

金星大気微量成分の観測

近年の観測成果と今後の展開

佐川英夫 (京都産業大学)
sagawa@cc.kyoto-su.ac.jp

今日の内容

- 大気微量成分の観測から惑星大気の何が分かるのか.
- 金星大気における微量成分観測の問題意識.
- 話題 1 : Encrenaz et al. による赤外分光観測
- 話題 2 : 電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測
- 話題 3 : Greaves et al. (2020) について
- まとめに代えて : 微量成分観測の今後の展望.

本発表は 海外研究者との共同研究内容や、佐藤隆雄さん（北海道情報大）や神山徹さん（産総研）などを始めとする方々と議論をしている将来展望の話題を含みます.

大気微量成分の観測から惑星大気の何が分かるのか

大気微量成分 trace gas の存在量・空間分布・時間変動を知ることで、

大気微量成分の観測から惑星大気の何が分かるのか

大気微量成分 trace gas の存在量・空間分布・時間変動を知ることで、

大気化学の理解

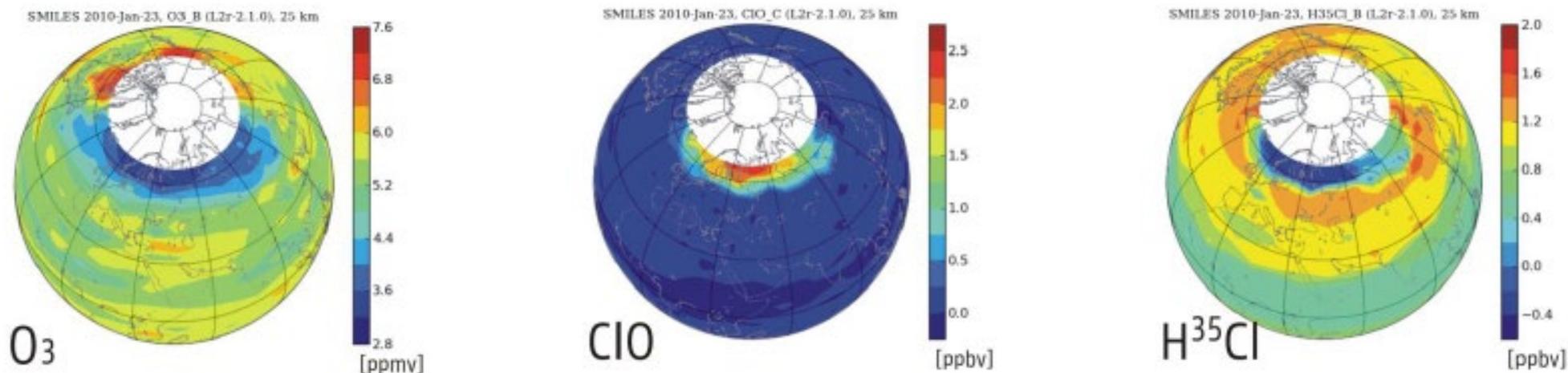
- ・ 物質の化学的な生成と消滅，光化学による雲・エアロゾル形成

大気微量成分の観測から惑星大気の何が分かるのか

大気微量成分 trace gas の存在量・空間分布・時間変動を知ること

大気化学の理解

- 物質の化学的な生成と消滅，光化学による雲・エアロゾル形成



地球成層圏観測ミッションSMILES (e.g., Kikuchi et al., 2010) の観測データの一例。

北極周辺での成層圏オゾンの減少とオゾン破壊物質の一つである一酸化塩素ClOの濃集が対応している。

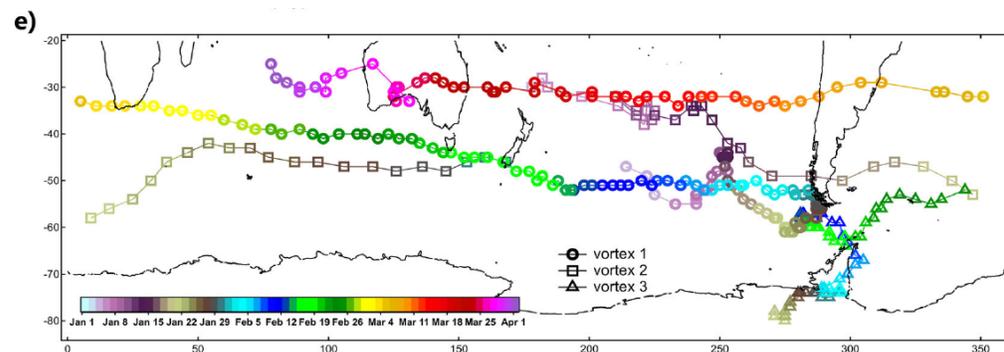
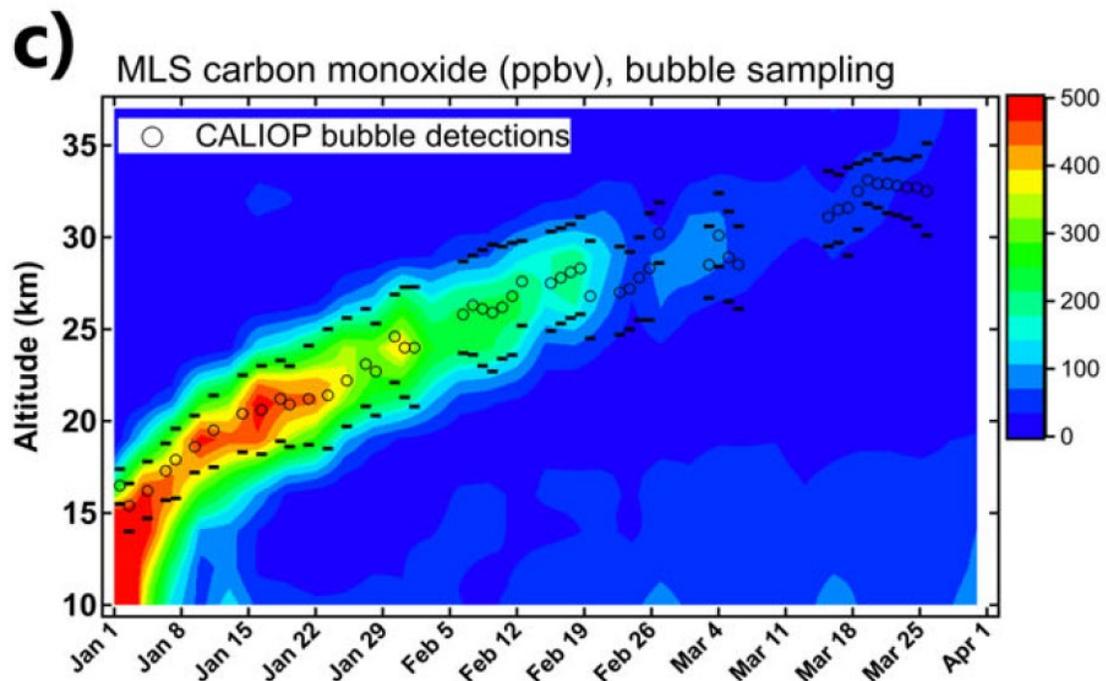
また、大気中の塩素の全体的なリザーバーである塩化水素HClからClOに塩素が移動している様子も分かる。

大気微量成分の観測から惑星大気の何が分かるのか

大気微量成分 trace gas の存在量・空間分布・時間変動を知ることで、

大気化学の理解

化学的に安定な物質は**大気循環で輸送**される



2019/2020のオーストラリアにおける巨大火事によって発生した煙が成層圏まで輸送されていく様子 (Khaykin et al., 2020)

水蒸気でも同様の様子が観測されており、中規模火山噴火と同等の放射強制を及ぼした。

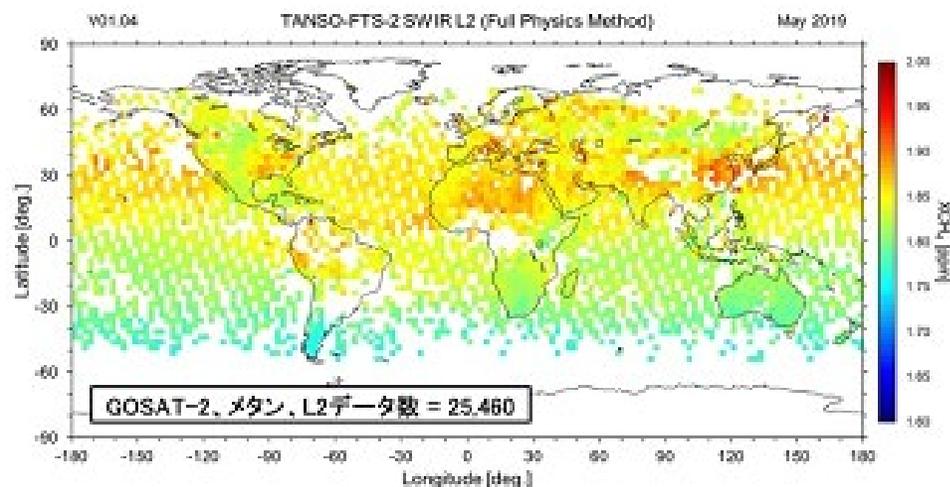
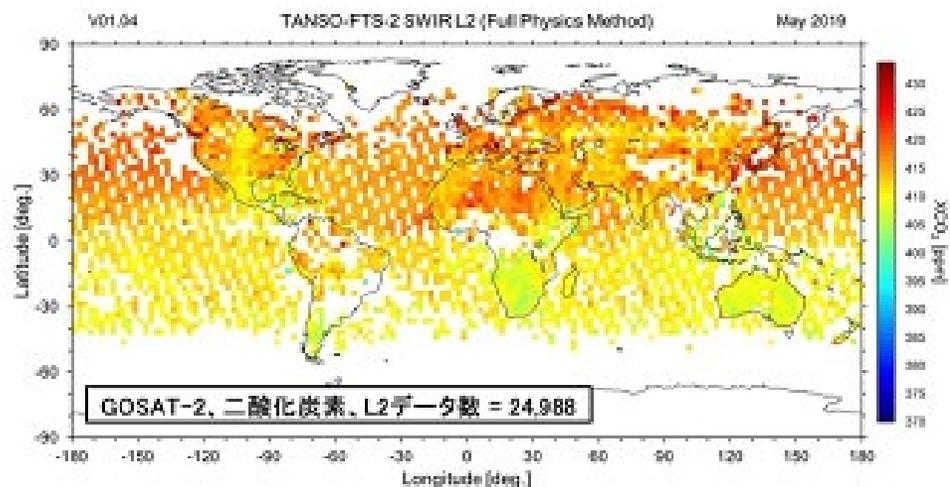
大気微量成分の観測から惑星大気の何が分かるのか

大気微量成分 trace gas の存在量・空間分布・時間変動を知ること

大気化学の理解

化学的に安定な物質は大気循環で輸送される

大気中の分子は赤外線に対して不透明 – **温室効果/放射冷却**



GOSAT-2による温室効果ガスのモニタリング (環境研プレスリリース, 2020)

大気微量成分の観測から惑星大気の何が分かるのか

大気微量成分 trace gas の存在量・空間分布・時間変動を知ること

大気化学の理解

- ・ 光化学, 熱力学平衡化学, 雲・エアロゾル, 同位体比分別 など

化学的に安定な物質は大気循環で輸送される

- ・ **大気力学**, 物質輸送, 大気散逸 など

大気中の分子は赤外線に対して不透明 – 温室効果/放射冷却

- ・ **大気放射** (気温場), 温室効果, 放射バランス など

これら各テーマの相互作用を理解していくことが重要 (と個人的には考えています)

金星大気科学に当てはめてみると

大気微量成分 trace gas の存在量・空間分布・時間変動を知ること
大気化学の理解

- ・光化学, 熱力学平衡化学, 雲・エアロゾル, 同位体比分別 など (次スライドに)

化学的に安定な物質は大気循環で輸送される

- ・CO をトレーサーとした雲層下部の大気循環の可視化 (e.g., Cotton et al., 2012)
- ・O₂大気光の発光分布による上層大気循環の可視化 (e.g., Gorinov et al., 2017)

