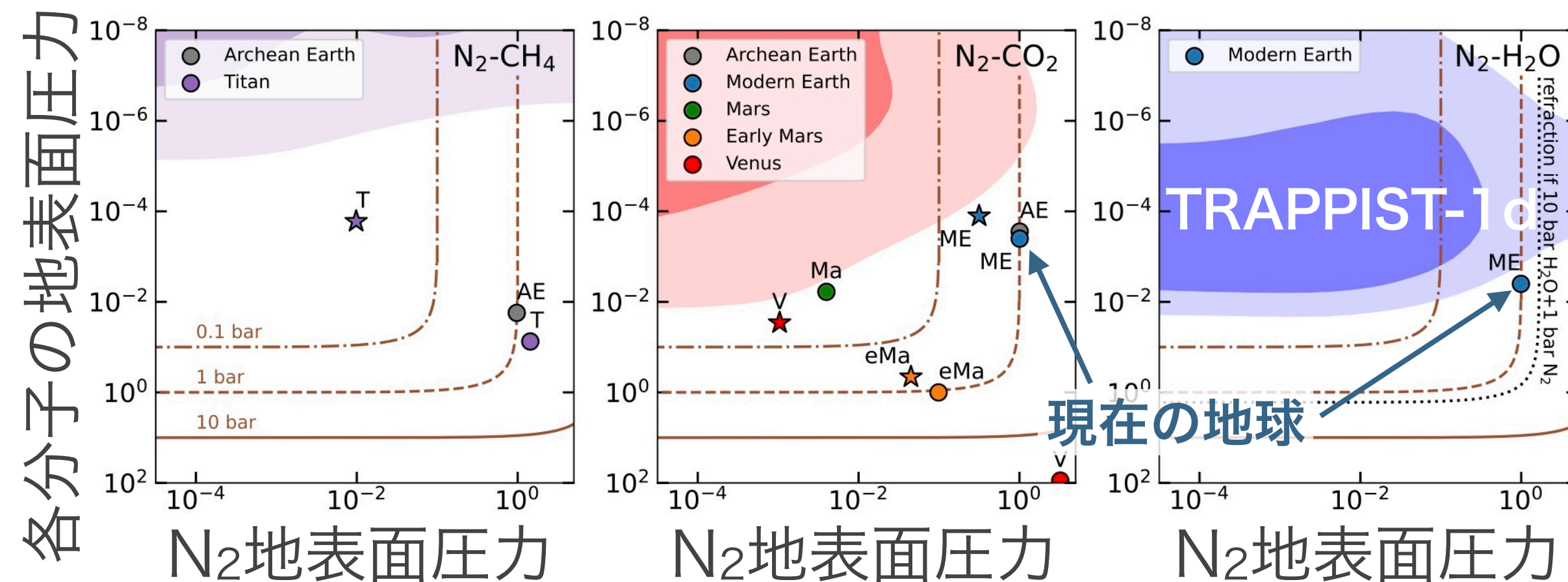
