

GREX-PLUS : 中間赤外線高分散分光による 惑星大気観測

佐川英夫 (京都産業大学)

sagawa@cc.kyoto-su.ac.jp

GREX-PLUSで切り拓く(系内)惑星大気サイエンス

1. 外惑星 (特に Ice Giant) の大気温度構造の高精度・高頻度観測.
2. タイタン大気化学の網羅的観測.
3. 太陽系天体における D/H の包括的観測. (注: 観測可能な波長域にも依存)

- 外惑星, 特に Ice Giant は未だ観測的知見が限られている (2030年代の将来探査の対象).
- 地球近傍とは大きく異なる(極限)環境: 惑星大気の物理・化学過程の天然の実験場.
- 複数の研究コミュニティを繋ぐことが可能な研究テーマ:
系外惑星, (天文学的な)惑星科学, 太陽系科学, 地球超高層大気や(地球)気象学

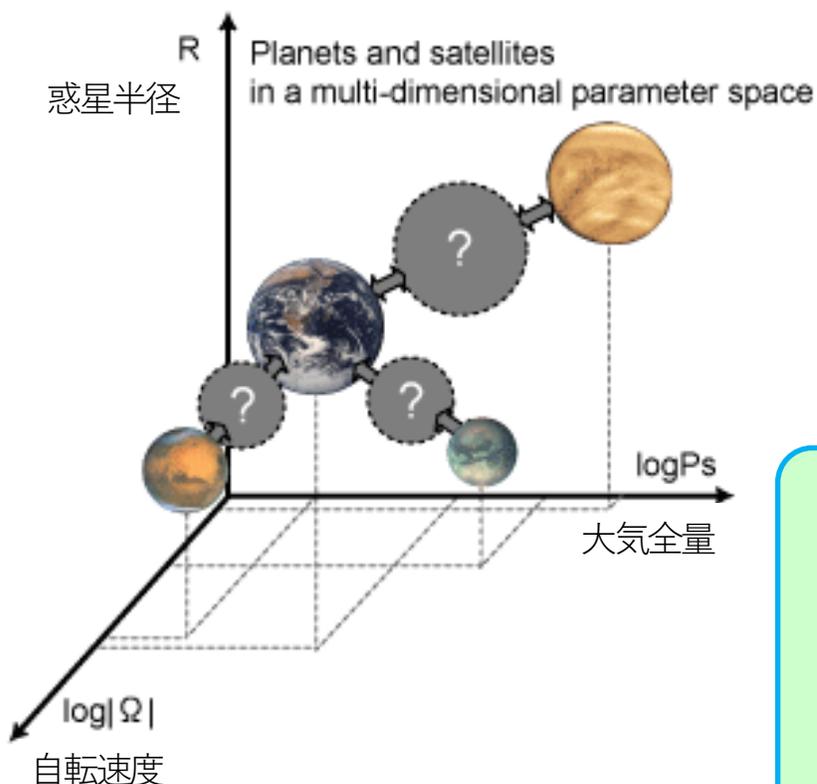
惑星大気を研究する意義

- 惑星表層 (固体表面と宇宙空間の間) で生じる 普遍的な物理 (化学) 過程 を理解したい。
- 惑星形成や進化の結果 あるいは 惑星生命圏 (ハビタビリティ) の現場として。

惑星大気 = 個々の惑星を特徴付ける (最も外側の) 環境

様々な物理過程が存在： 中心星や電磁圏からの影響に対する応答，
惑星内部からの脱ガス，大気層での物質循環など。

惑星の「環境」によって，これらのプロセスがどう変わるのか？



惑星大気を理解するための幾つかの重要要素 (互いに影響を及ぼし合う)

大気放射

気温構造の決定。
アルベドによる熱 (エネルギー) の分配。

大気力学

物質循環。
熱・運動量の全球輸送。
大気散逸 (大気進化)。

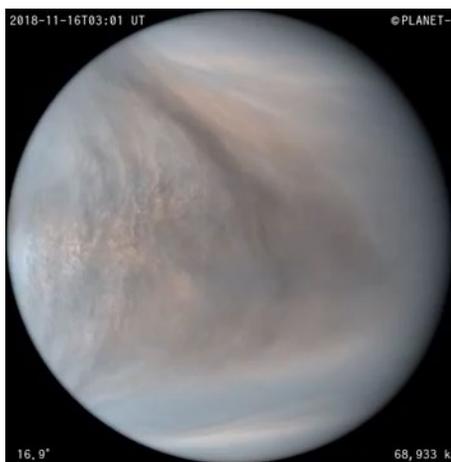
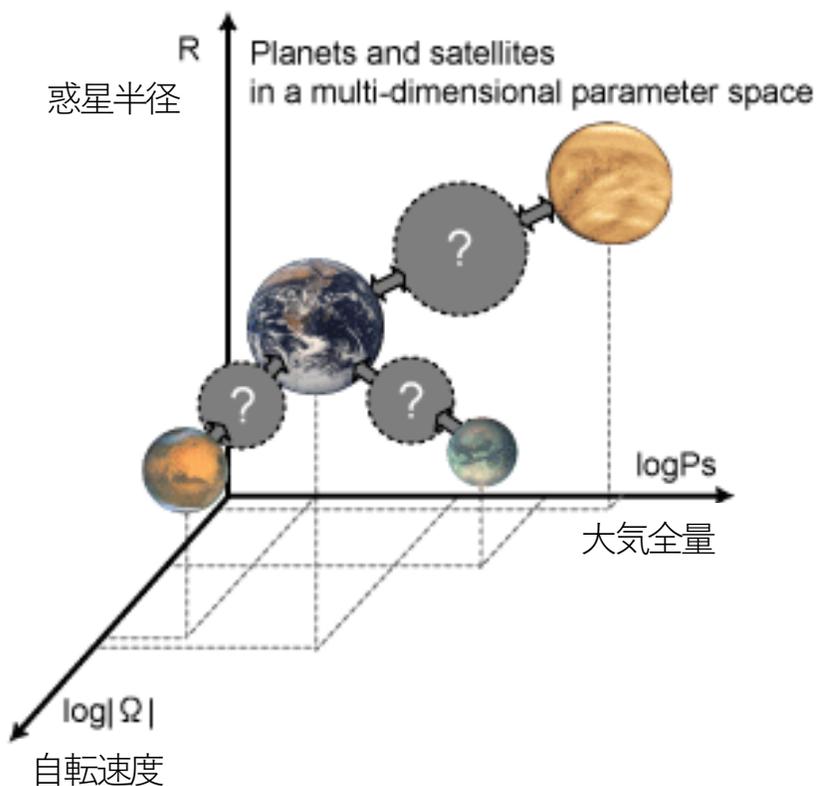
大気化学

大気組成の決定。
温室効果ガス。
エアロゾル・雲。

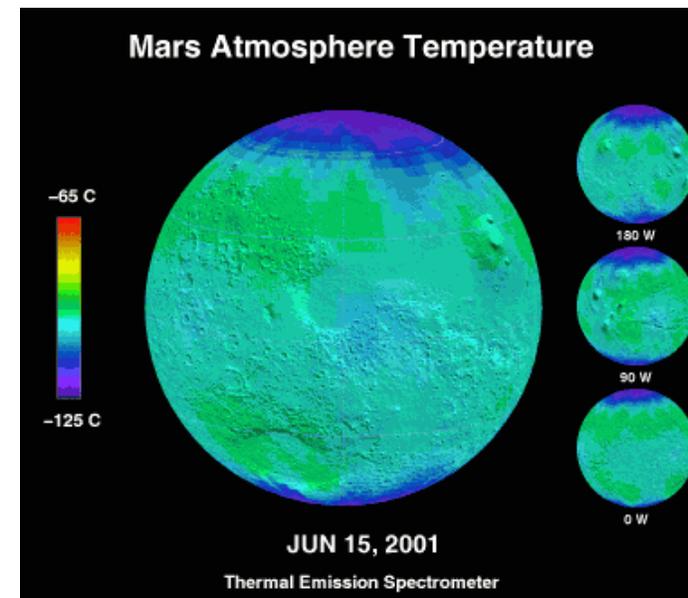
惑星大気を研究する意義

- 惑星表層 (固体表面と宇宙空間の間) で生じる 普遍的な物理 (化学) 過程 を理解したい。
- 惑星形成や進化の結果 あるいは 惑星生命圏 (ハビタビリティ) の現場として。

地球大気が惑星大気の「代表的な姿」では無いのは確実



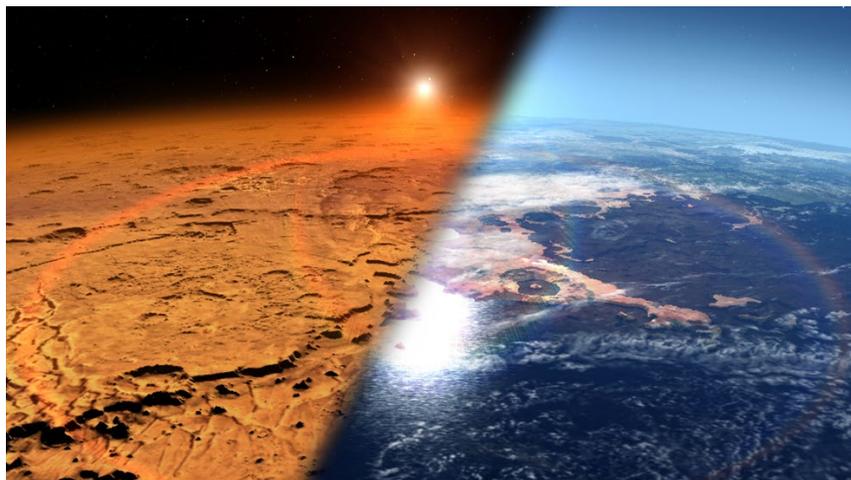
金星大気の高速循環 (大気スーパーローテーション) の様子。
自転の60倍もの東西風が存在。
(credit: JAXA/ISAS)



火星の**全球ダストストーム**期間中の気温の急上昇。
短期間のうちに数十K以上も高温に。(credit: MGS/TES, NASA/ASU)