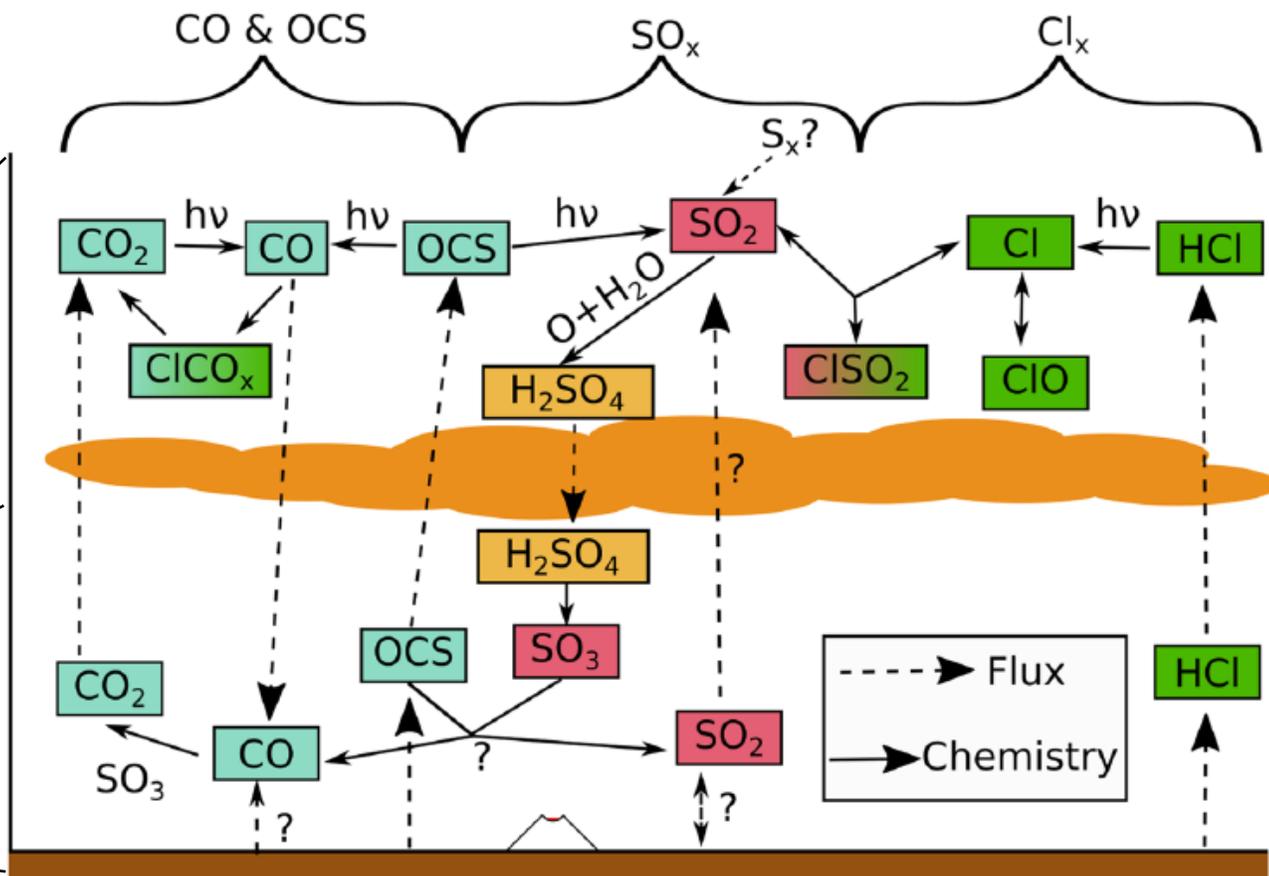
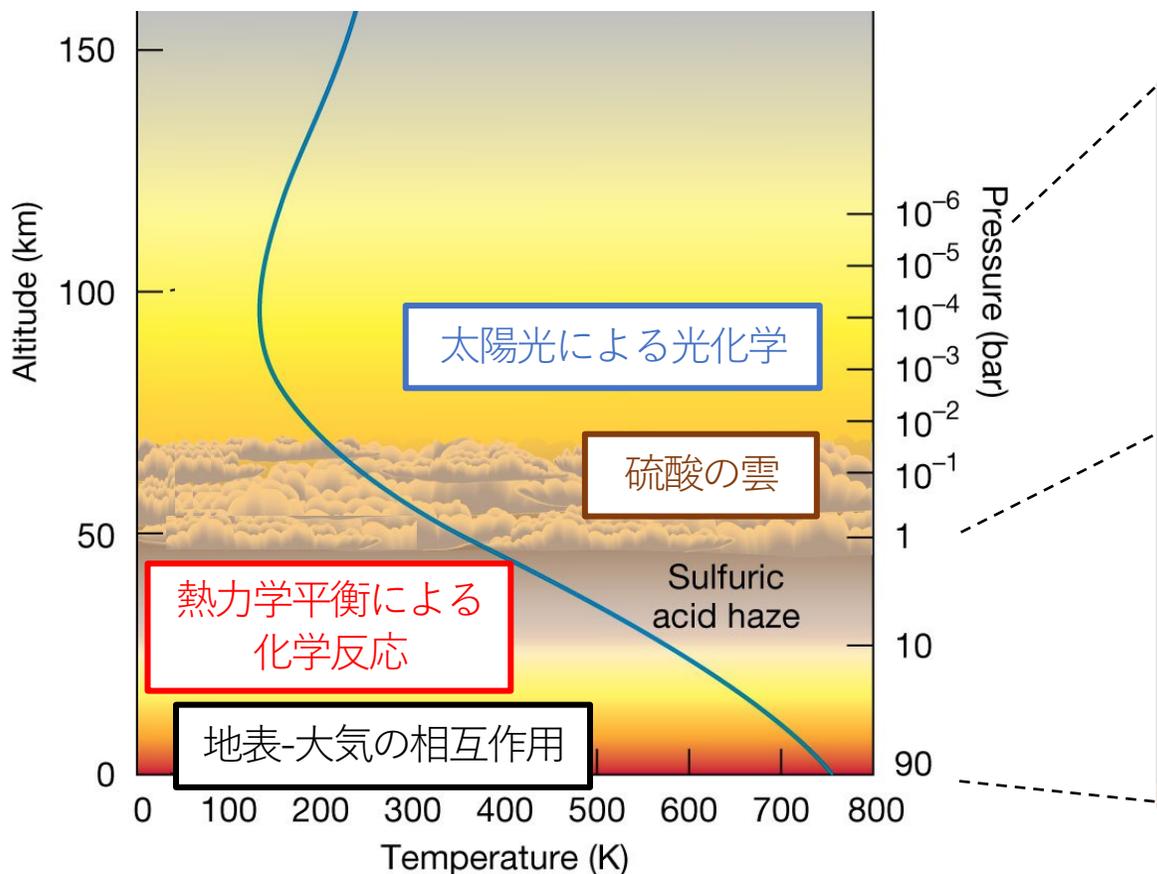
大気中の分子は赤外線に対して不透明 – 温室効果/放射冷却

- ・温室効果ガスによる放射強制力 (数値実験 - Lee et al., 2016)

金星大気化学

地球の大気化学とは異なる化学反応系（火星とも異なる）。

金星大気化学モデル（観測的には不明の部分が多い）



Bierson & Zhang (2020)

金星大気化学

地球の大気化学とは異なる化学反応系（火星とも異なる）。

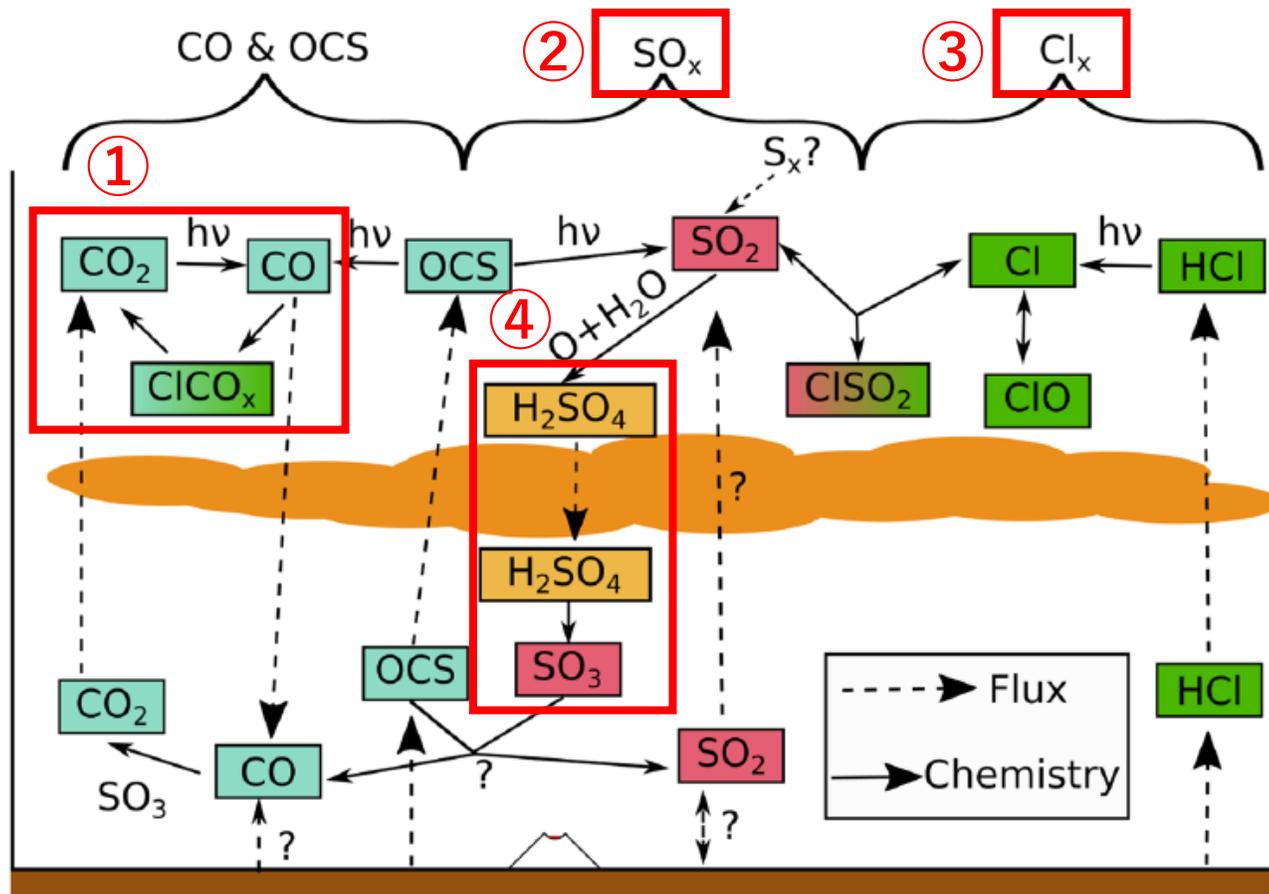
① CO₂ 安定問題

CO₂は光解離によりCOとOに分離するが、COとOの直接的な再結合の反応は遅い (Nair et al., 1994; Mills, 1998)。

他の複雑な**触媒反応**を経て、正味としてCO + O → CO₂という還元反応となる（はず）。

CICO_x系の分子が触媒候補（観測例は無し）。

※ 火星にも共通する問題（火星はHO_xが触媒？）

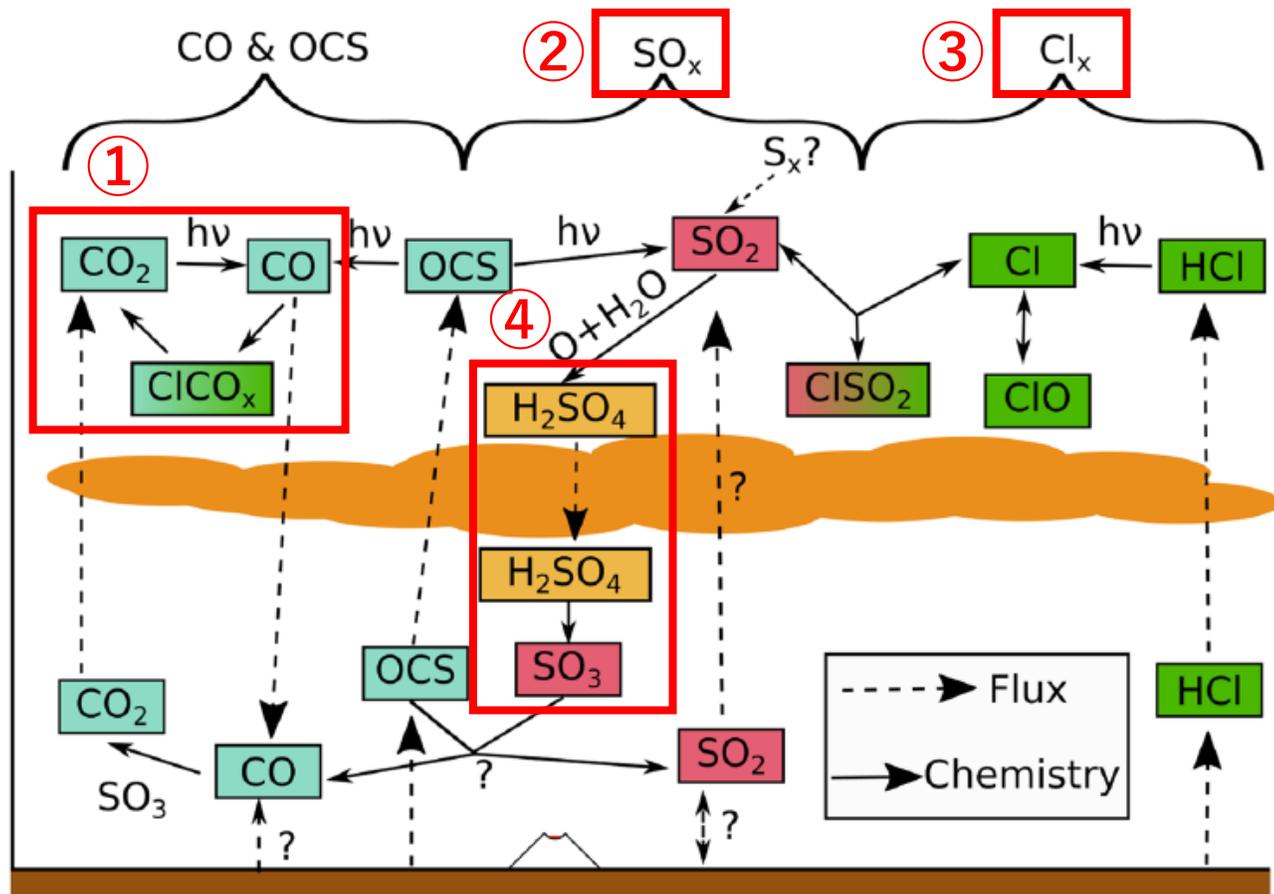
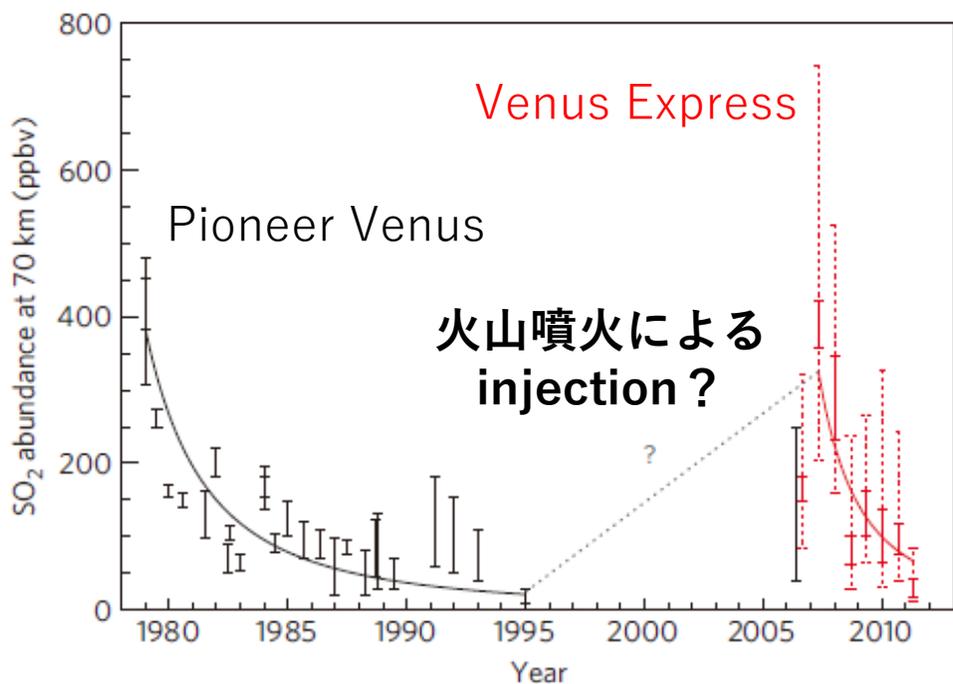