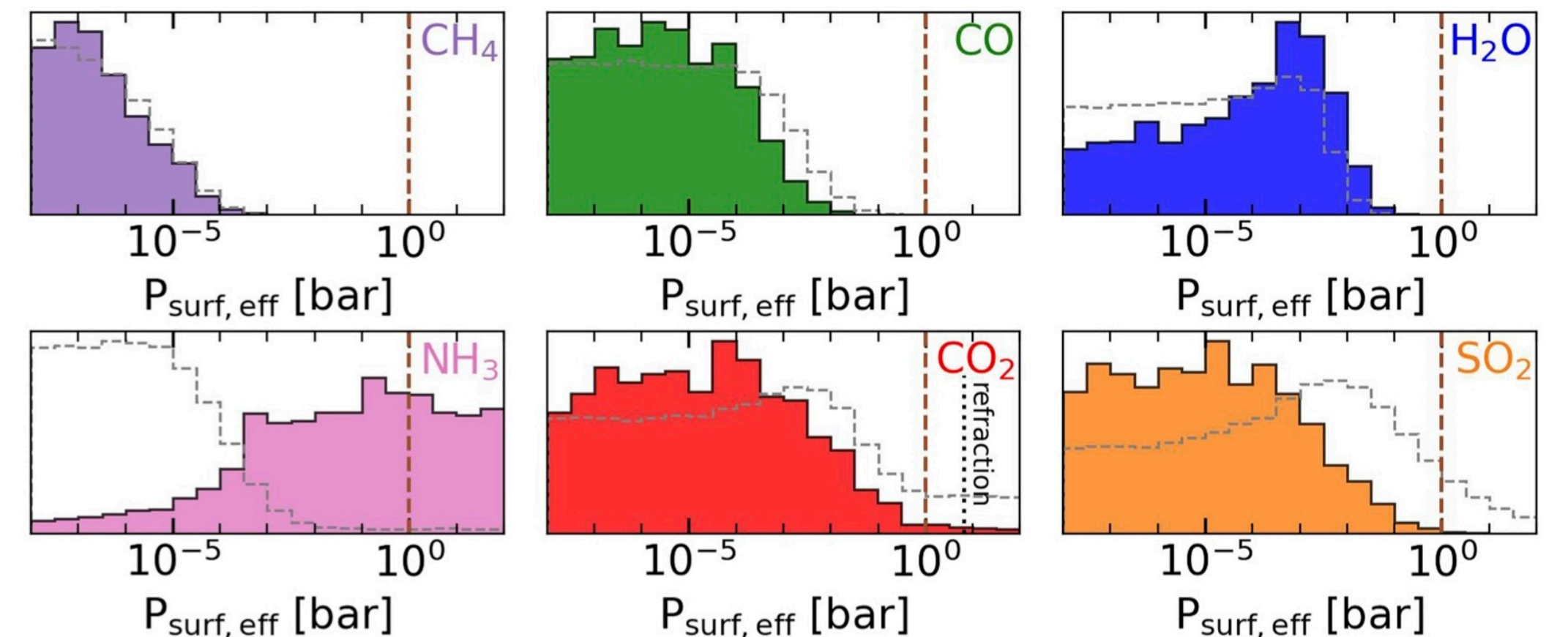
JWSTによる地球型惑星観測