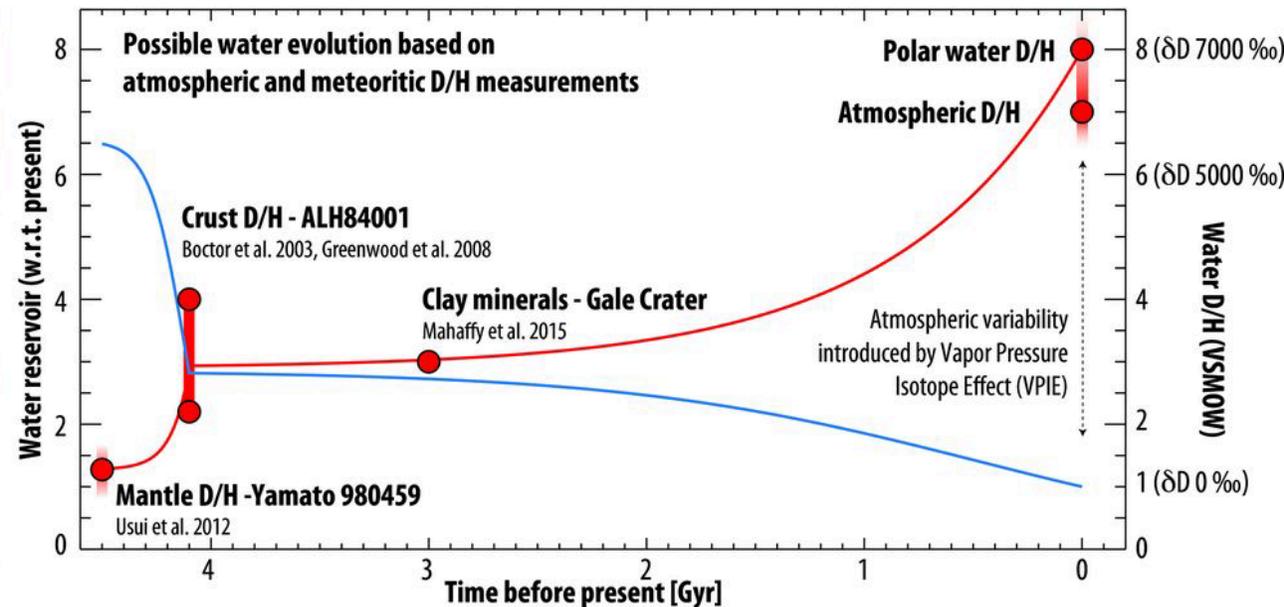
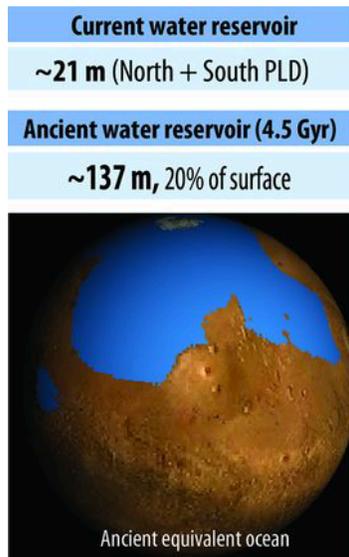
惑星大気を研究する意義

- 惑星表層 (固体表面と宇宙空間の間) で生じる普遍的な物理 (化学) 過程を理解したい。
- 惑星形成や進化の結果 あるいは 惑星生命圏 (ハビタビリティ) の現場として。



現在の火星と昔の火星の想像図 (credit: NASA)

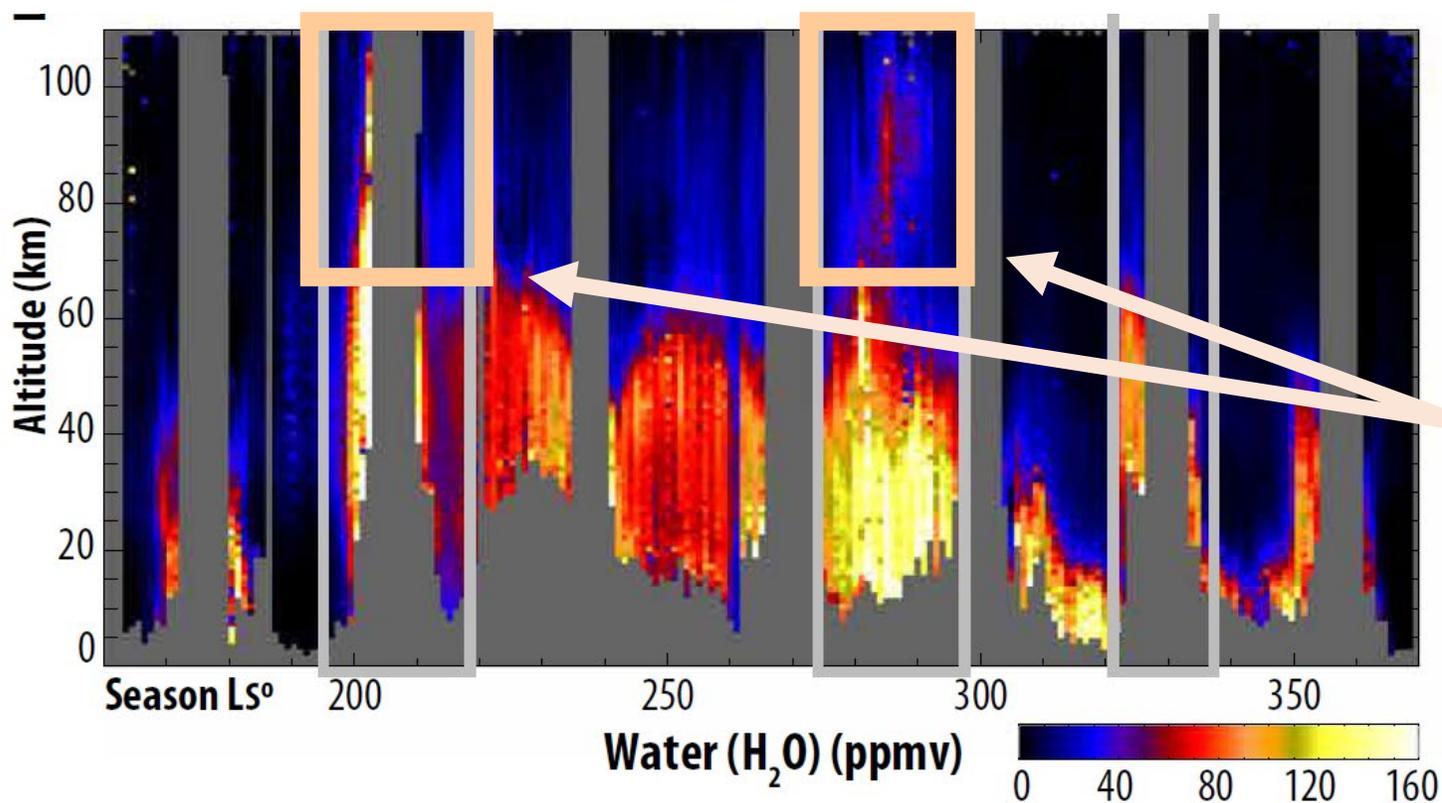
現在は地殻 (固体内部) \leftrightarrow 大気 \leftrightarrow 宇宙空間の間の揮発性物質のやりとりだが、海があった時代には大気-海洋間の相互作用も存在。



D/H 同位体比の値から「水」の存在量をバックトレース (Villanueva et al. 2015)
45億年前の火星は水でジャブジャブの惑星だったのかも!?

惑星大気を研究する意義

- 惑星表層 (固体表面と宇宙空間の間) で生じる普遍的な物理 (化学) 過程を理解したい。
- 惑星形成や進化の結果 あるいは 惑星生命圏 (ハビタビリティ) の現場として。



火星大気中の水蒸気高度分布 (Villanueva et al. 2021)
縦軸：高度，横軸：季節。灰色は観測が無い部分。

通常の場合水蒸気は高度 20 km 以下の下層に存在 (hygropause)。この状況では水蒸気 (から解離した H) はあまり効率的には宇宙空間に逃げない。

特定の時期に限って、上空 100 km まで水蒸気が分布。
この特定の時期 = 大規模なダストストーム (砂嵐) の時期。
ダストの放射特性により高高度の気温が上昇し、大気循環の構造も普段とは大きく変化したことが原因。

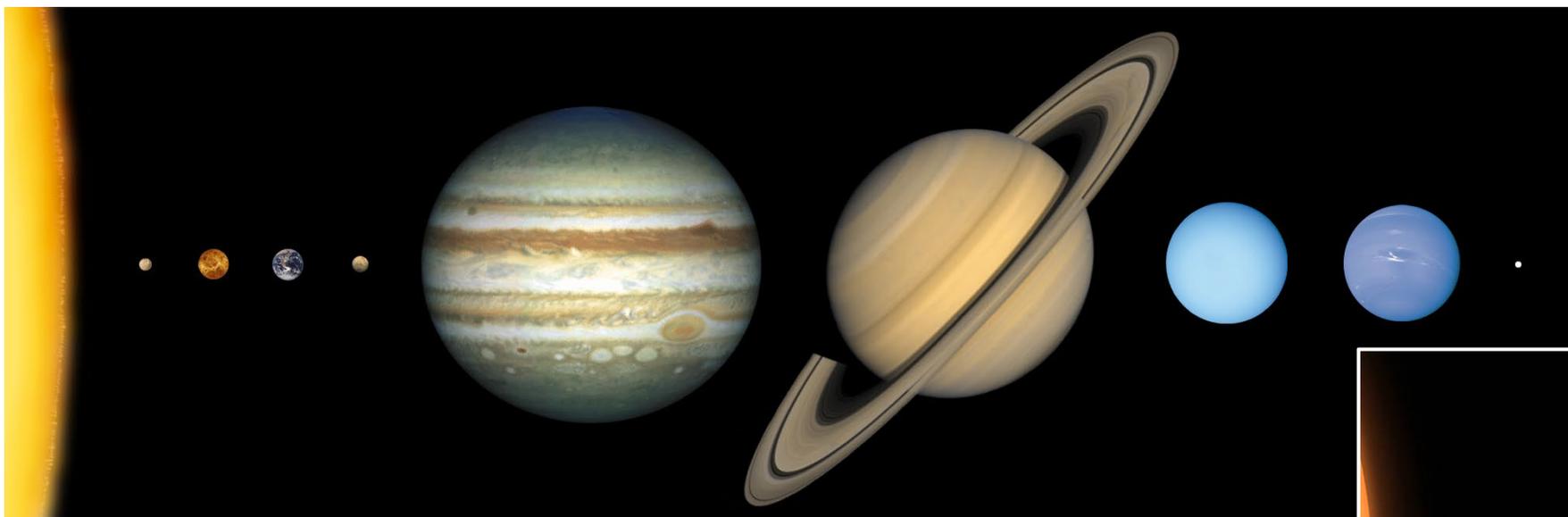
→ 現在の惑星大気を観測することで、惑星大気の進化にも制約を与えることが可能。

太陽系内の惑星大気を研究する意義

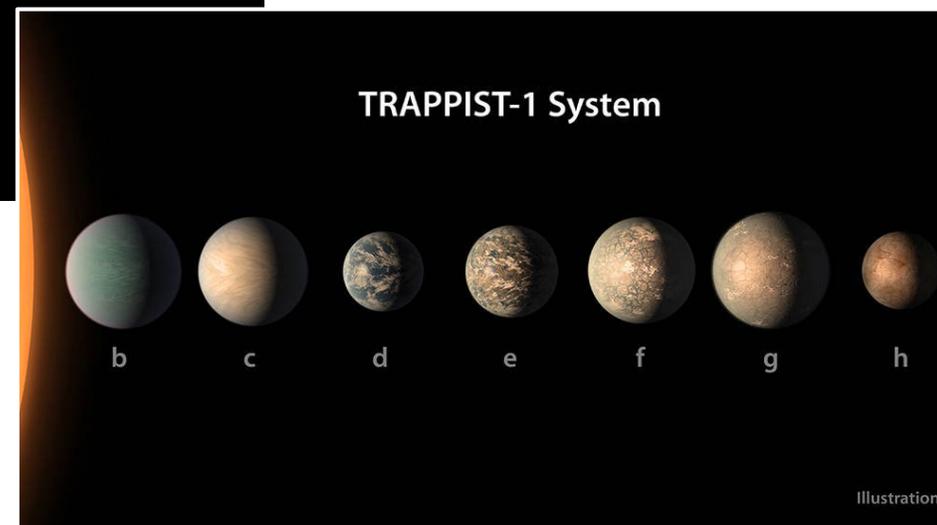
太陽系の天体 = (in-situ探査も含めて) 実証的な研究が可能な惑星の「リファレンス」

岩石惑星/ガス惑星/氷惑星//強磁場/弱磁場//希薄大気天体/昇華性大気//捕獲大気/二次大気//ヘイズ層/etc.