金星大気化学

地球の大気化学とは異なる化学反応系（火星とも異なる）。

② SO₂ 時間・空間変動・鉛直分布

雲頂（高度 70 km）でのSO₂存在量に大きな時間変化 (e.g., Marcq et al., 2012)

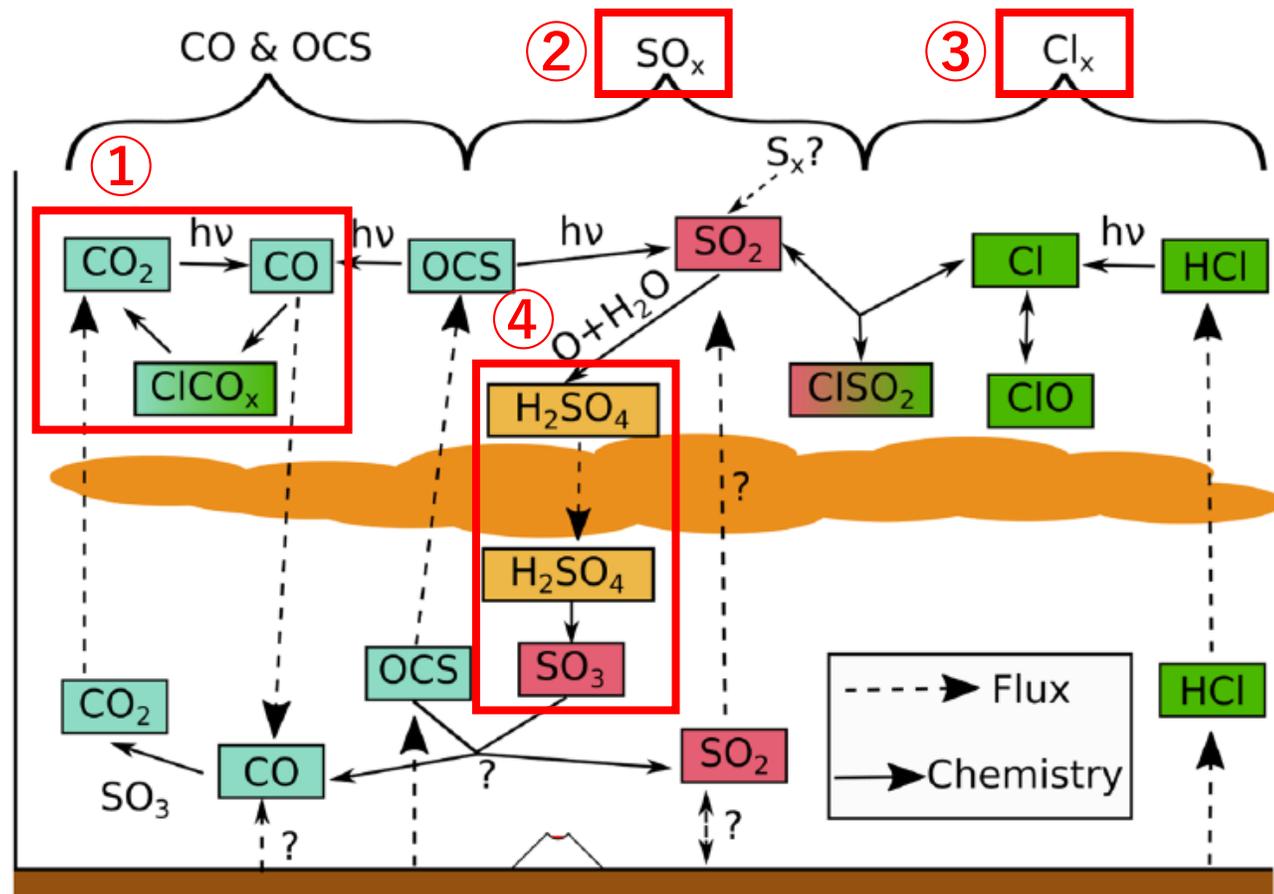
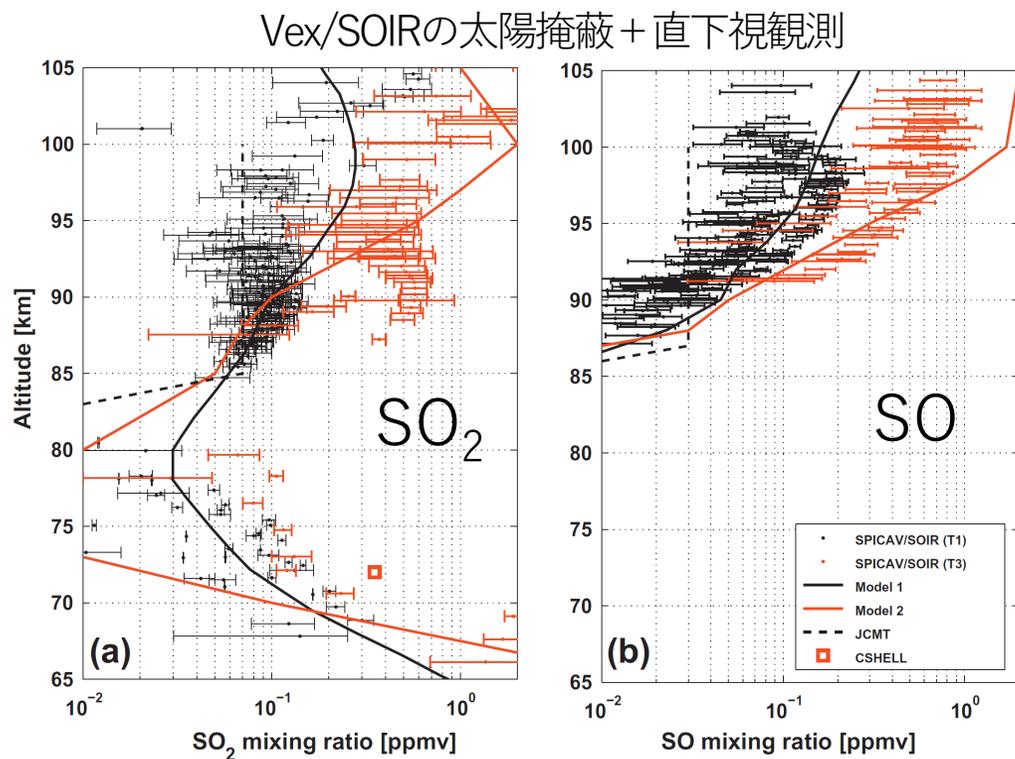


金星大気化学

地球の大気化学とは異なる化学反応系（火星とも異なる）。

② SO₂ 時間・空間変動・鉛直分布

高度 85 km 以上の上空に SO_x のソース？
(Belyaev et al., 2012)



Bierson & Zhang (2020)

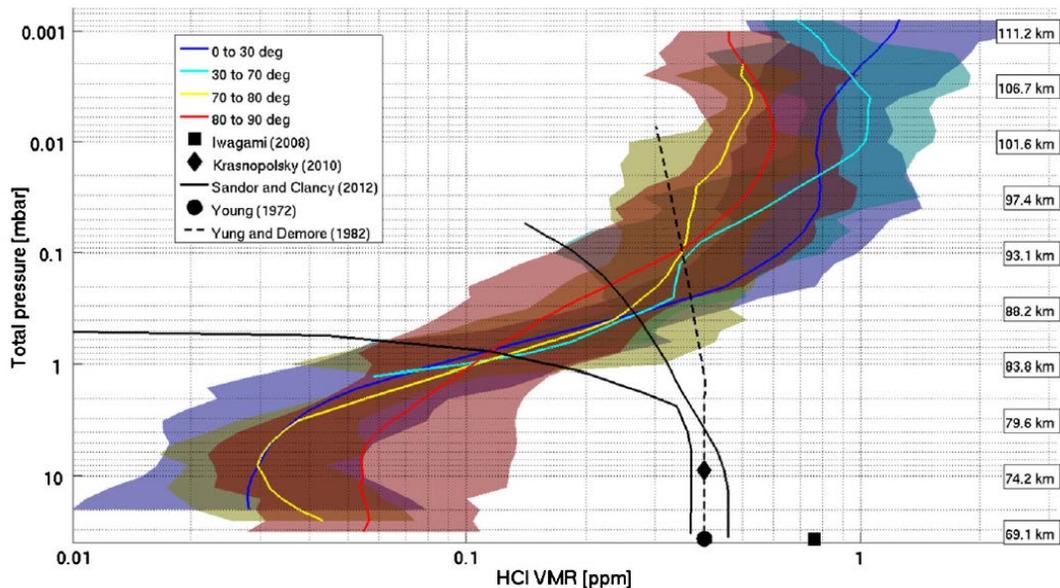
金星大気化学

地球の大気化学とは異なる化学反応系（火星とも異なる）。

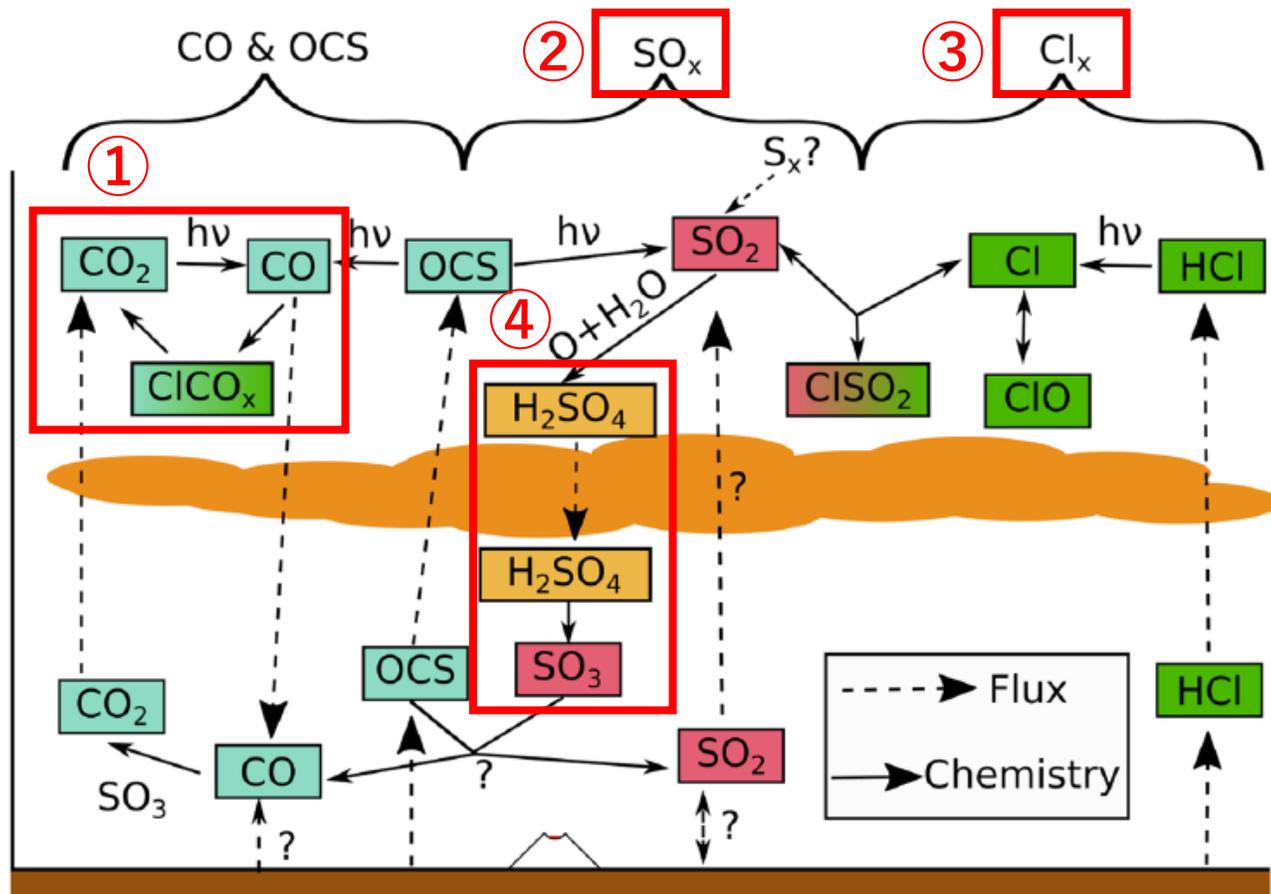
③ HCl 鉛直分布問題

雲頂での HCl の混合比に VEx と地上観測とで大きな不一致。鉛直分布も高高度に高濃集？

Vex/SOIRの太陽掩蔽観測。黒は地上観測とモデル。



Mahieux et al. (2015)