- 分子による吸収は見えない
- 太陽系の地球型惑星とは異なる
- 大気をもつとすれば、非常に薄い
or 高い高度に雲がある

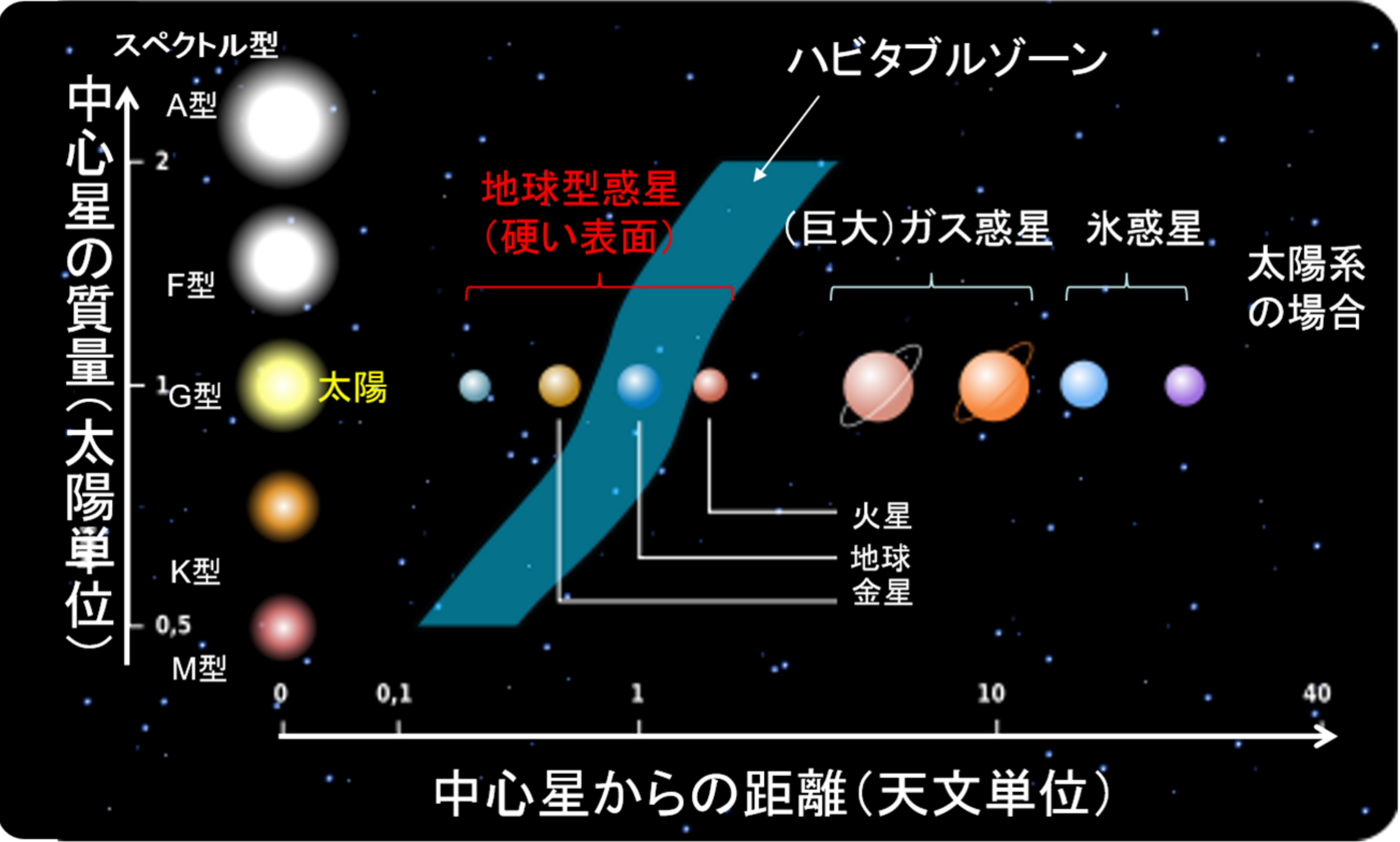


各分子の地表面圧力の周辺事後確率分布



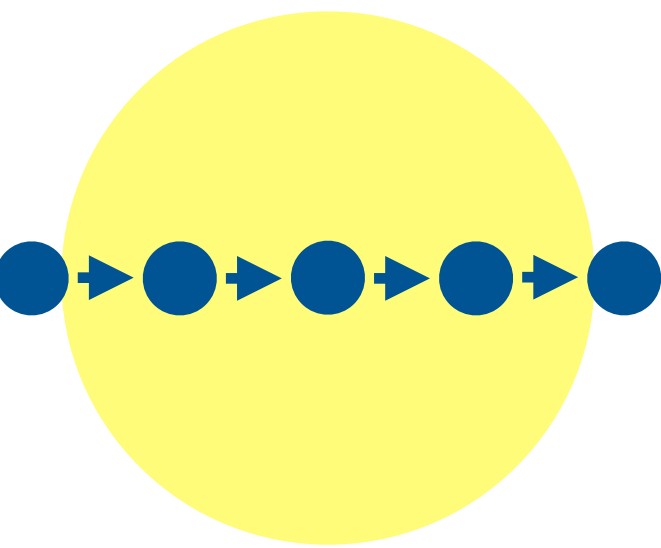
太陽型星まわりの地球型惑星 => 直接撮像