太陽系天体の詳細理解をリファレンスとして系外惑星(大気)の理解に演繹させたい。

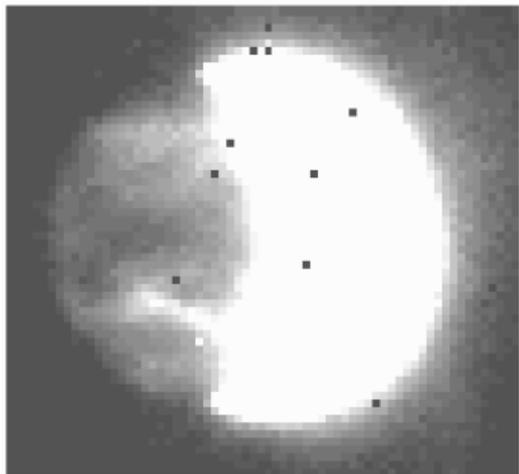


(credit: NASA/JPL)

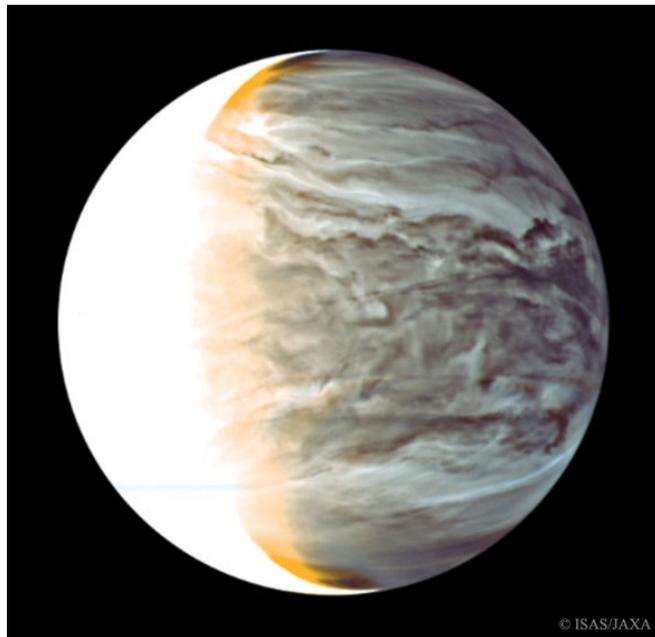


太陽系内の惑星大気を研究する意義面白さ

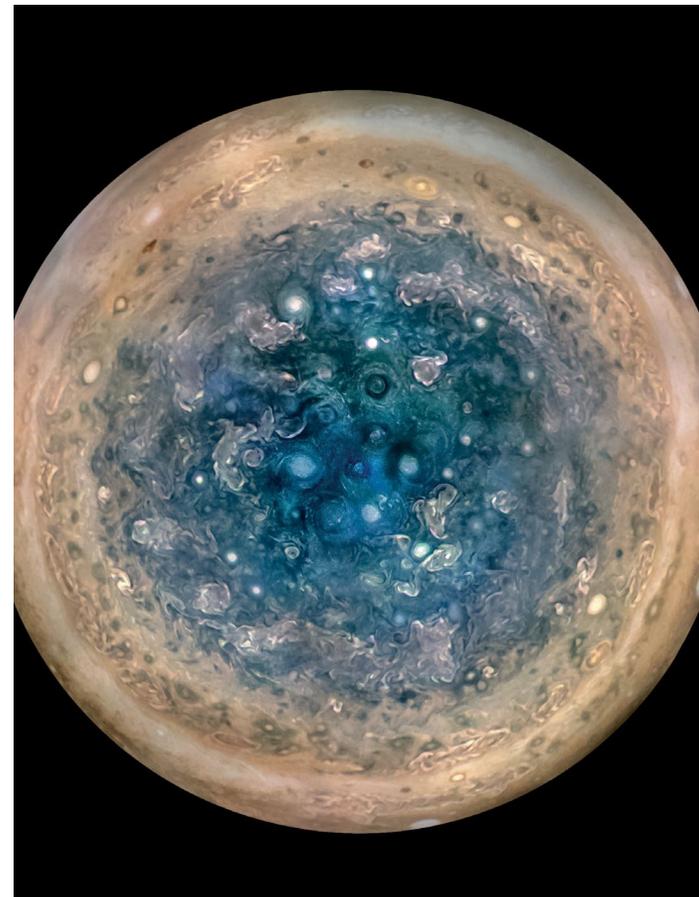
探査機による高解像度観測・(大型)地上望遠鏡・新規観測波長の開拓によるブレイクスルー
これを GREX-PLUS で!



金星夜面の雲の濃淡画像 (2 μm 帯)
2002年に岡山天体物理観測所 188 cm望遠鏡で取得 (佐川修論).



あかつきによる金星夜面画像
大気波動による渦模様や前線のような構造が見える。雲の微細構造の追跡も可能。(credit: ISAS/JAXA)

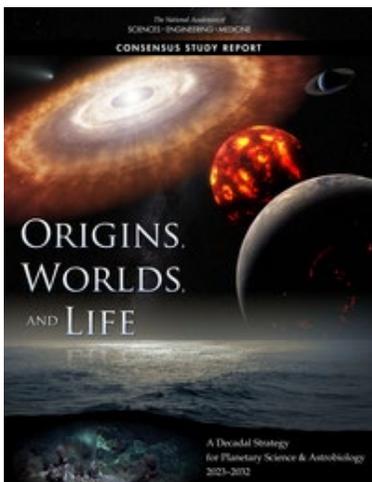


Junoによる木星の極域画像 (credit: NASA)
直径~数1000 kmの渦が多数存在。
(木星に限らず) 惑星大気の極域を地球から観測するのはほぼ不可能。

新しい中間赤外 (高分散) 分光観測に期待されるもの

1. 外惑星 (特に Ice Giant) の大気温度構造の高精度・高頻度観測.
2. タイタン大気化学の網羅的観測.
3. 太陽系天体における D/H の包括的観測. (注: 観測可能な波長域にも依存)

2030年代は天王星以遠の大型探査ミッションも現実に…

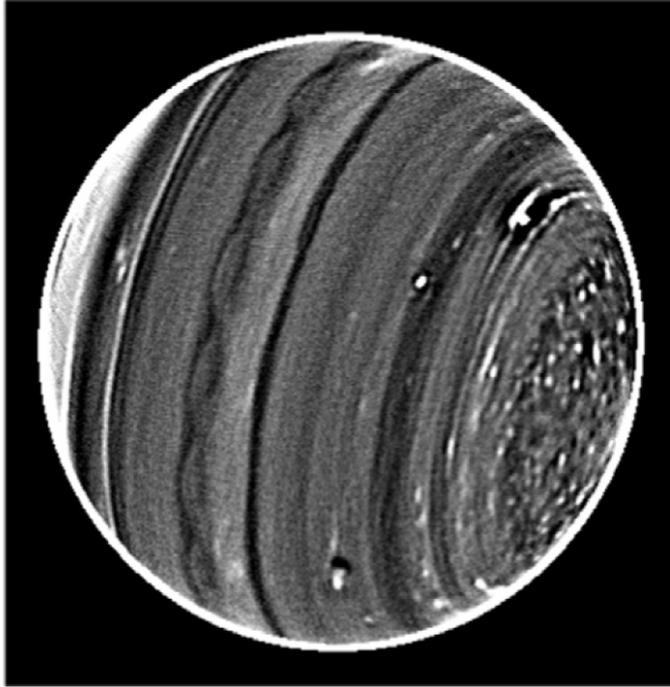


Planetary Science and Astrobiology Decadal Survey 2023 – 2032

NEW LARGE MISSIONS

The committee prioritizes the Uranus Orbiter and Probe (UOP) as the highest-priority new Flagship mission for initiation in the decade 2023-2032. UOP will deliver an in situ atmospheric probe and conduct a multi-year orbital tour that will transform our knowledge of ice giants in general and the Uranian system in particular. Uranus is one of the most intriguing bodies in the solar system. Its low internal energy, active atmospheric dynamics, and complex magnetic field all present major puzzles. A primordial giant impact may have produced the planet's extreme axial tilt and possibly its rings and satellites, although this is uncertain. Uranus's large ice-rock moons displayed surprising evidence of geological activity in limited Voyager 2 flyby data, and are potential ocean worlds. UOP science objectives address Uranus' (1) origin, interior, and atmosphere; (2) magnetosphere; and (3) satellites and rings. UOP will provide ground-truth relevant to the most abundant, similarly sized class of exoplanets. UOP can launch on an existing

Uranus atmosphere

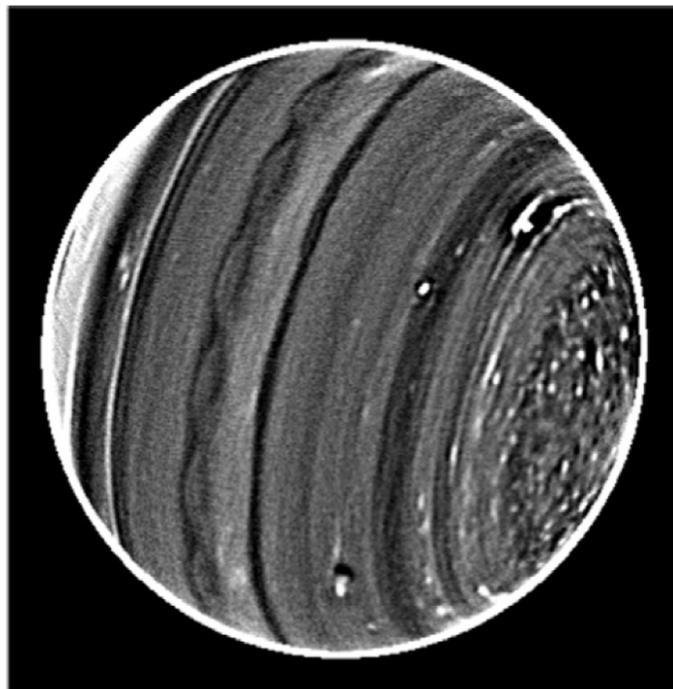


Keck望遠鏡(+AO)による近赤外画像
(ハイパス処理済み)。雲層の縞模様が見える。(Smorovsky et al., 2015)