Bierson & Zhang (2020)

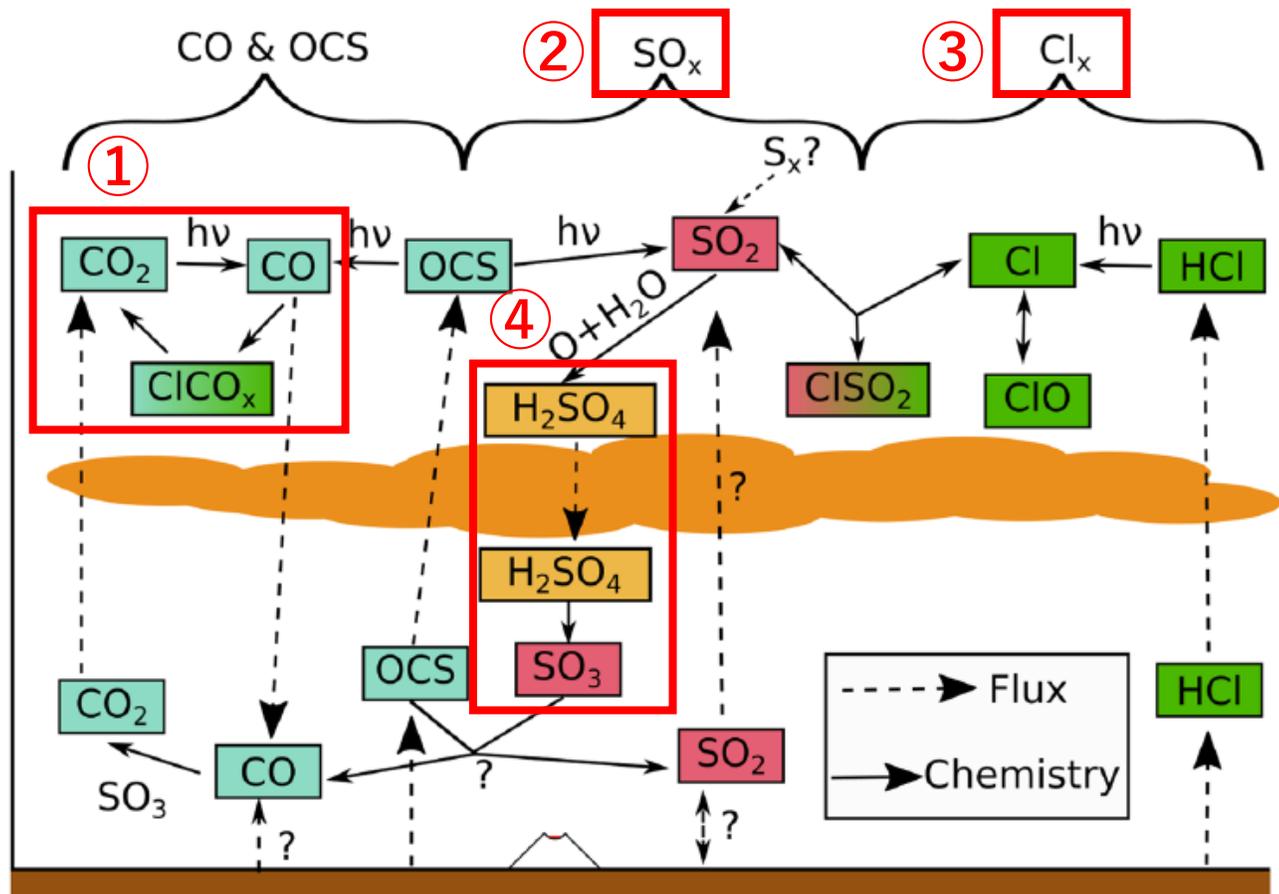
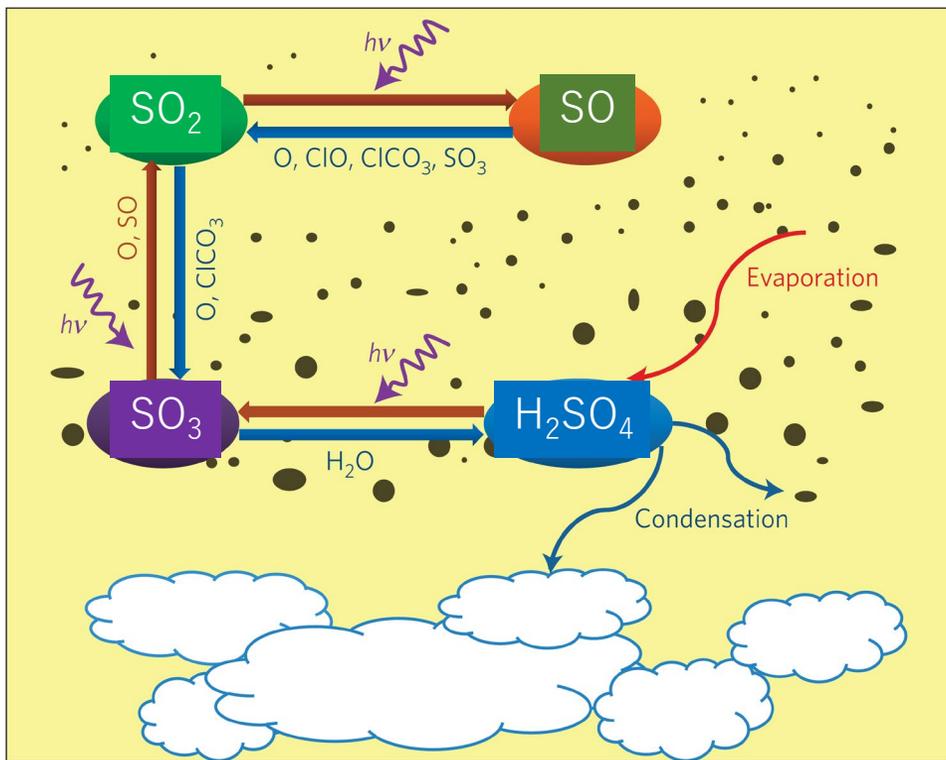
金星大気化学

地球の大気化学とは異なる化学反応系（火星とも異なる）。

④ 雲の（化学的な）生成・消滅

加えて、未知の紫外吸収物質の問題も。

Zhang et al. (2010)



Bierson & Zhang (2020)

金星大気微量成分の観測方法

- 直接観測：大気中への投下プローブや気球

Pioneer VenusやVega以来、ここ20年以上は実現していない。

- 探査機や地上望遠鏡によるリモートセンシング

Venus Express探査機の分光観測装置（紫外線，近赤外）…2014まで。

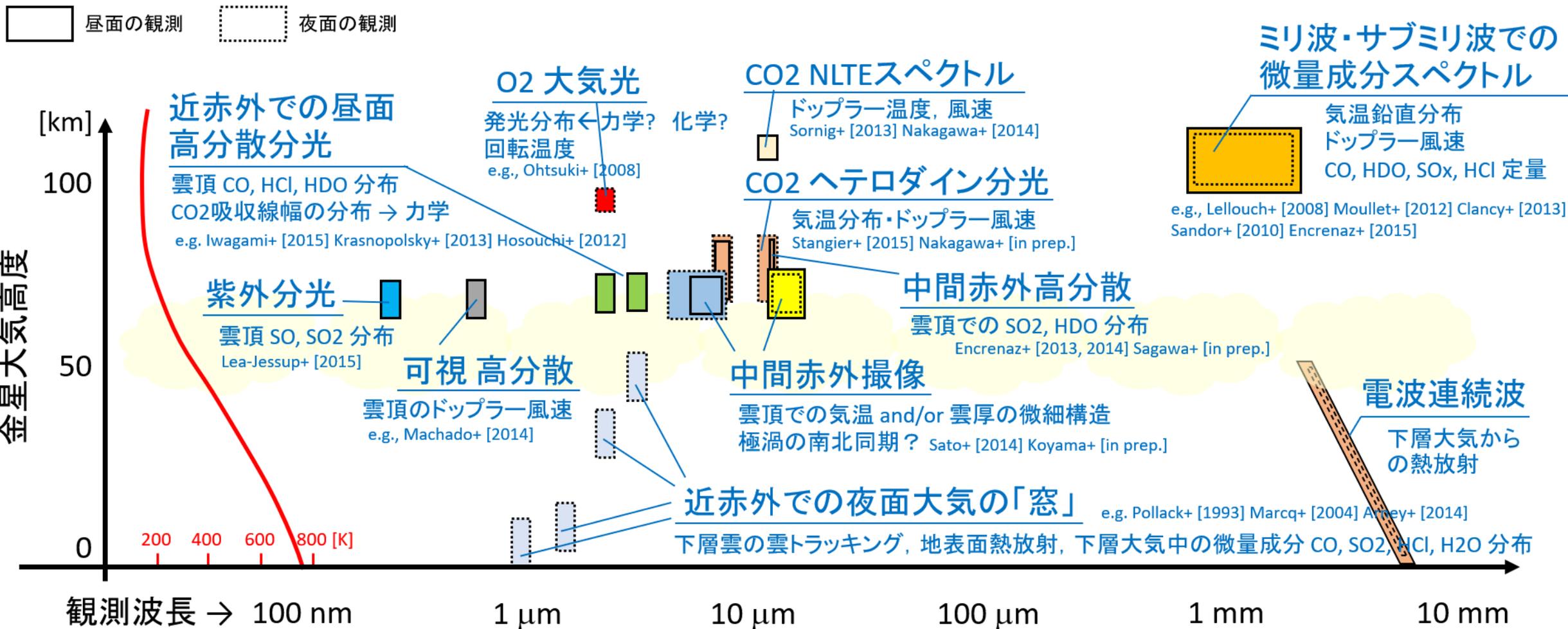
あかつきには分光器が搭載されておらず、微量成分の観測は行っていない。

→ **地上観測**を利用した分光観測が今現在可能なアプローチ。

今回の発表では話題に含むことが出来ていませんが、国内では佐藤隆雄さん（北海道情報大），今井正堯さん（産総研），前澤裕之さん（大阪府立大）なども精力的に金星「地上」観測を展開中です。