<https://astro-dic.jp/habitable-zone/>



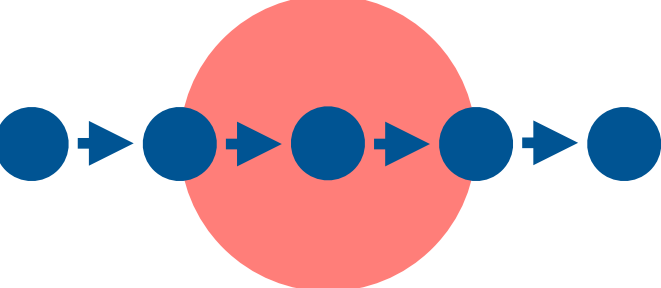
トランジット法

G型星



主星が大きいと
難しい

M型星



まだ観測しやすい

JWSTによる観測が幕開け

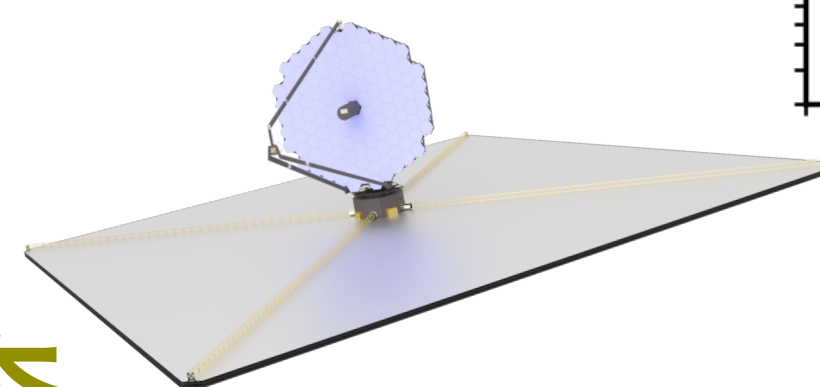
今後の流れ

2000s
惑星の発見