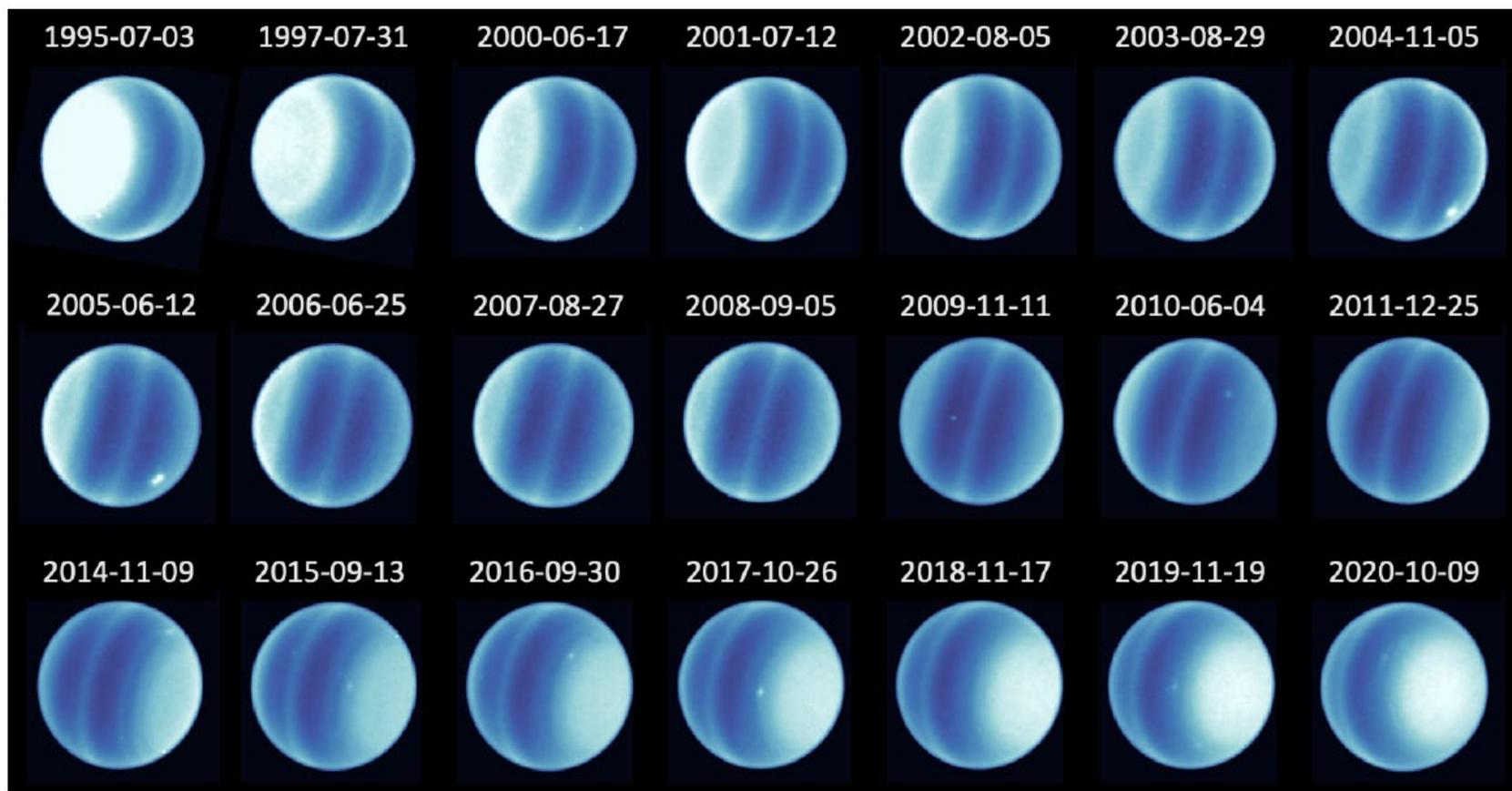
- 地球より大きく、木星より小さい惑星サイズ。そこまで速くない自転速度。
- 太陽から遥か遠方：対流圏界面の気温が ~ 50 K (CH_4 の凝結温度以下)。
- 横倒しの自転軸：極域上空には ~ 40 年間、太陽光が届かない/当たり続ける。
- 内部熱源が大気表層までは届いていない。遅い鉛直対流の存在。
- etc.

→ 天王星大気 = 惑星大気を理解を試す極めてユニークな観測対象

Uranus atmosphere



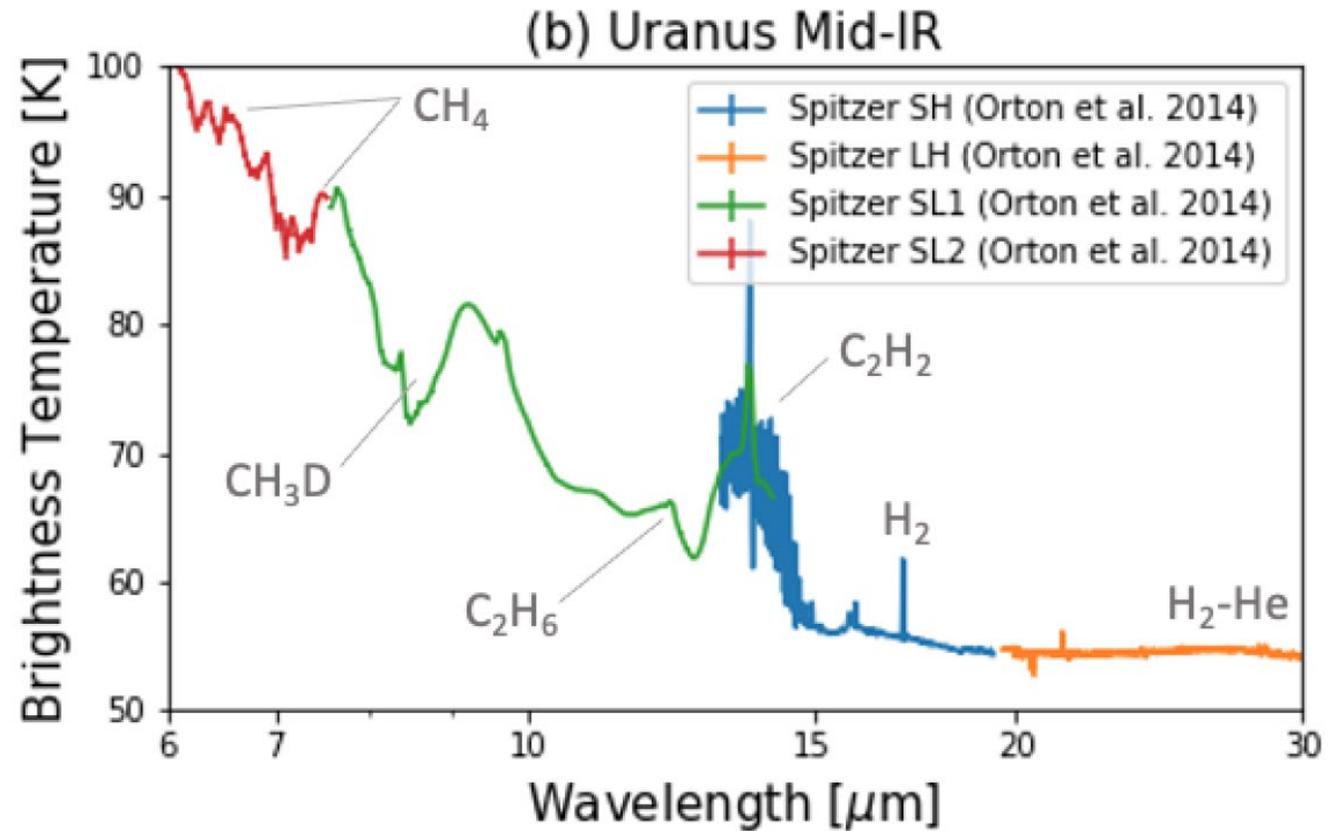
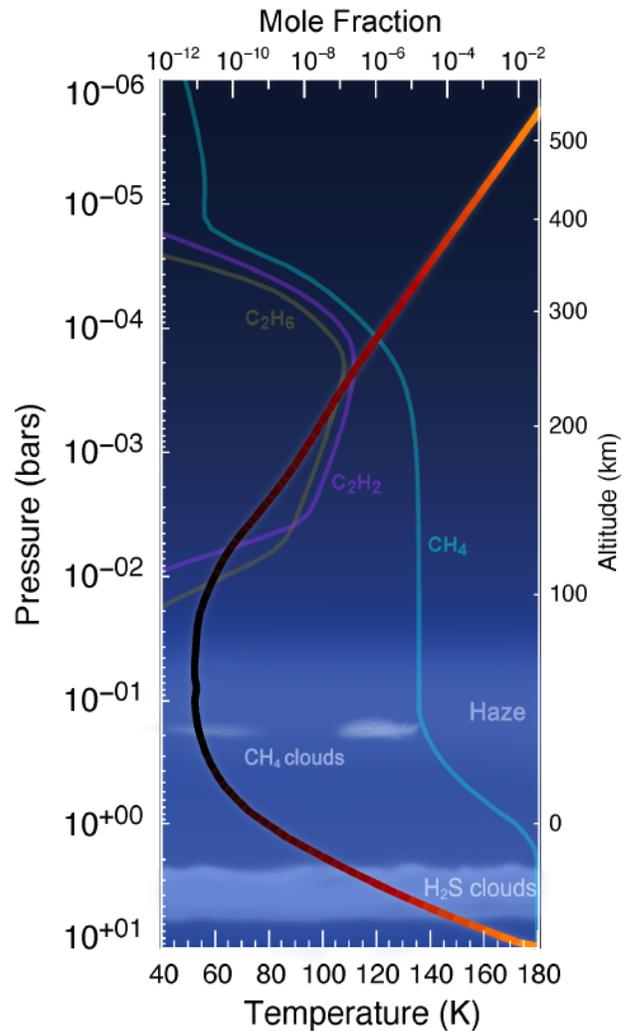
Keck望遠鏡(+AO)による近赤外画像
(ハイパス処理済み)。雲層の縞模様が見える。(Smorovsky et al., 2015)



HST/WFPC2, WFC3による可視画像(OPAL project, Fletcher 2021). 北半球の真冬~春分(2007)~春、高緯度~極域の明るい部分の成因は未だはっきりとはしていない(Toledo et al. 2018; Smorovsky et al. 2019; Fletcher et al. 2020).