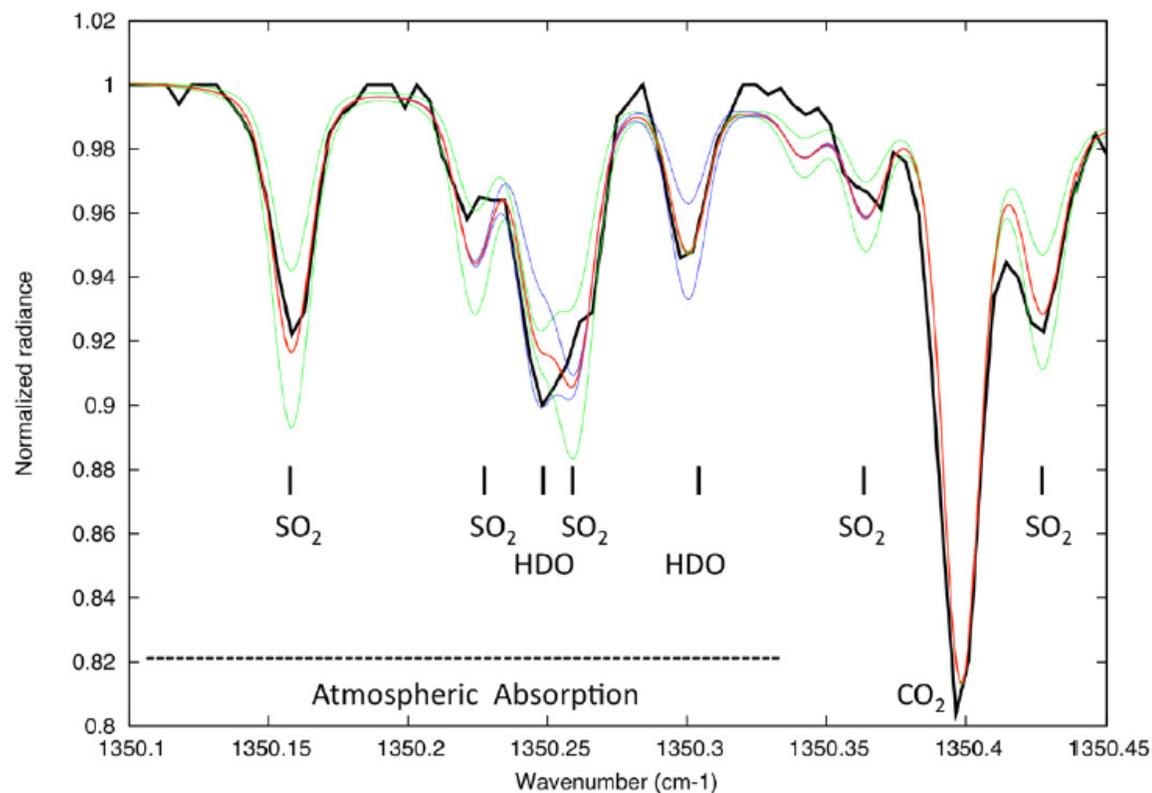
リモセンによる金星大気へのアクセス方法

光学的厚みが~1より深いところは見えない。 基本的には雲より上。



Encrenaz et al. (2012; 2013; 2016; 2019; 2020)

- 地上観測による雲層付近のSO₂およびH₂O (HDOから導出) の長期観測
- 中間赤外線 (7.4 & 19 μm付近) の**高分散分光 (波長分解能 80,000)**



- 雲層上部からの赤外線熱放射に、それより上空に存在する分子の吸収が重なる.
- 分子の吸収線**一本一本を分離して**観測可能.
- 「弱いCO₂の吸収線」の深さを基準に、SO₂やHDOの混合比 @ ~67 km を導出.

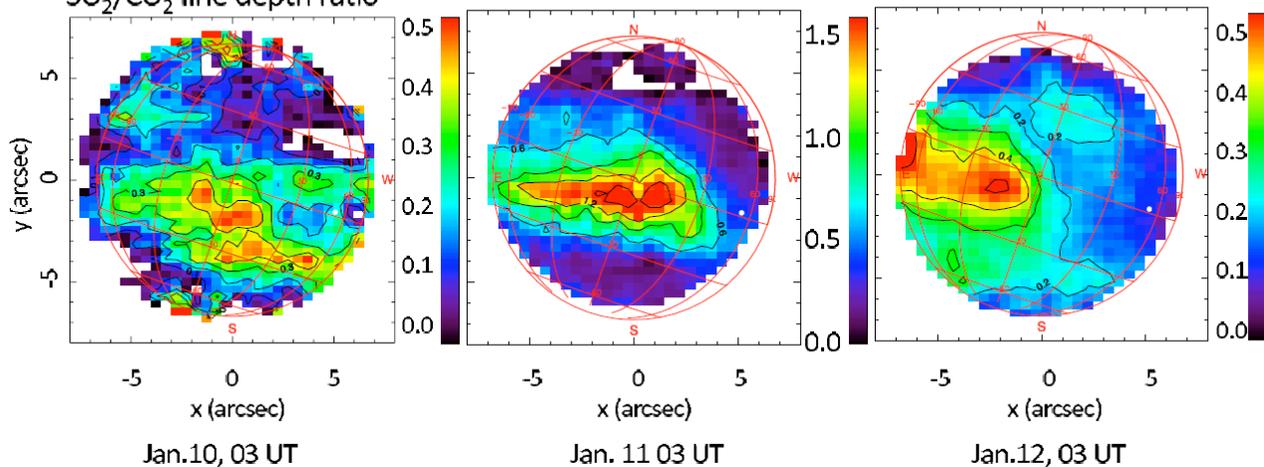
Encrenaz et al. (2012; 2013; 2016; 2019; 2020)

- 雲層上部のSO₂の空間変動と時間変動

大きな空間構造は4日周期で西に移動。 但し、細かな模様は数時間で変化。

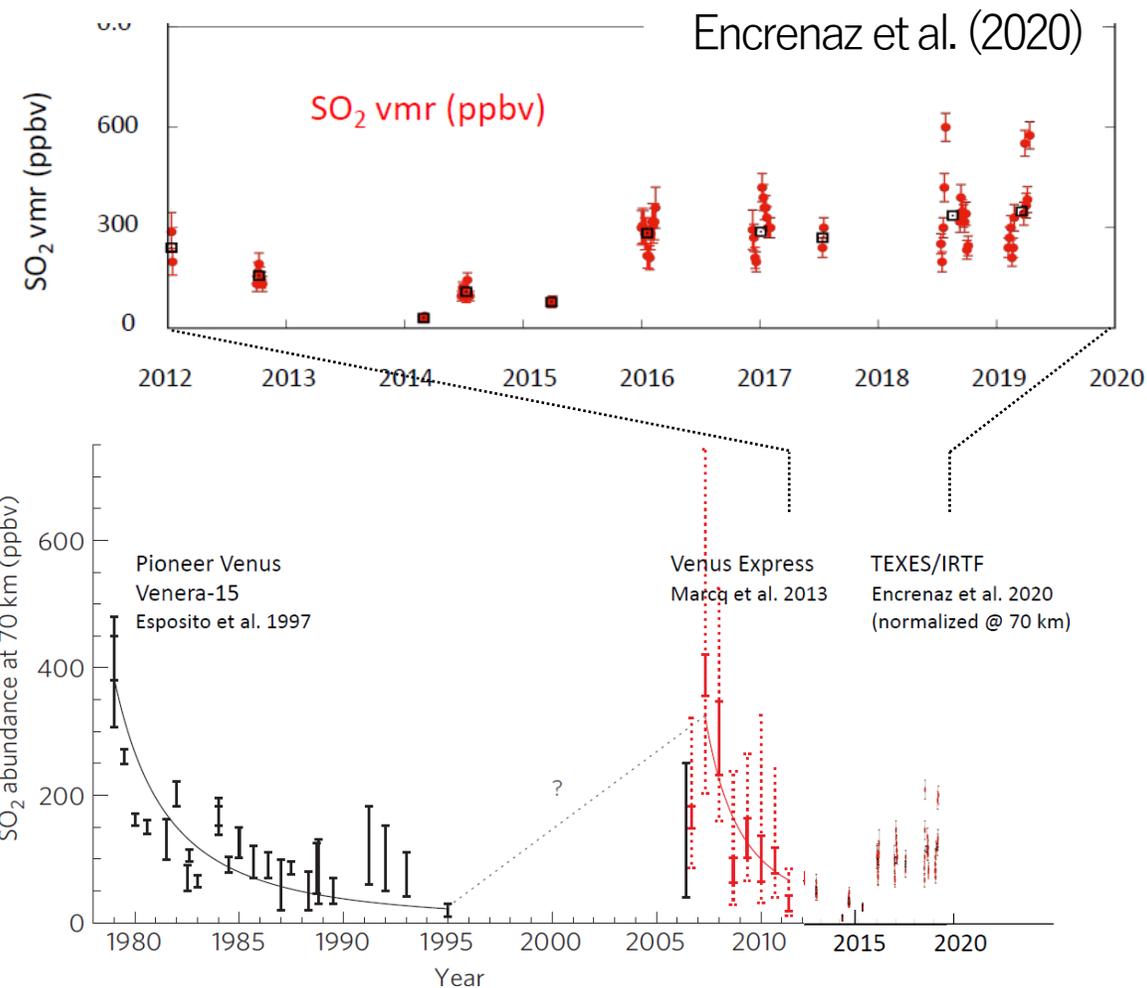
Timescale: 1 day

SO₂/CO₂ line depth ratio



1地球日ごとの観測結果 (Encrenaz et al., 2013)

長期時間変動の理由は**未説明**。



Encrenaz et al. (2012; 2013; 2016; 2019; 2020)

- 雲層上部のSO₂の空間変動と時間変動

「あかつき」の紫外線 (283 nm) 画像と比較してみると…

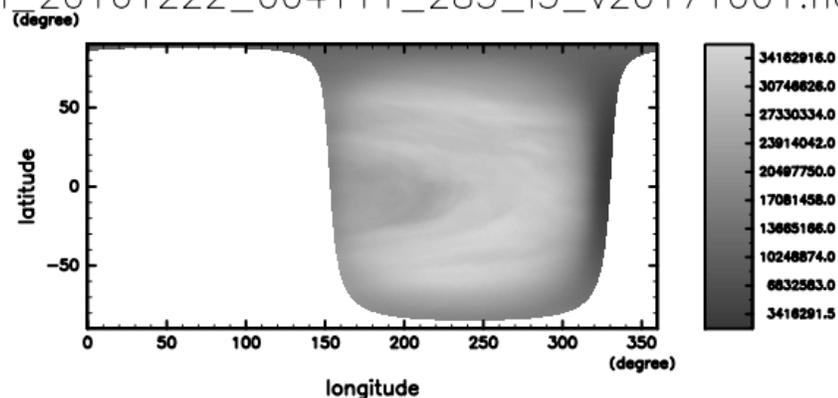
[比較作業のための準備]



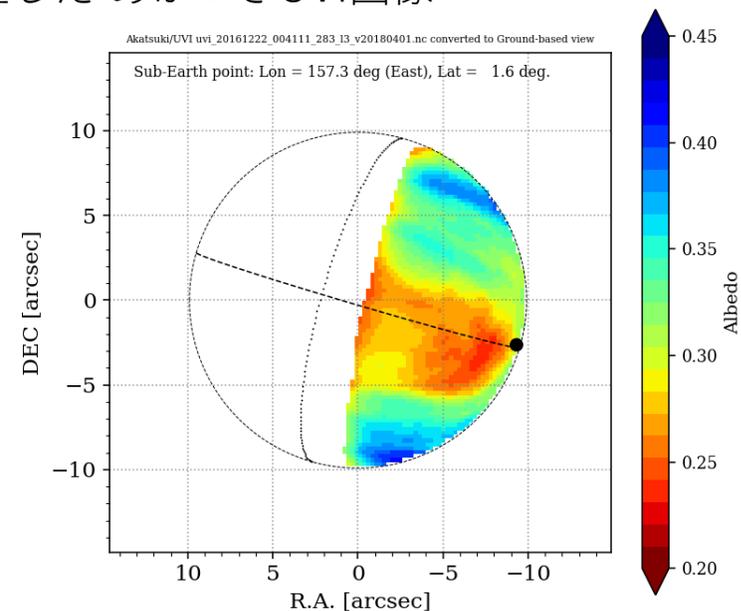
左：輝度校正済みのあかつき Level-2b画像.

下：金星の緯度経度に展開された L3データ.