2010s
惑星の系統的な発見

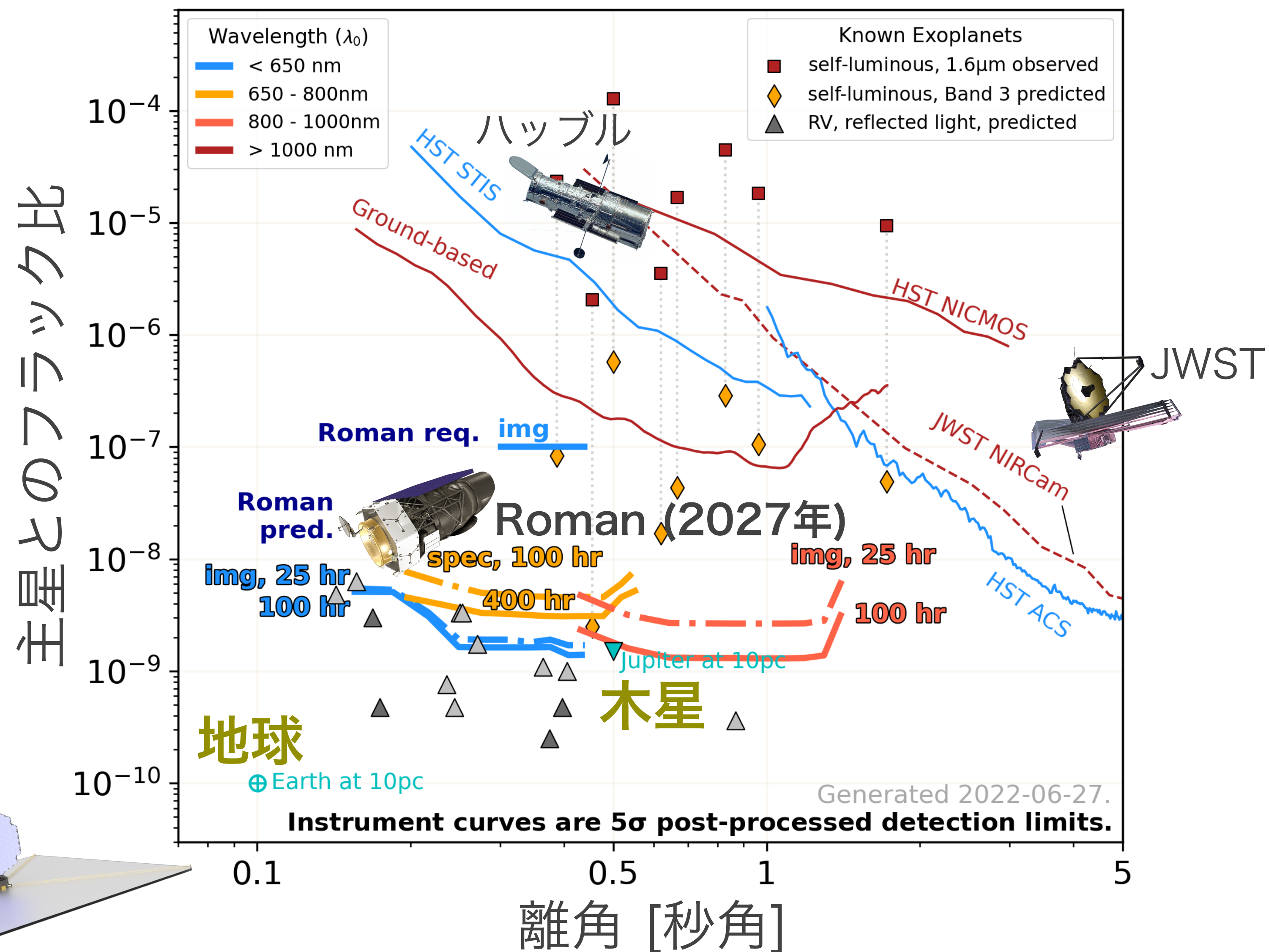
2020s～
発見された
個々の惑星の詳細調査

2040s～
地球型惑星の詳細調査



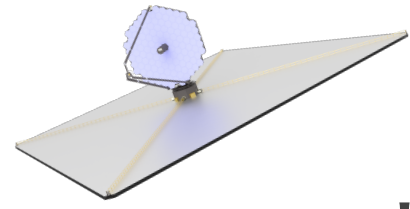
Habitable Worlds Observatory (HWO)
コロナグラフ付き宇宙大型望遠鏡