(おそらく) **成層圏と対流圏を繋ぐ大気循環構造**の理解が重要な鍵に。

Uranus atmosphere



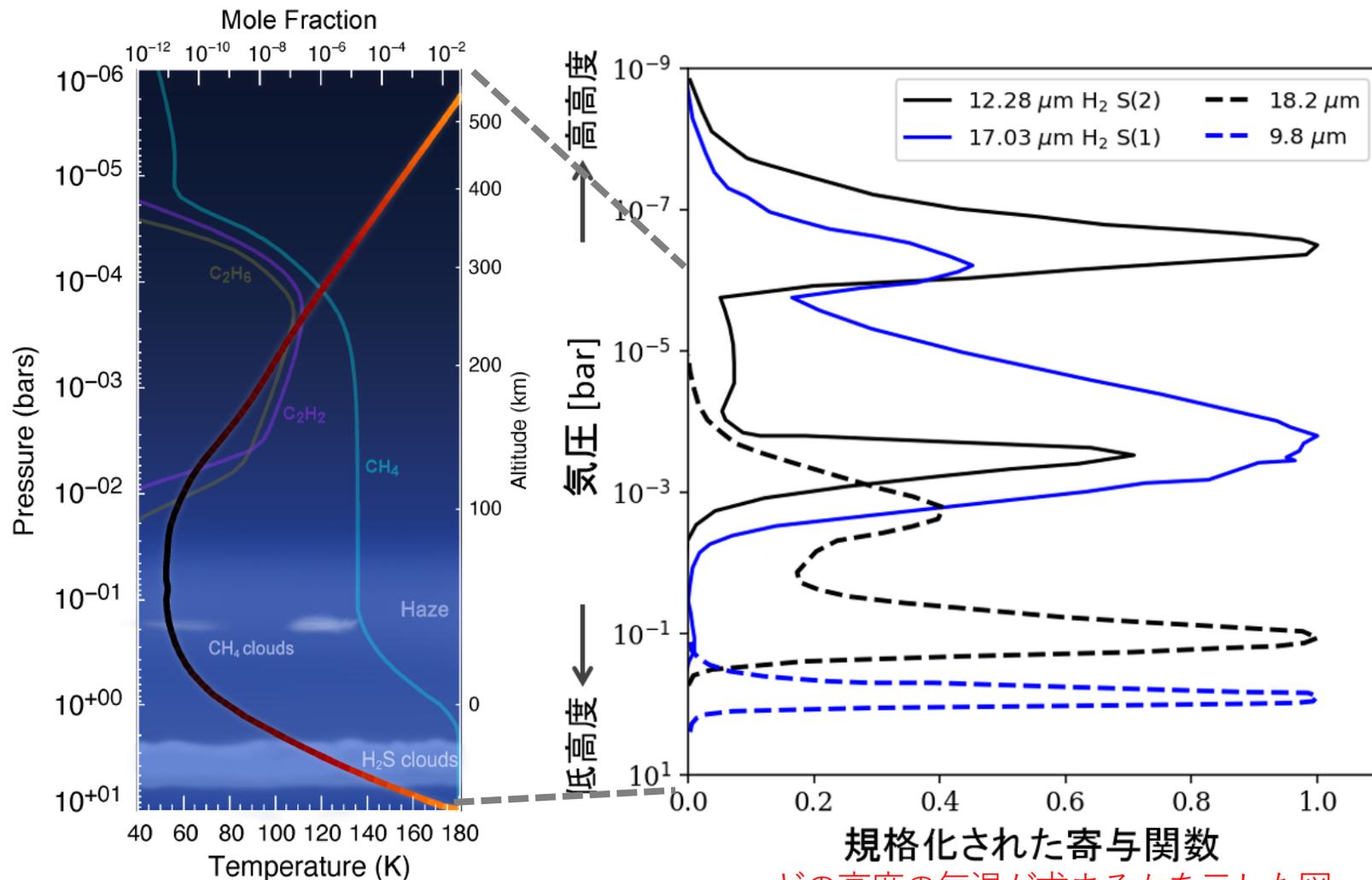
Spitzer望遠鏡による天王星大気の赤外スペクトル (Orton et al. 2014, after Fletcher 2021). H_2-He の連続吸収がブロードな構造を決め、成層圏のhydrocarbonなどのラインが存在。 H_2 の四重極モーメントによるラインも観測可能。

「温度計」として利用可能

Uranus atmosphere

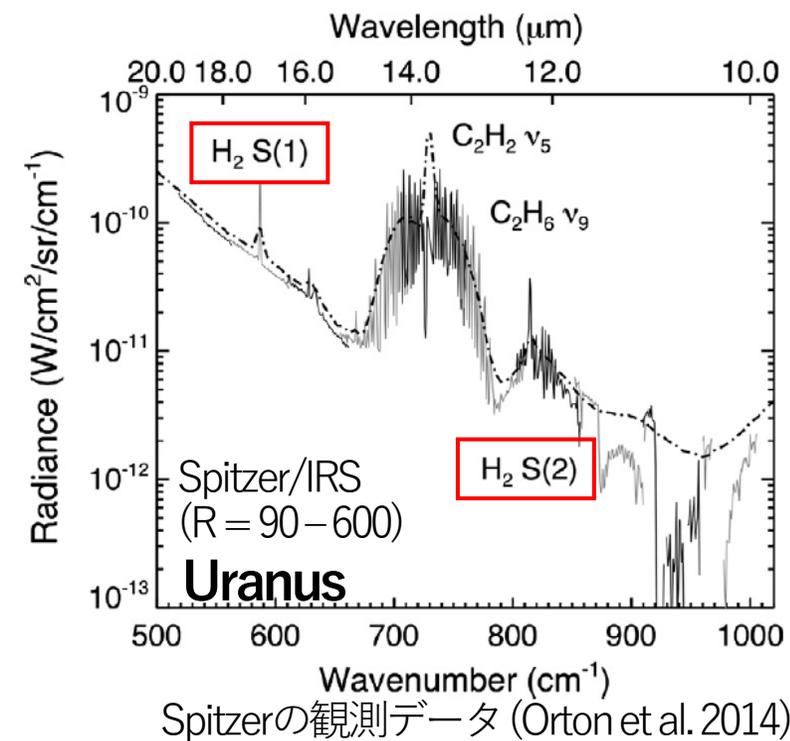
H₂の連続吸収も四重極放射によるラインも、いずれも気温(の鉛直構造)の関数

→ 中間赤外スペクトルから気温構造を推定可能. ※ 気温構造：大気を理解する上での最重要物理量

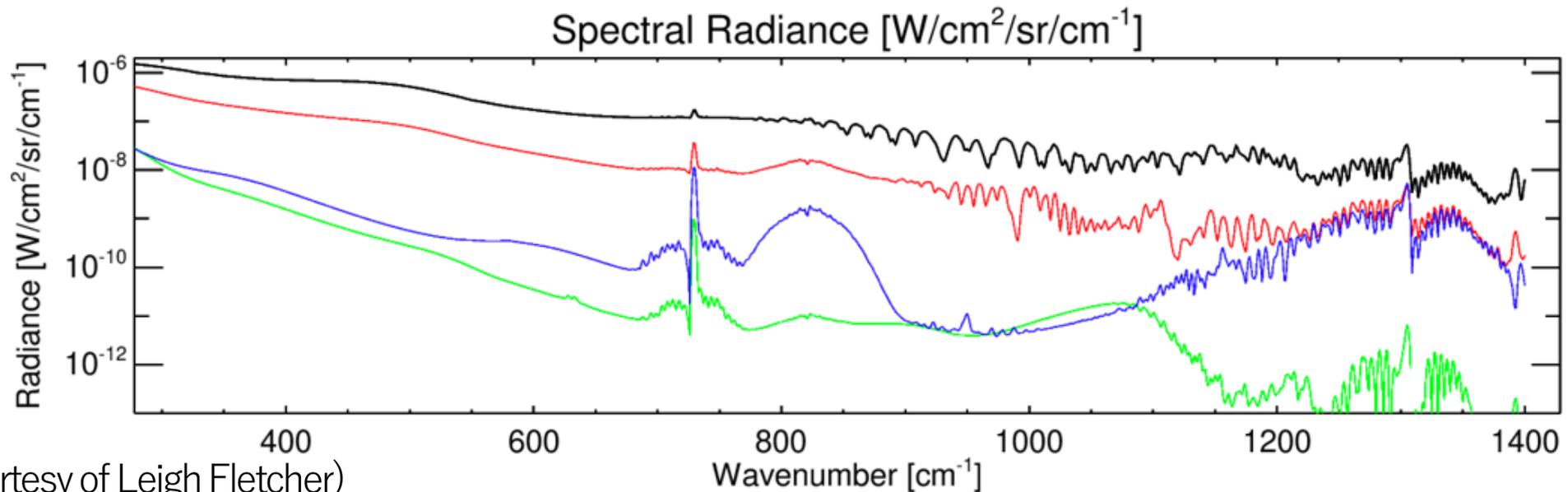
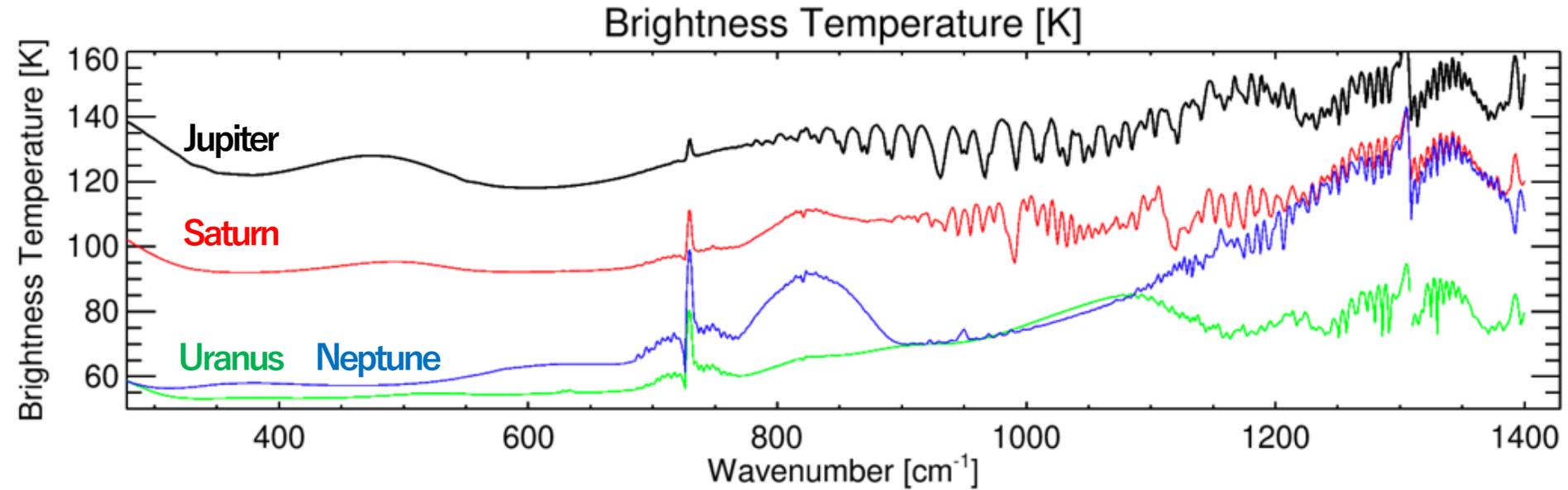