i_20161222_004111_283_I3_v20171001.nc



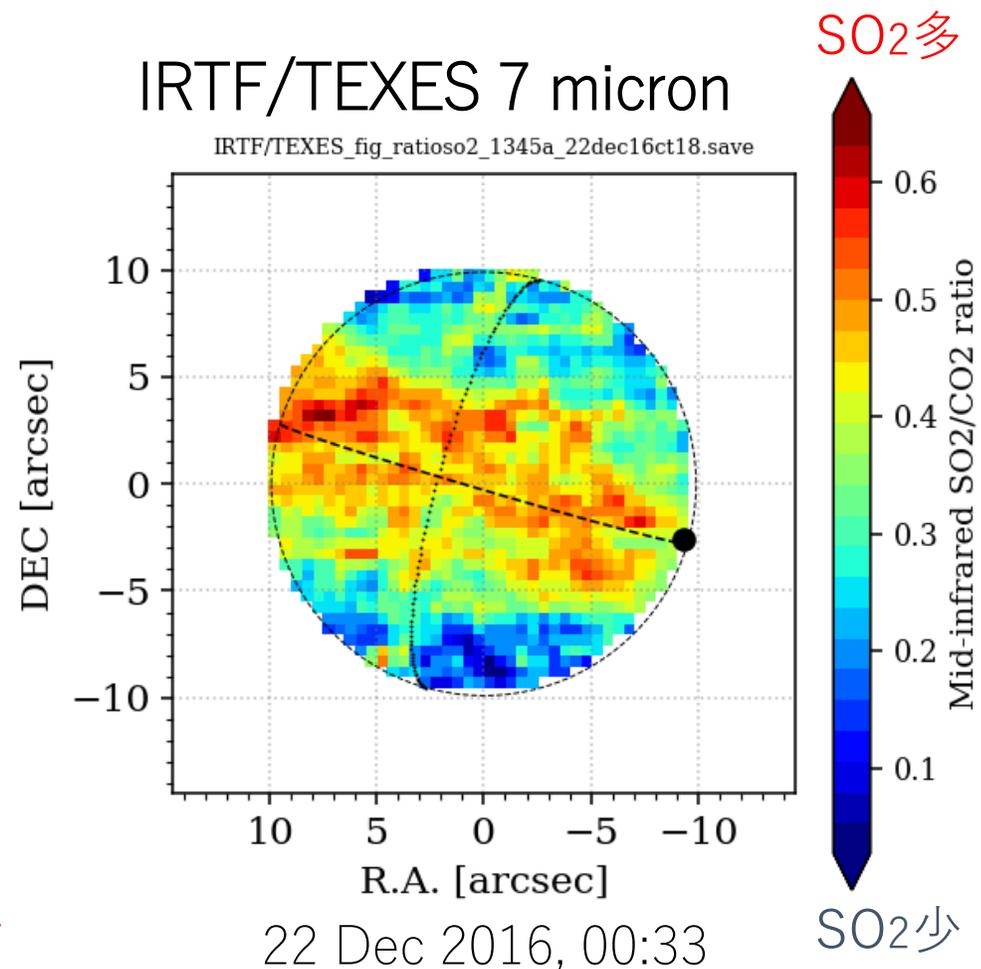
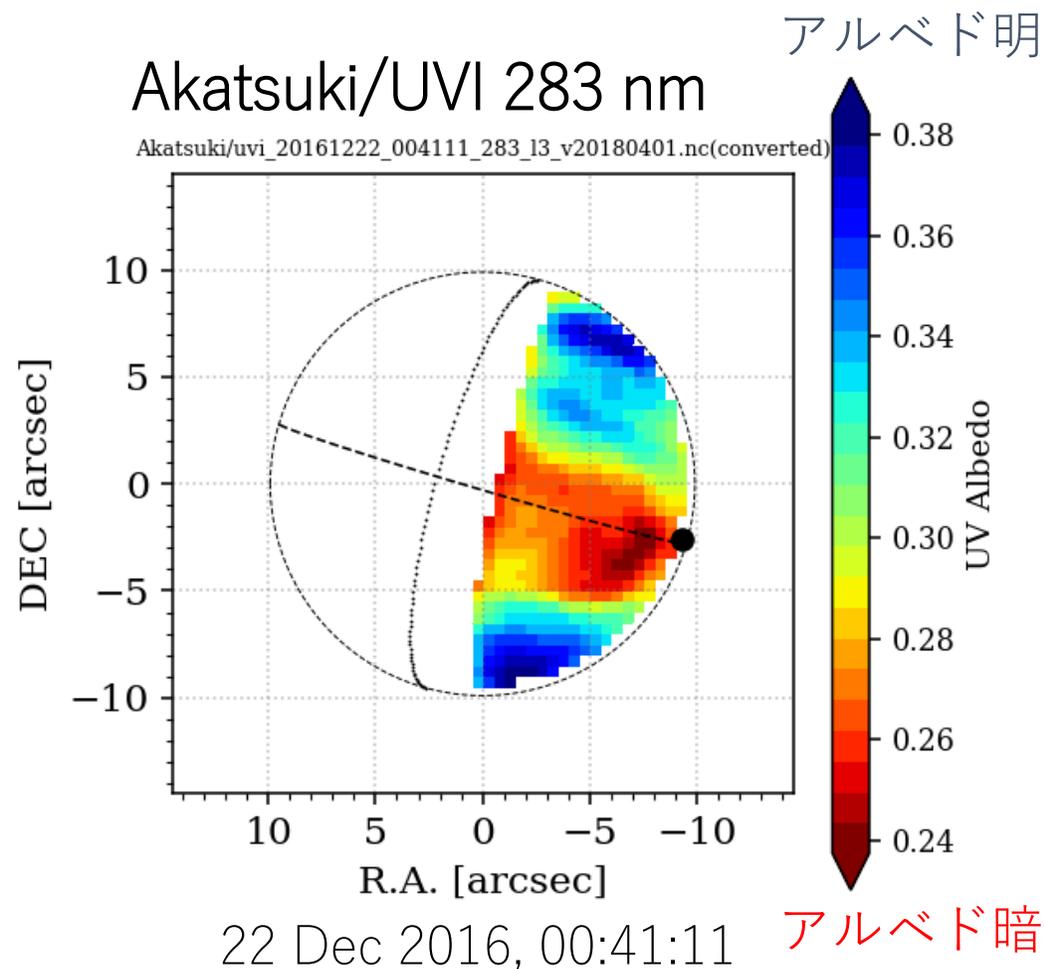
「地球から見た金星ディスク上の緯度経度」に
焼き直した あかつきUVI画像



Encrenaz et al. (2012; 2013; 2016; 2019; 2020)

- 雲層上部のSO₂の空間変動と時間変動

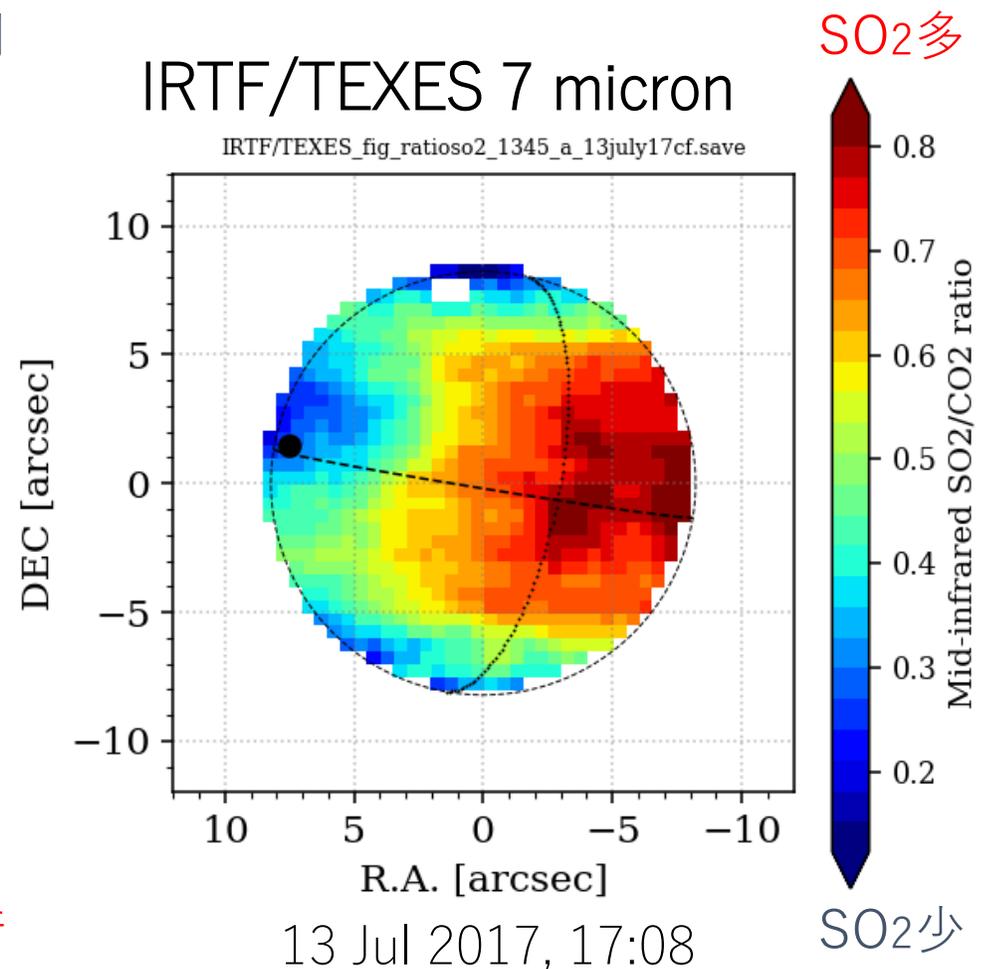
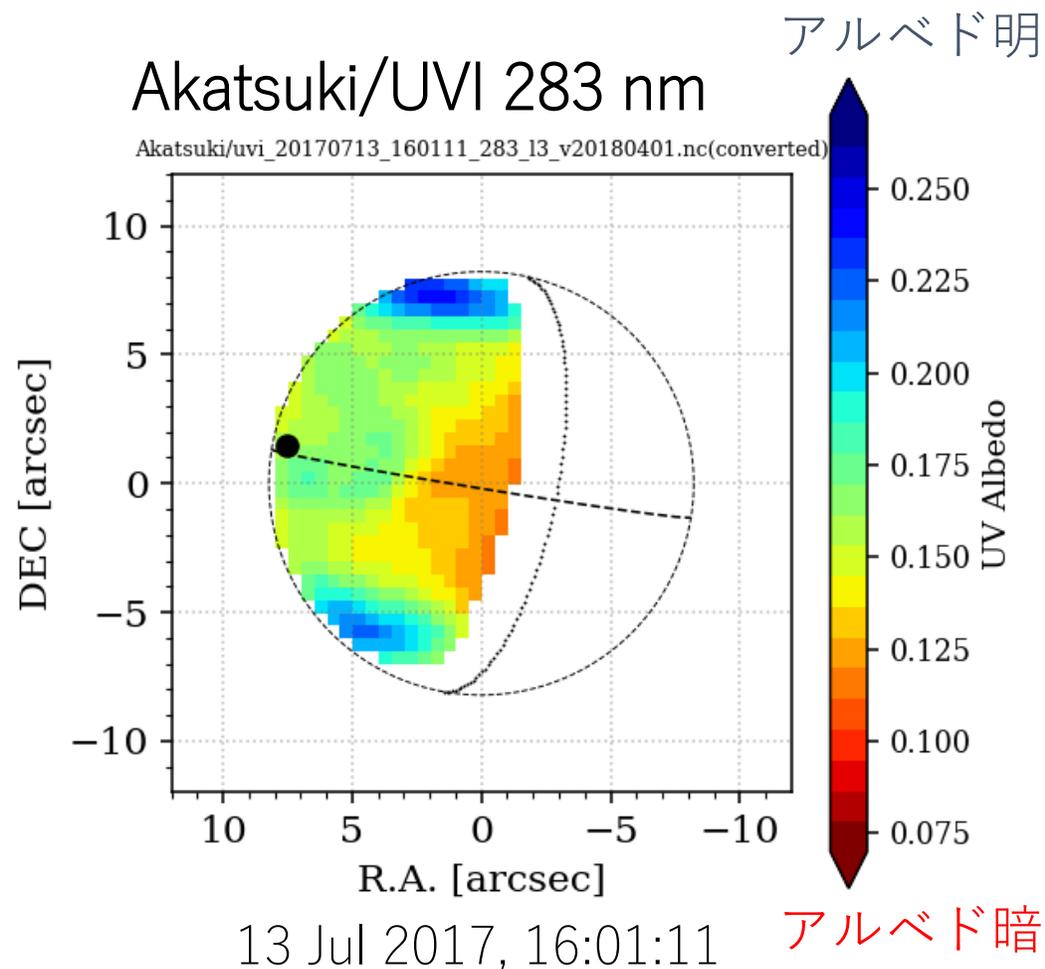
「あかつき」の紫外線 (283 nm) 画像と比較してみると… **良い一致**



Encrenaz et al. (2012; 2013; 2016; 2019; 2020)