Credit: NASA

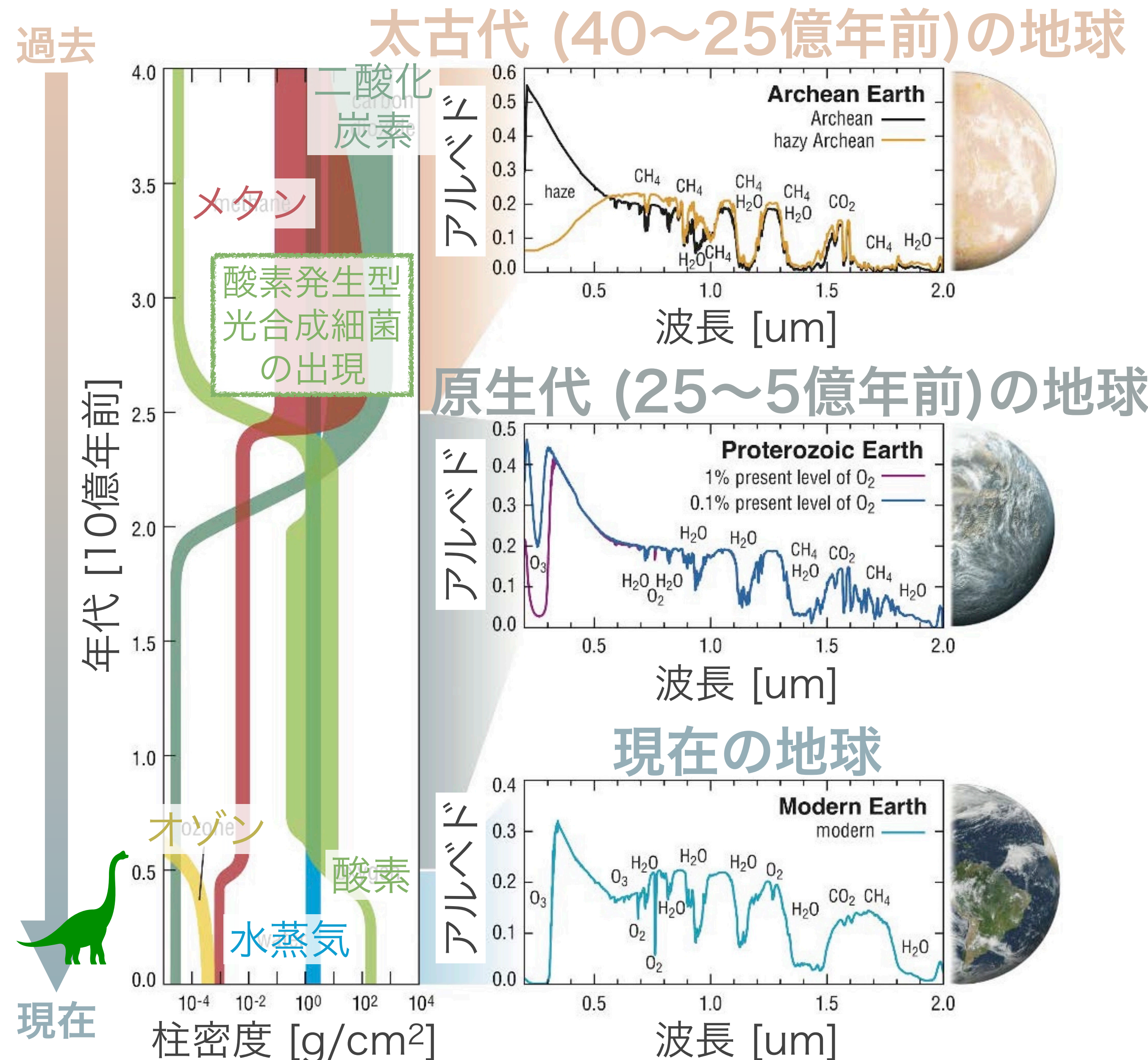


2040年代～

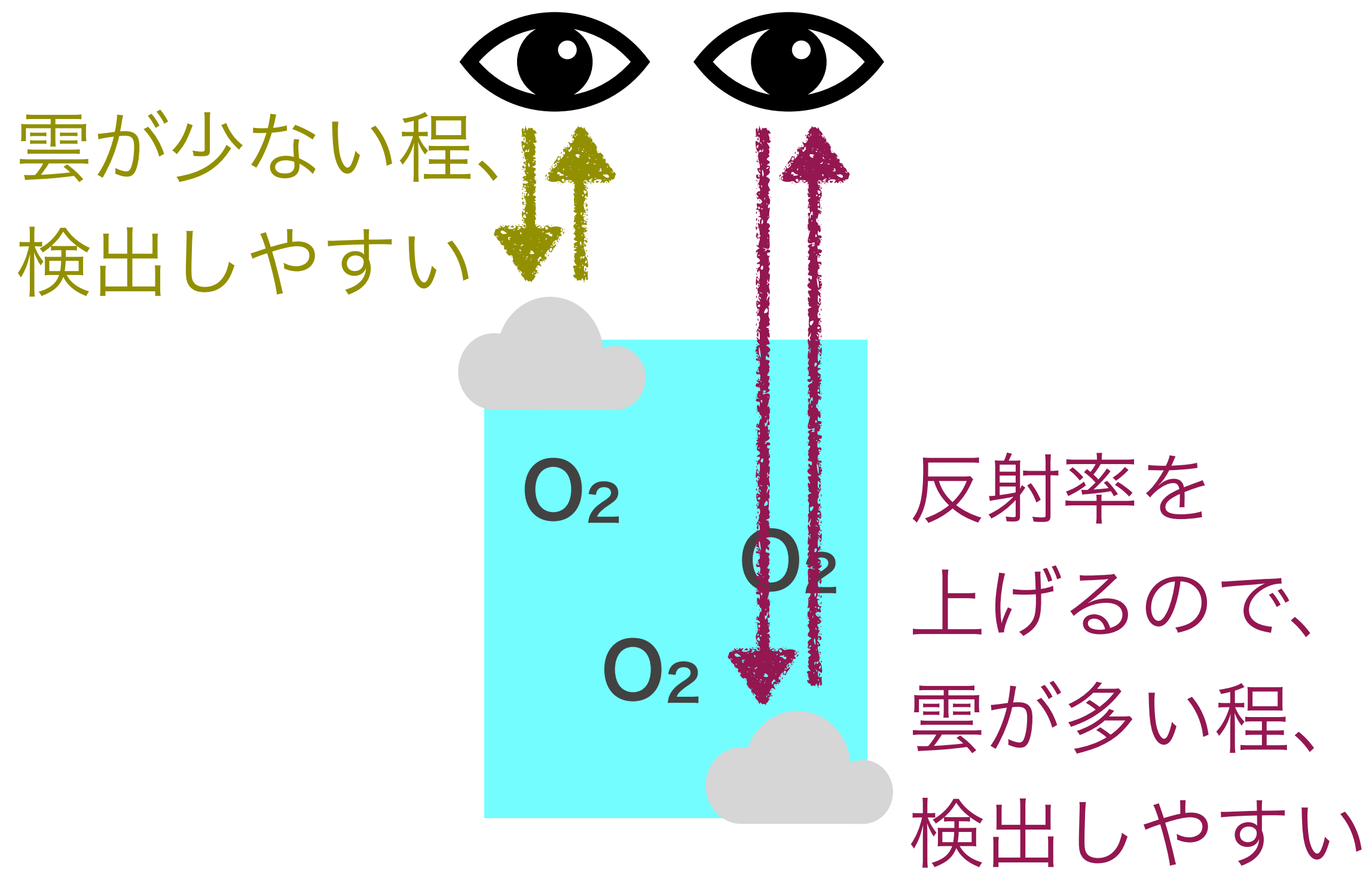
HWOによる観測



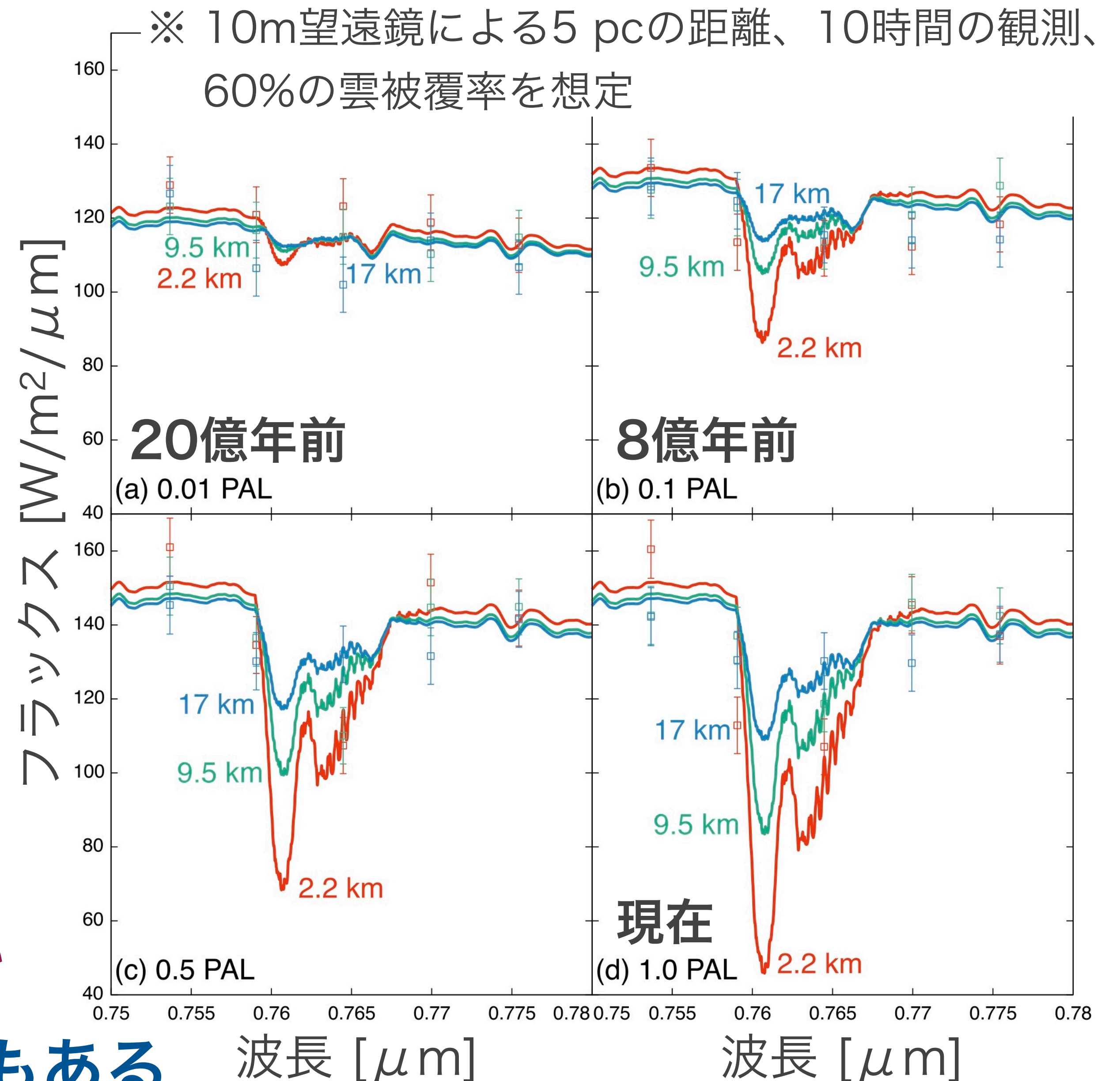
- 太陽型星をまわる地球型惑星を直接撮像可能な宇宙望遠鏡
HWO (Habitable Worlds Observatory) の打ち上げが予定されている
- 例えば、様々な年代の地球と似た惑星を見付けることができるかもしれない
- ▶ 我々の地球の大気組成は過去から現在にかけて変化



雲の高度による違い @酸素A-バンド



雲の存在は大気観測を助ける場合もある



PAL (Present Atmospheric Level) : 現在の地球大気での量

まとめ

- **系外惑星を発見する時代**（～2010s）から、
発見された個々の惑星を特徴付ける時代へ（2020s～）
- 限られた観測量から、惑星の組成/大気・表層環境を探るには、
大気化学・雲生成・大気循環・熱収支が相互に依存して絡み合う
大気の物理・化学過程を系統的に理解・考慮する必要がある
- 究極の目標の一つである生命存在可能性の理解に向けて、
ハビタブル・ゾーン内にある地球型惑星の観測を目指し進展中