どの高度の気温が求まるかを示した図

連続吸収帯 → より低高度 (対流圏)
四重極放射のライン → より高高度 (成層圏) に感度を持つ。



GREX-PLUSで外惑星大気の大気温度を高精度導出が可能に

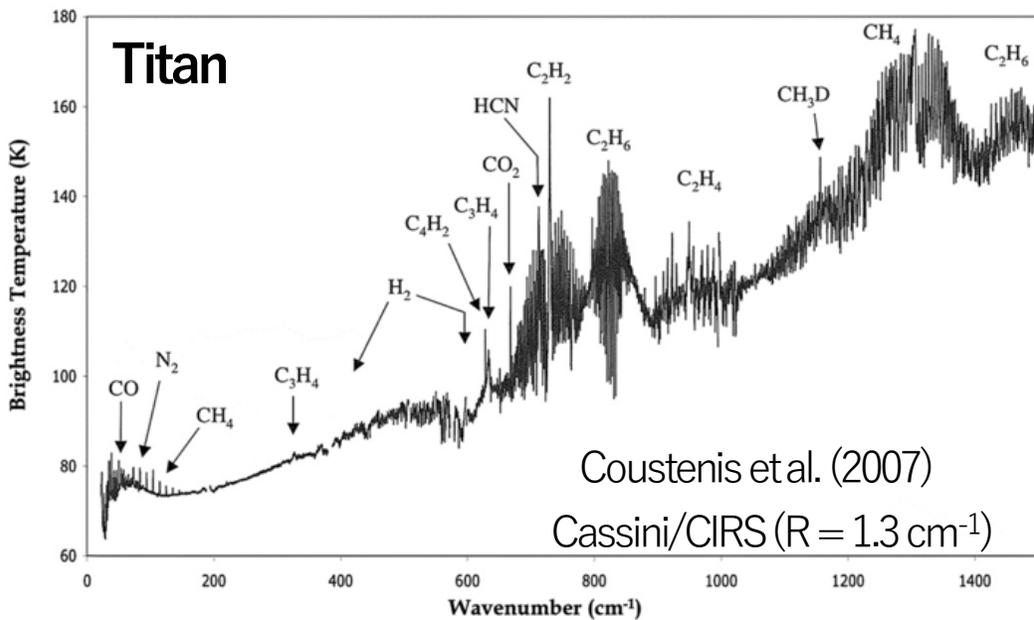


(Courtesy of Leigh Fletcher)

タイタン大気化学：普遍的な惑星大気化学の理解に向けて

タイタン大気 = hydrocarbon, nitrile + haze の複雑な大気化学

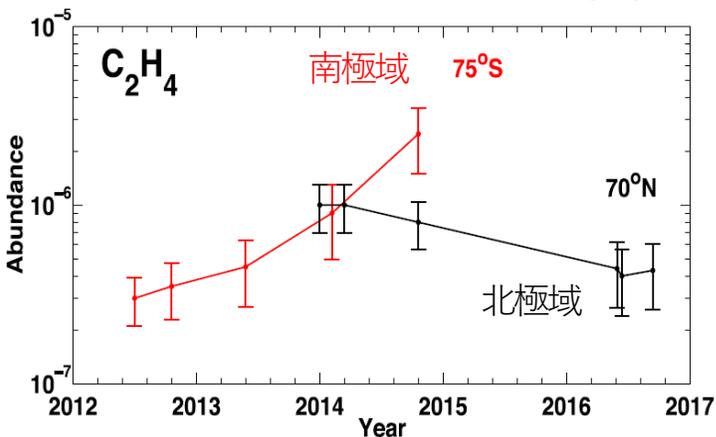
(地球大気では再現できない天然の化学実験室)



N₂ & CH₄ の還元的大気

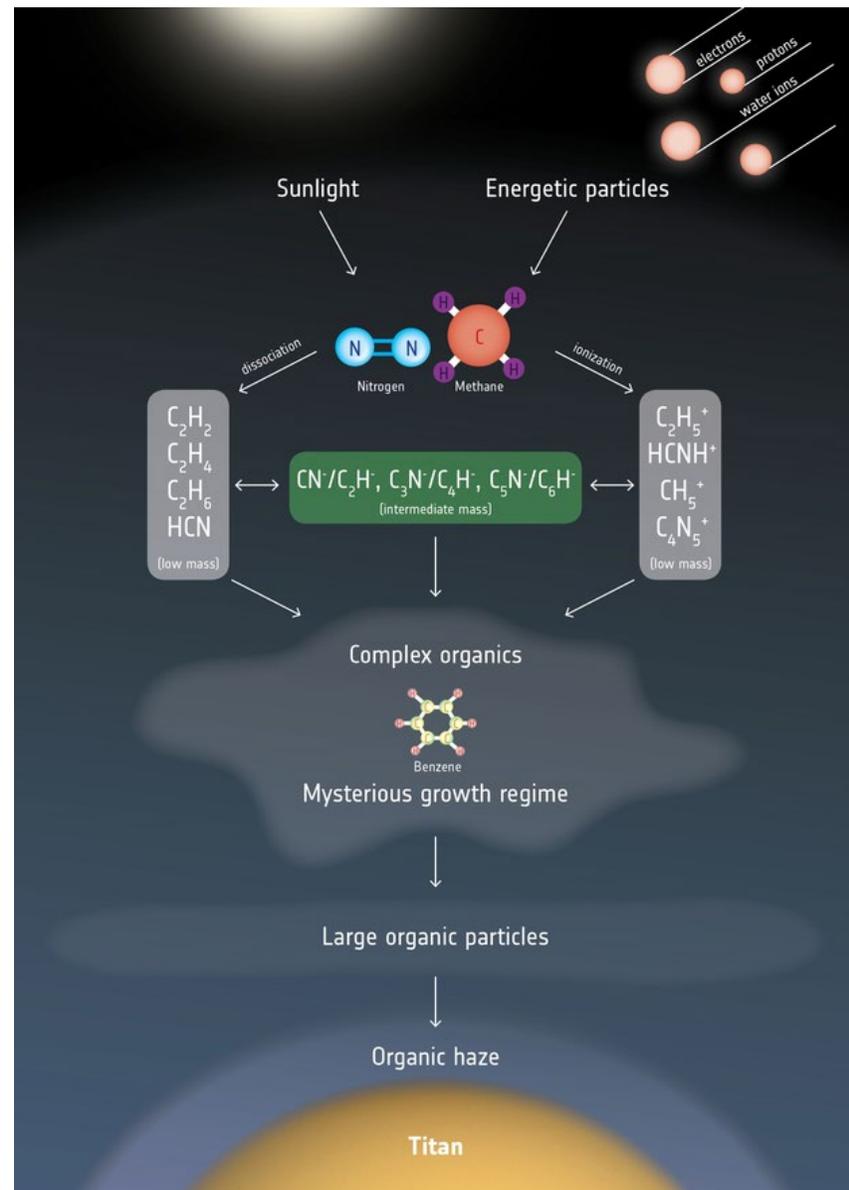
→ UV や 電子・高エネルギー粒子の降り込みにより有機化学反応が駆動。

原始地球大気と類似？



これらの微量成分の分布には大きな季節変動が存在。

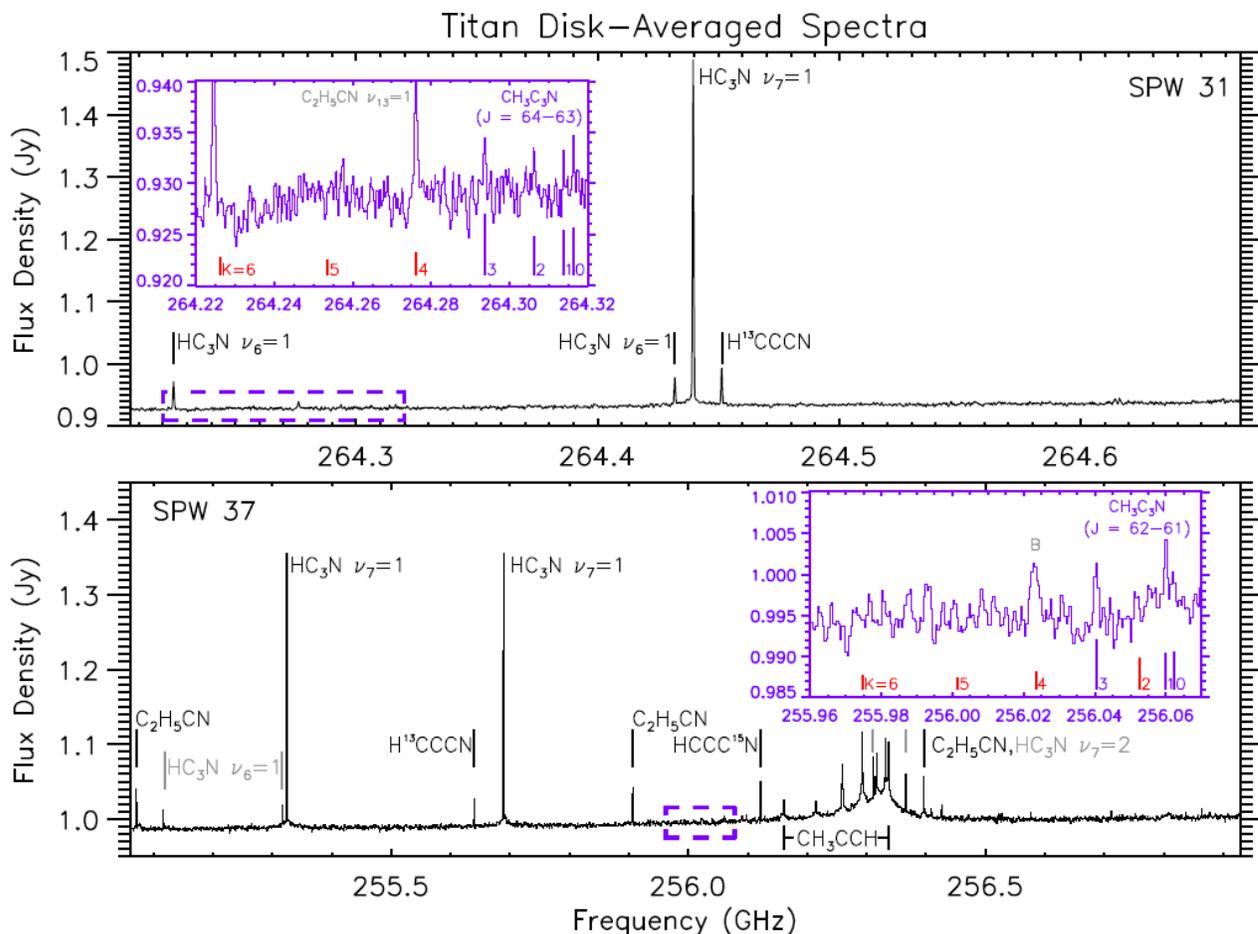
→ 大気化学・大気力学のトレーサーに。
Coustenis et al. (2018)