- 雲層上部のSO₂の空間変動と時間変動

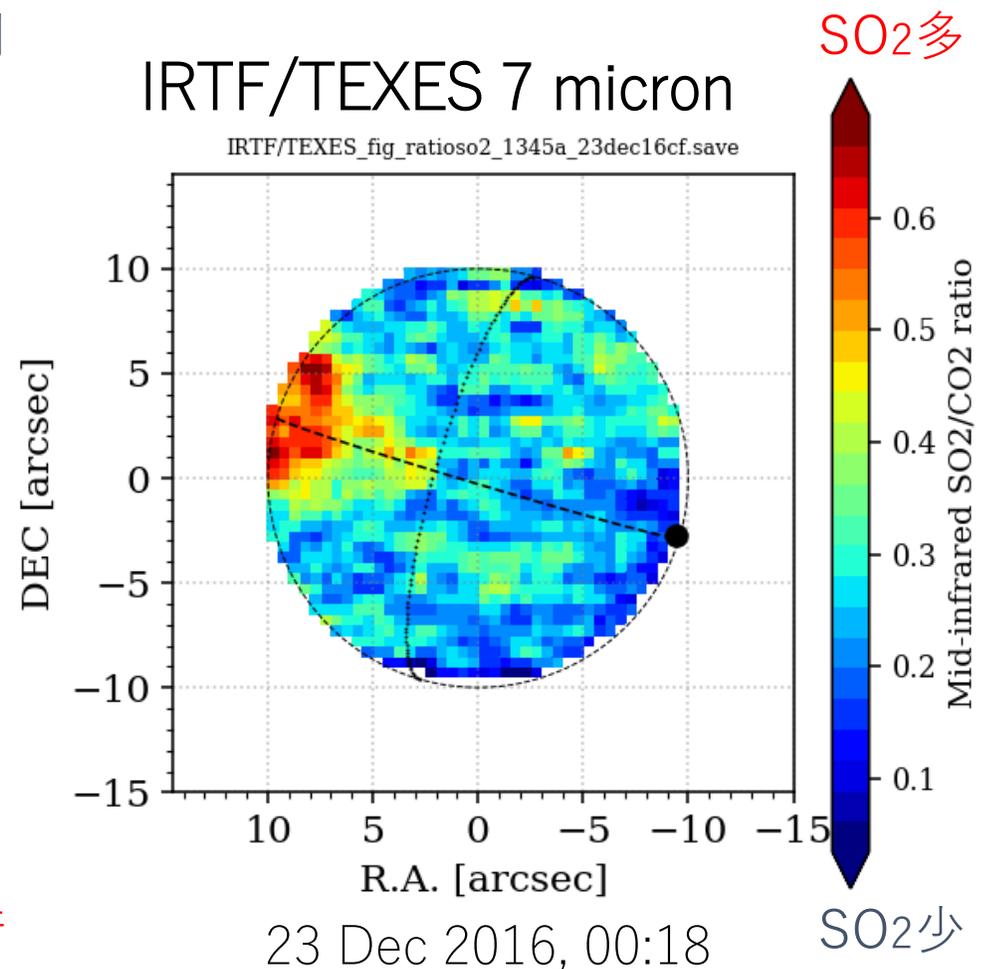
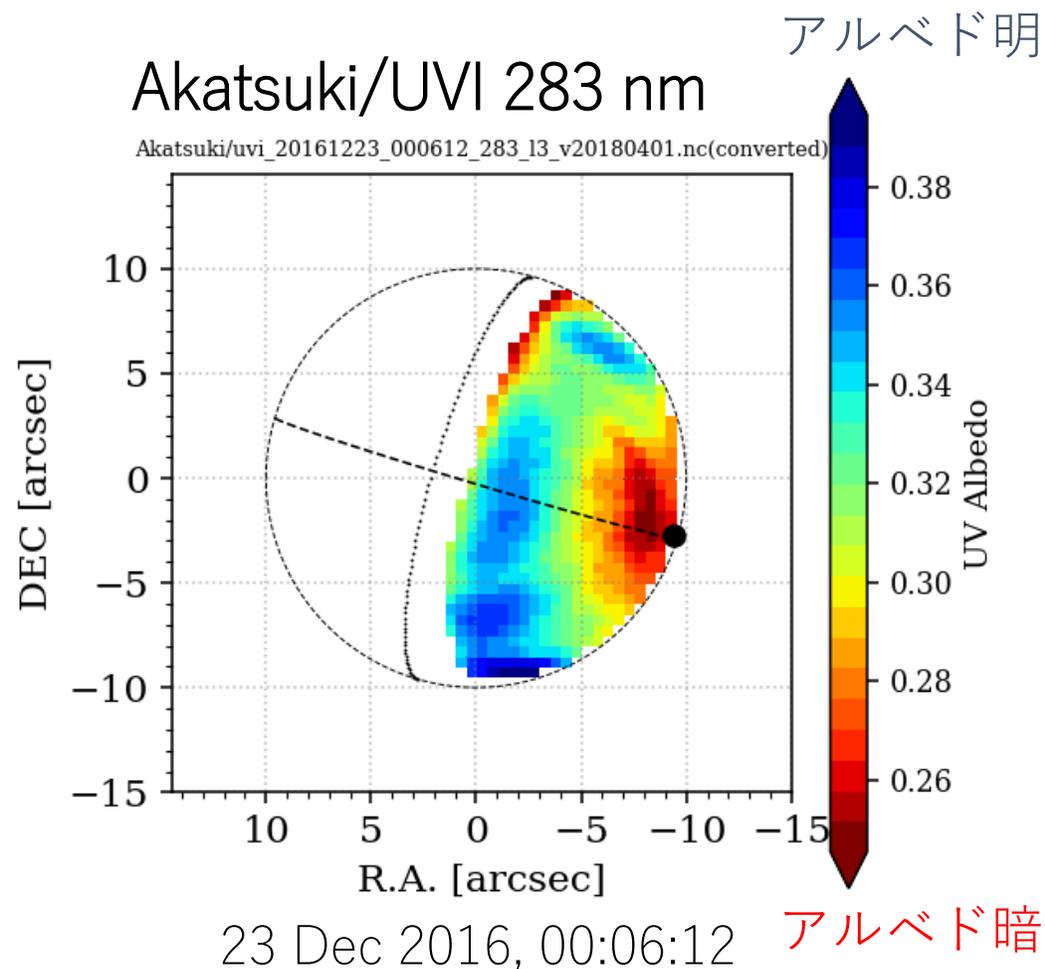
「あかつき」の紫外線 (283 nm) 画像と比較してみると… **良い一致**



Encrenaz et al. (2012; 2013; 2016; 2019; 2020)

- 雲層上部のSO₂の空間変動と時間変動

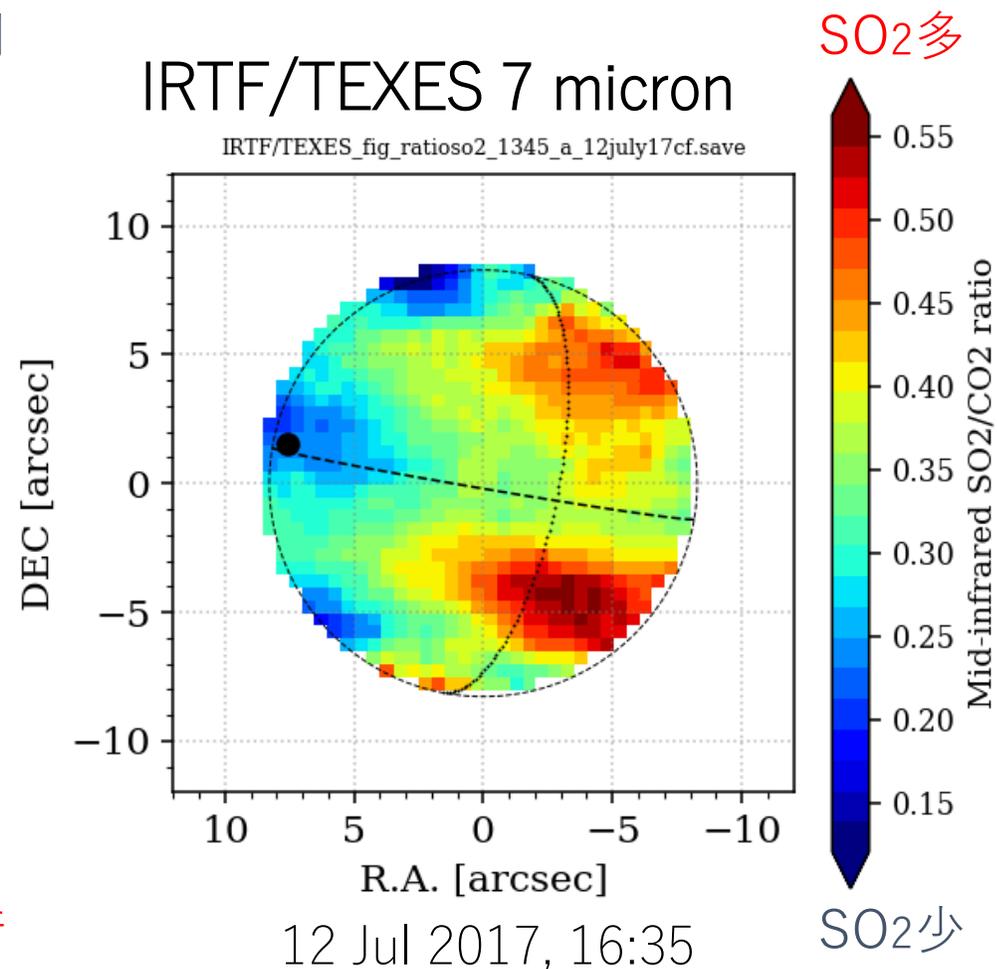
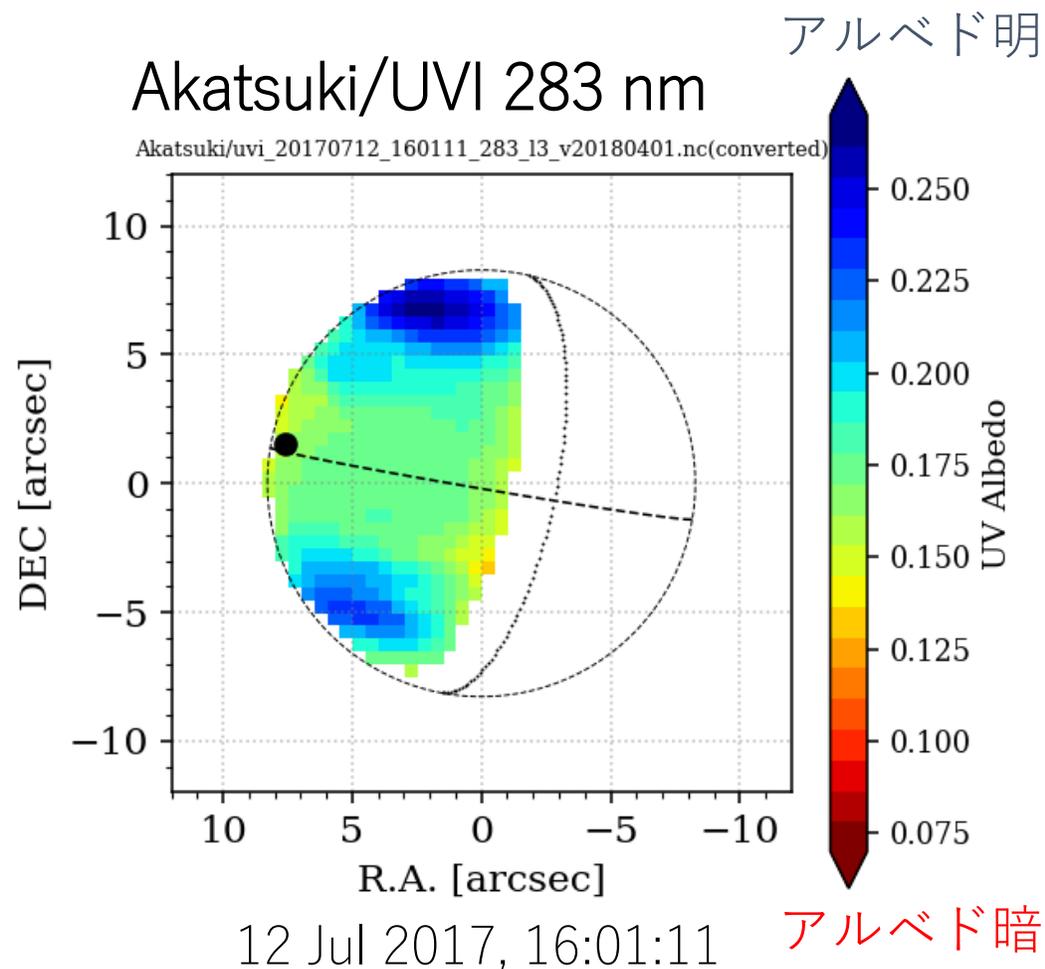
「あかつき」の紫外線 (283 nm) 画像と比較してみると… 一致しない場合も



Encrenaz et al. (2012; 2013; 2016; 2019; 2020)