タイタン大気化学：普遍的な惑星大気化学の理解に向けて

ALMAによる様々な大気分子(有機分子)の新発見

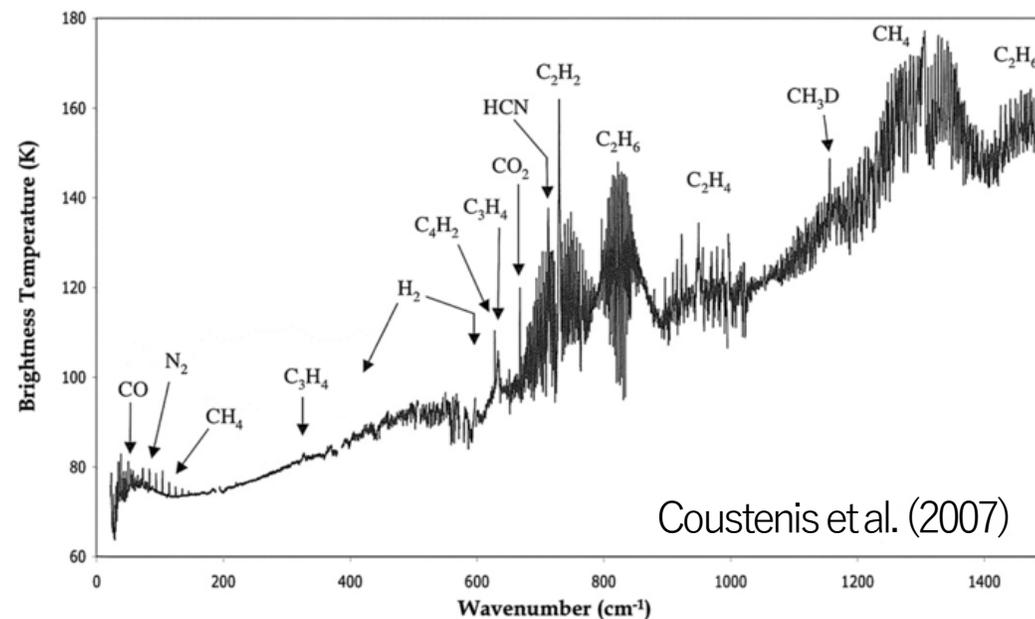
(e.g., C₂H₅CN Cordiner+ 2015; C₂H₃CN Palmer+ 2017; c-C₃H₂ Nixon+ 2020; CH₃C₃N Thelen+ 2020 などなど)



(Thelen et al. 2020)

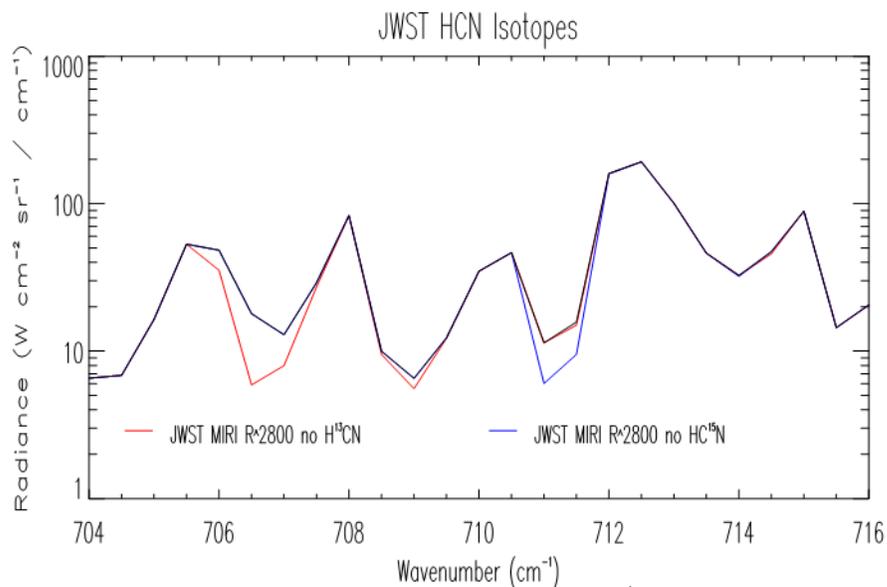
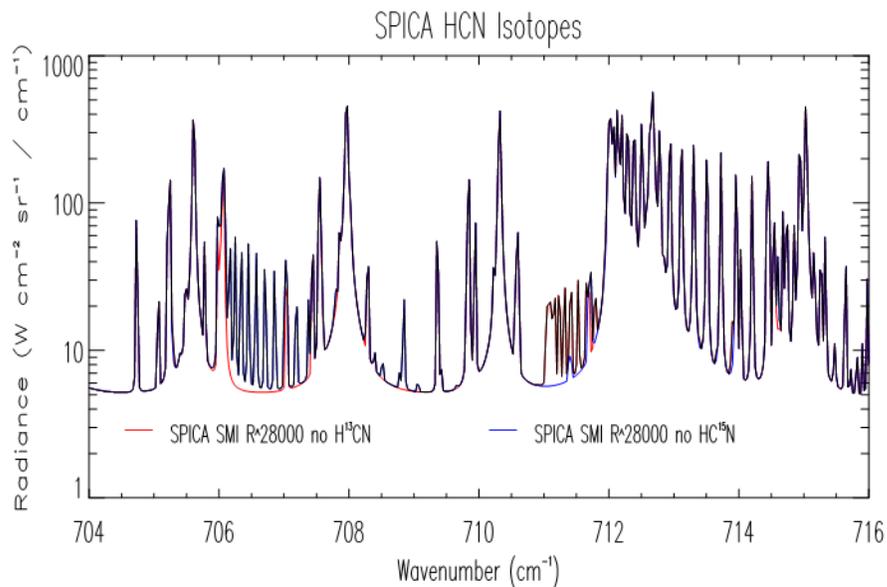
中間赤外でしか観測できない分子を併せて
押さえることで、タイタン大気化学の詳細
理解が可能に。

Post-Cassini時代の季節変化の観測が重要。



Coustenis et al. (2007)

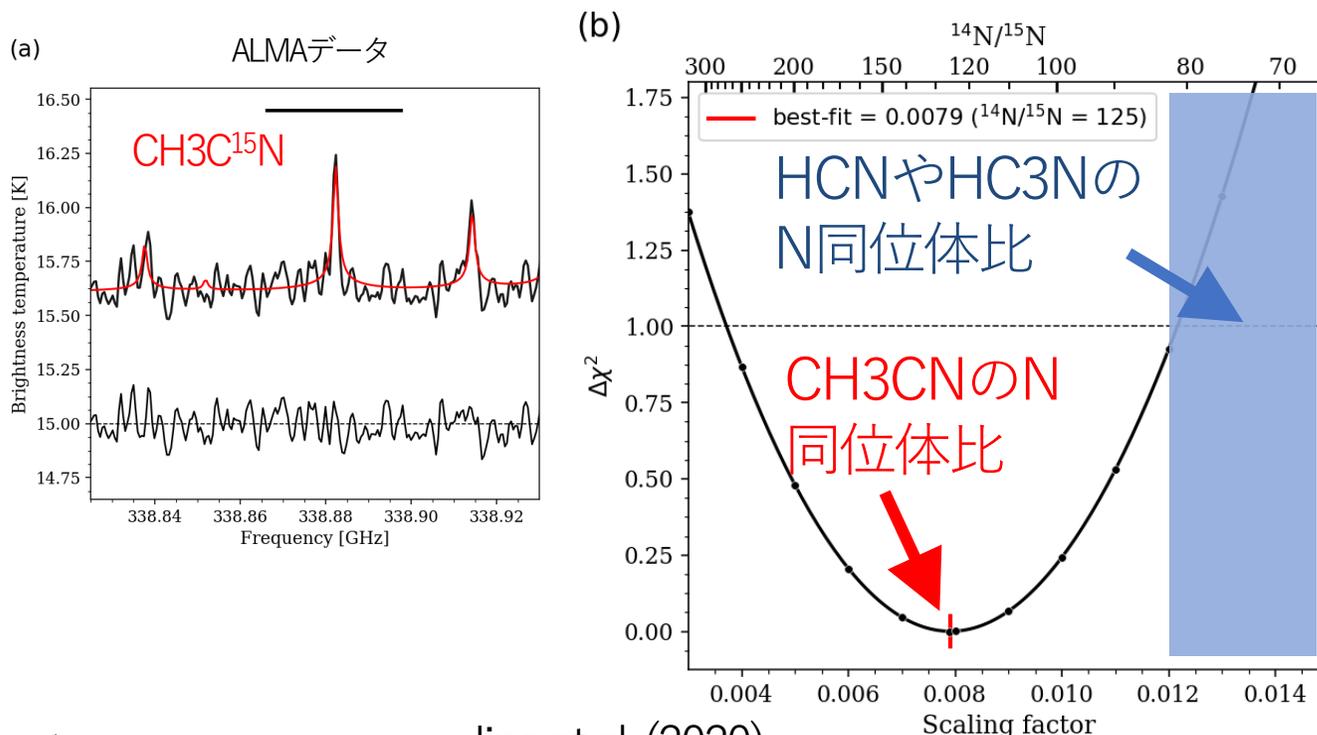
タイタン大気化学：普遍的な惑星大気化学の理解に向けて



(Courtesy of Leigh Fletcher)

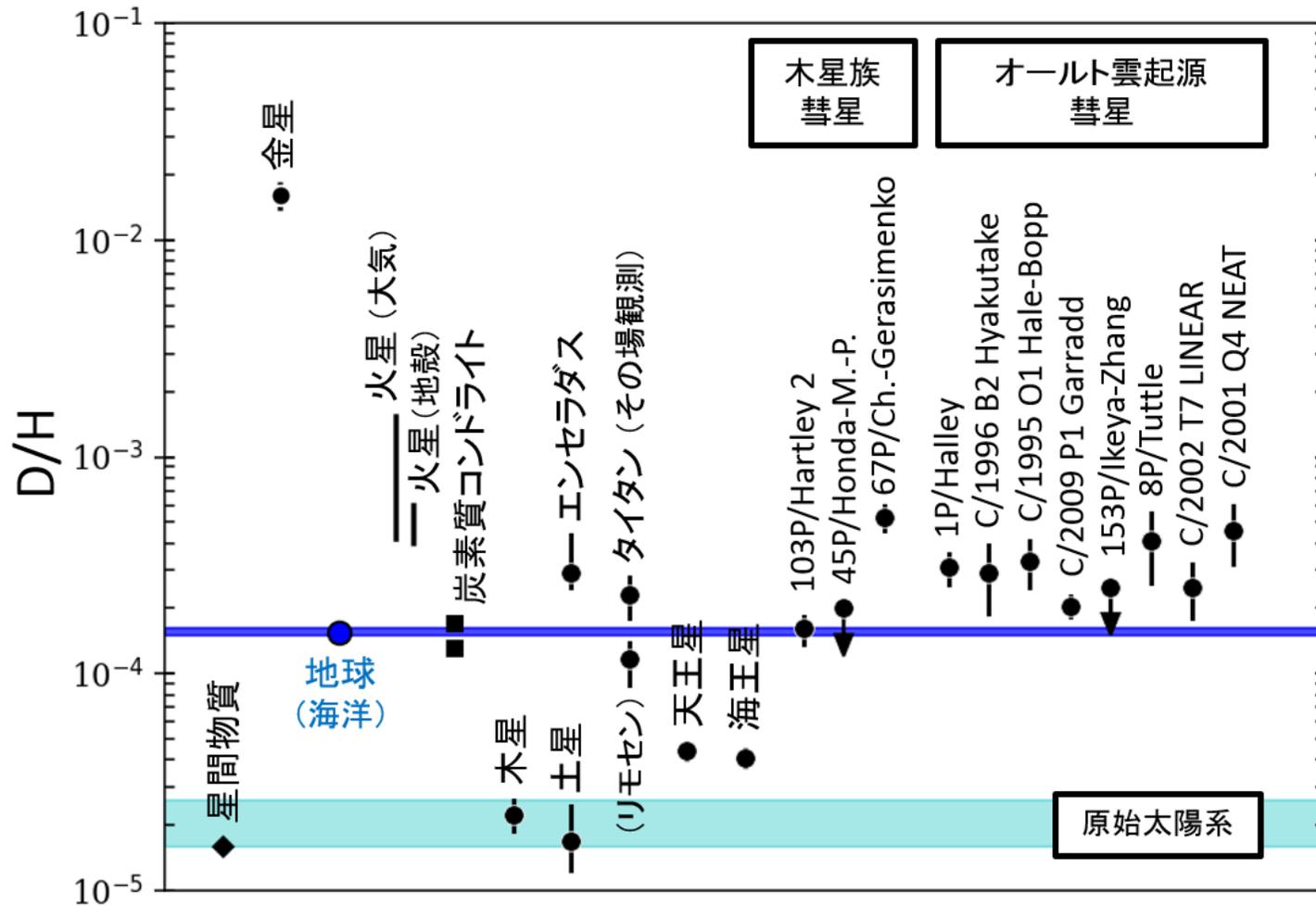
高分散分光で、微量な同位体のラインの分離が可能。
(JWST/MIRI との差別化)

※ 各分子における同位体比分別：化学反応経路を
制約するトレーサーに (e.g., lino et al. 2020).



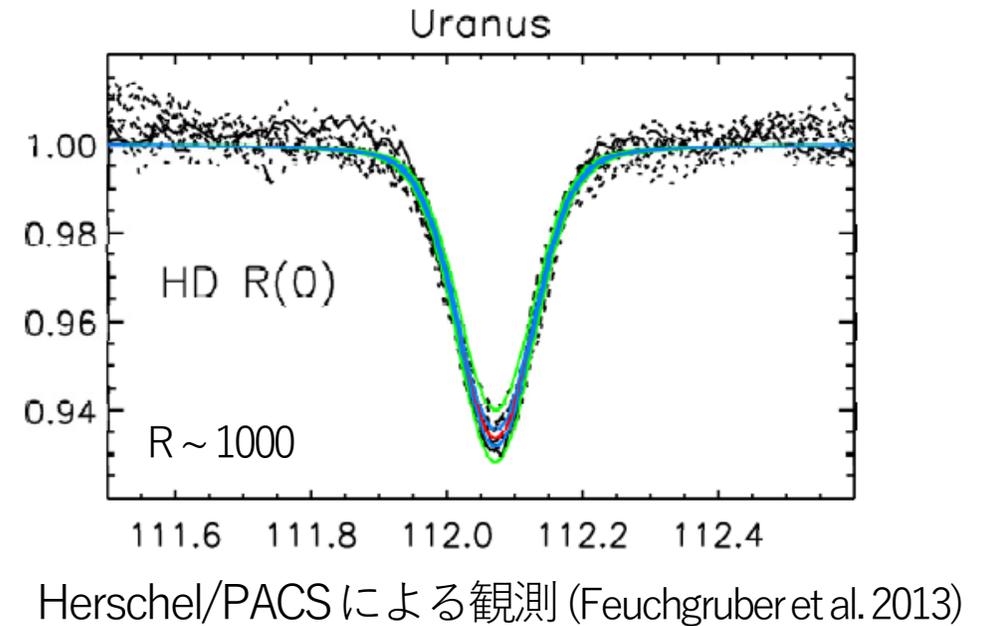
lino et al. (2020)

太陽系天体の D/H の包括的理解



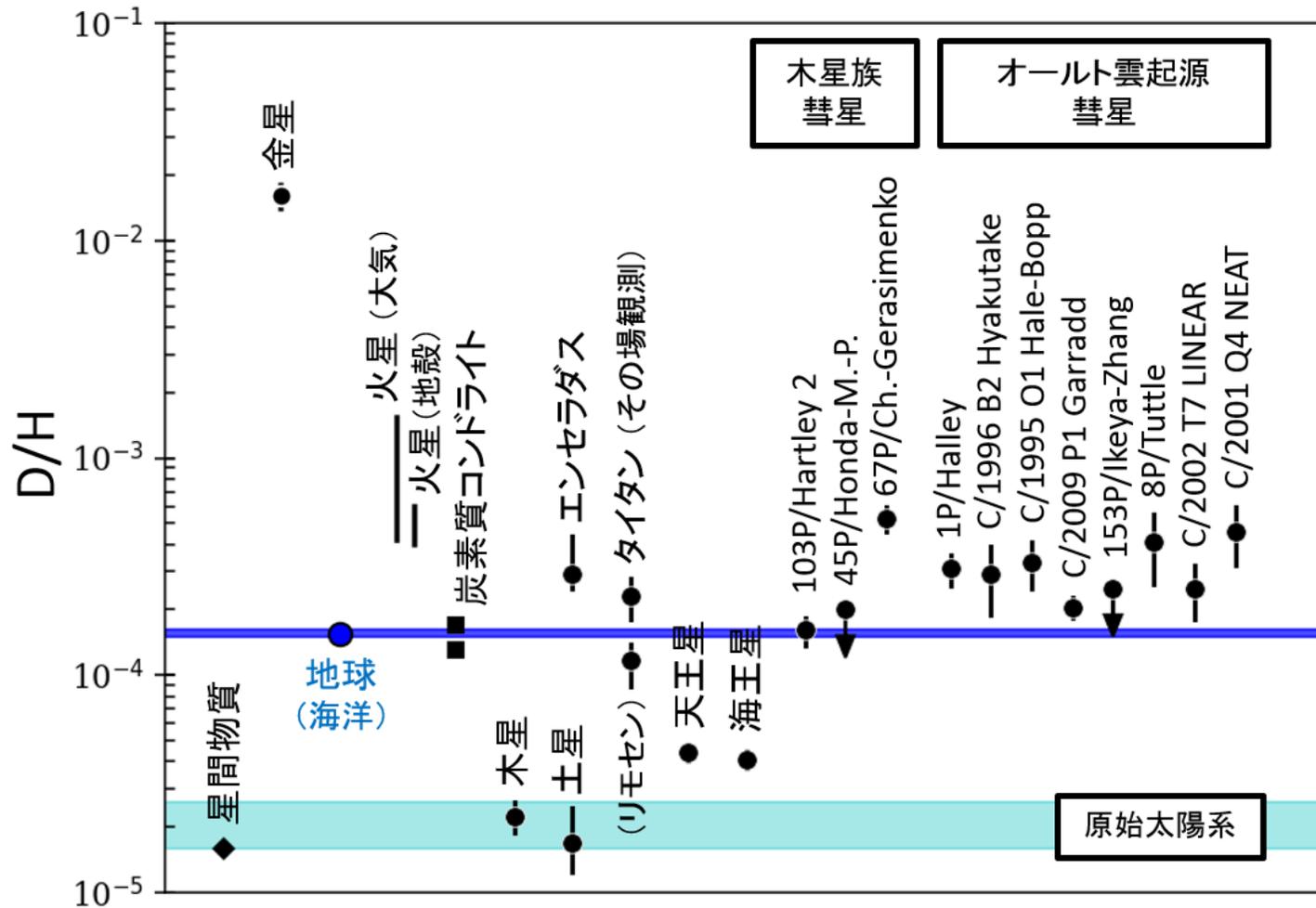
これまでの観測で得られている太陽系内部の D/H 分布
(地球の水の起源を制約する文脈でよく登場)

外惑星大気の D/H は、値の代表性 (特に時間的な) に常に疑問が付く。今後の複数観測が必要。



Herschel/PACS による観測 (Feuchgruber et al. 2013)

太陽系天体の D/H の包括的理解



これまでの観測で得られている太陽系内部のD/H分布
(地球の水の起源を制約する文脈でよく登場)

外惑星大気のD/Hは、値の代表性(特に時間的な)に常に疑問が付く。今後の複数観測が必要。

※ 観測に適したHDのラインは現状の観測波長域 $10-18 \mu\text{m}$ には**存在せず**。

HD R(3)が $28.5 \mu\text{m}$ に存在。それよりも短波長側のHDラインはS/N的に困難。

もう少し短波長側に延びれば、CH₃D $8.6 \mu\text{m}$ が受かるが。。

まとめ

1. 外惑星 (特に Ice Giant) の大気温度構造の高精度・高頻度観測.
2. タイタン大気化学の網羅的観測.
3. 太陽系天体における D/H の包括的観測. (注: 観測可能な波長域にも依存)

観測性能へのリクエストを自由に述べると。。。

- 「分光」観測は惑星大気科学にとって非常に強力な武器。中間赤外は未だ宝の山。
撮像・測光は空間分解能力が伴ってこそだが、分光は空間分解能が多少劣っていても多くの成果が出せる。
- 分光をするのであれば、**高分散 ($R > \sim 10,000$) の方が嬉しい。** 但し、感度や観測可能波長域との兼ね合いも。
- 観測波長 10–18 μm で満足か？ 興味としては 9.6 μm 帯の O₃ や 7–8 μm の CH₄ (CH₃D も) が有るが。。。
- 明るすぎる問題, 移動天体追尾, 観測時期のフレキシビリティ, 定期的な繰り返し観測 (季節変動モニター) など, **惑星サイエンス特有の問題やニーズ**を考慮可能であれば嬉しい。