- 雲層上部のSO₂の空間変動と時間変動

「あかつき」の紫外線 (283 nm) 画像と比較してみると… 一致しない場合も

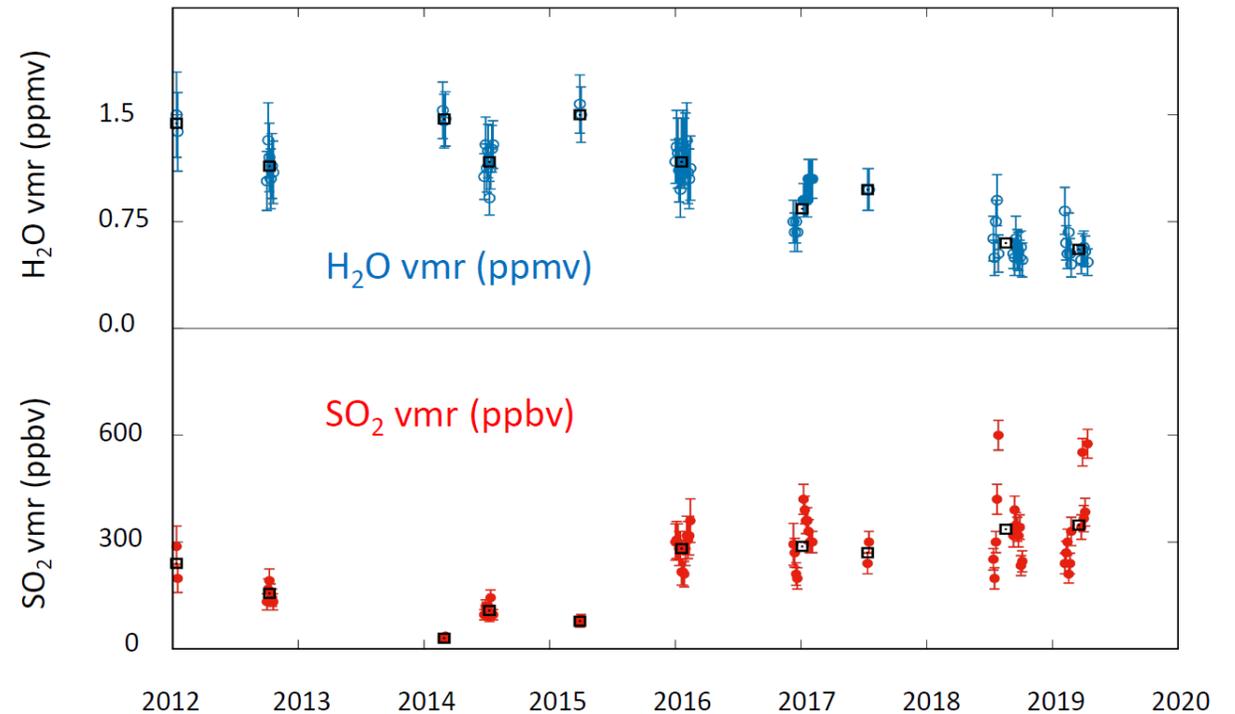
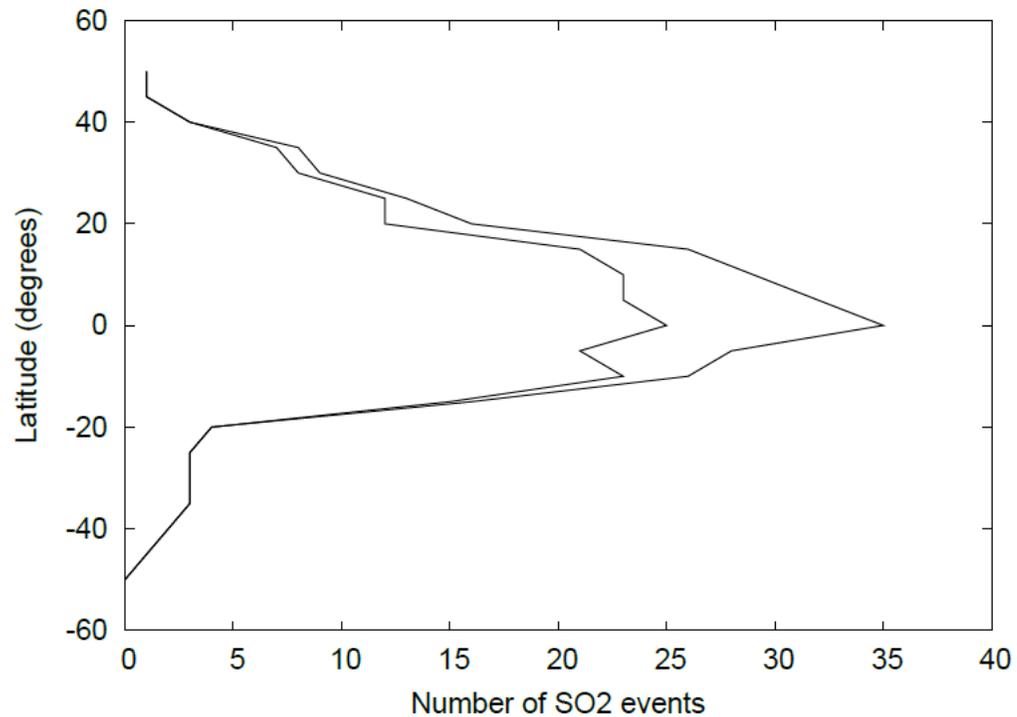


Encrenaz et al. (2012; 2013; 2016; 2019; 2020)

- 雲層上部のSO₂の空間変動と時間変動

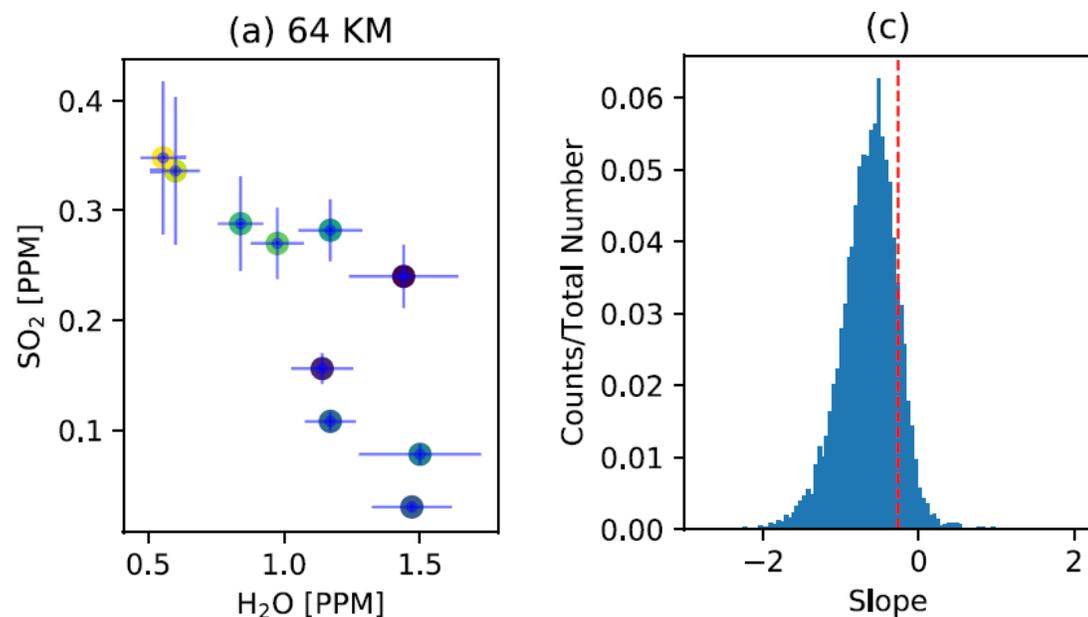
SO₂が特に濃い領域 (**plume**) は赤道域に多く出る傾向.

SO₂と H₂O の時間変動の間に**逆相関**(?). 尚, 短時間スケールでは逆相関は見られない.



今後の課題

- 観測の**継続** + **化学モデル** (Bierson and Zhang, 2020; Shao et al., 2020)

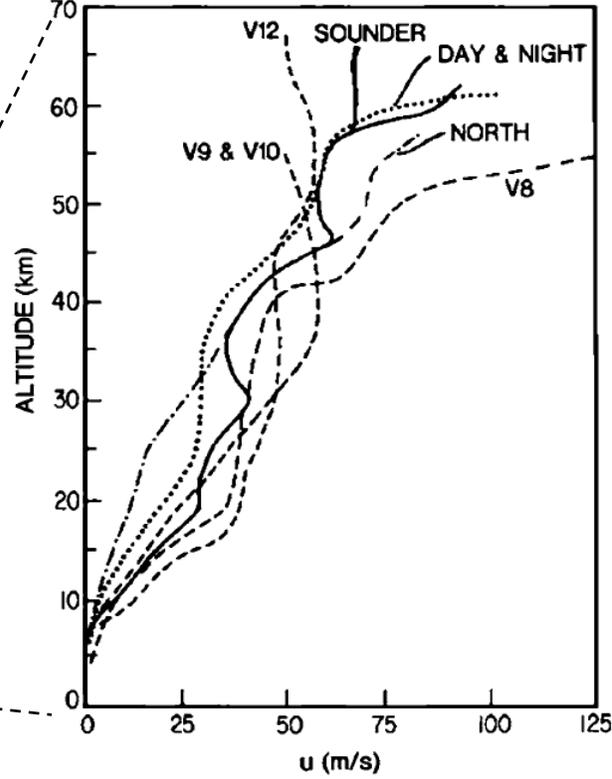
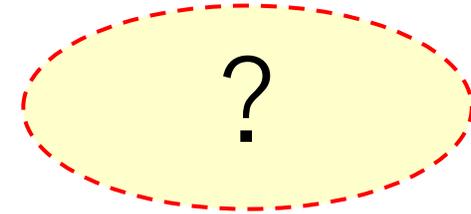
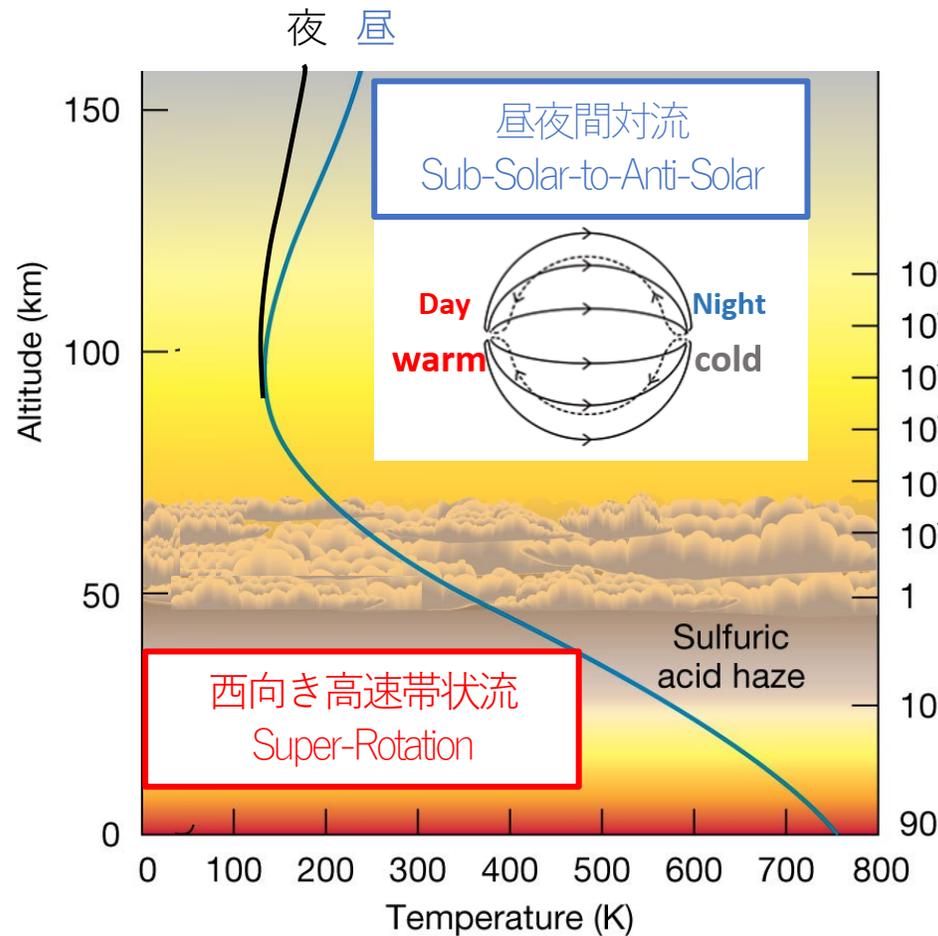


Shao et al. (2020) 一次元化学モデルの数値実験結果。
左：高度 58 km (モデル下端) の SO₂ および H₂O 混合比を
ランダムに変えつつ、高度 64 km での両分子の相関を計算。

- 他波長の観測データとの比較 (e.g., **あかつき UVI 365 nm**, 19 μm データ)
- 電波掩蔽観測の**気温場データ**なども利用しつつ、放射伝達をしっかりと解く。

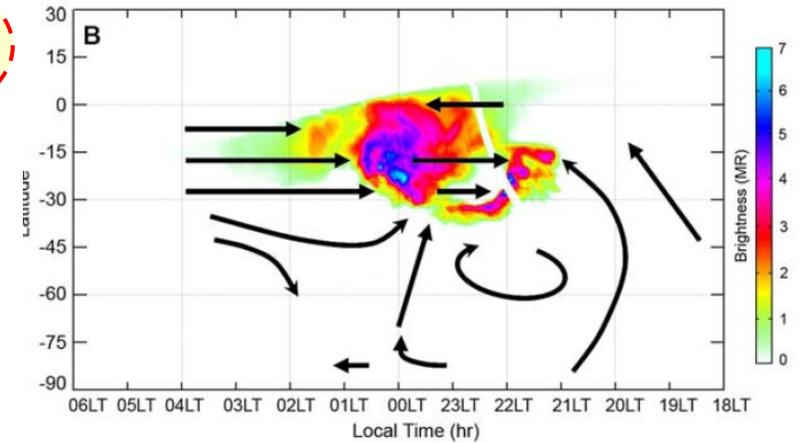
電波干渉計による金星上層大気のスプレッド観測

雲層より上空の大気力学はどのようなになっているのか？



Schubert et al. (1980)

Hueso et al. (2008)

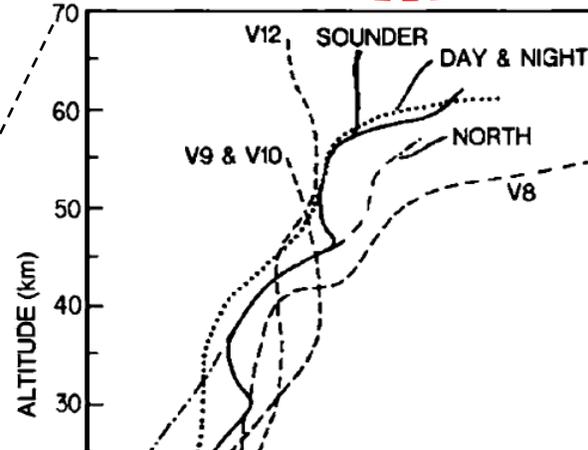
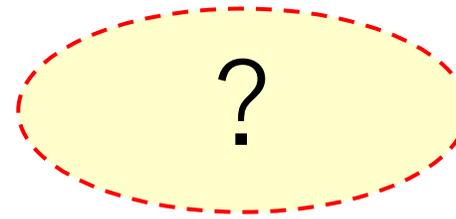
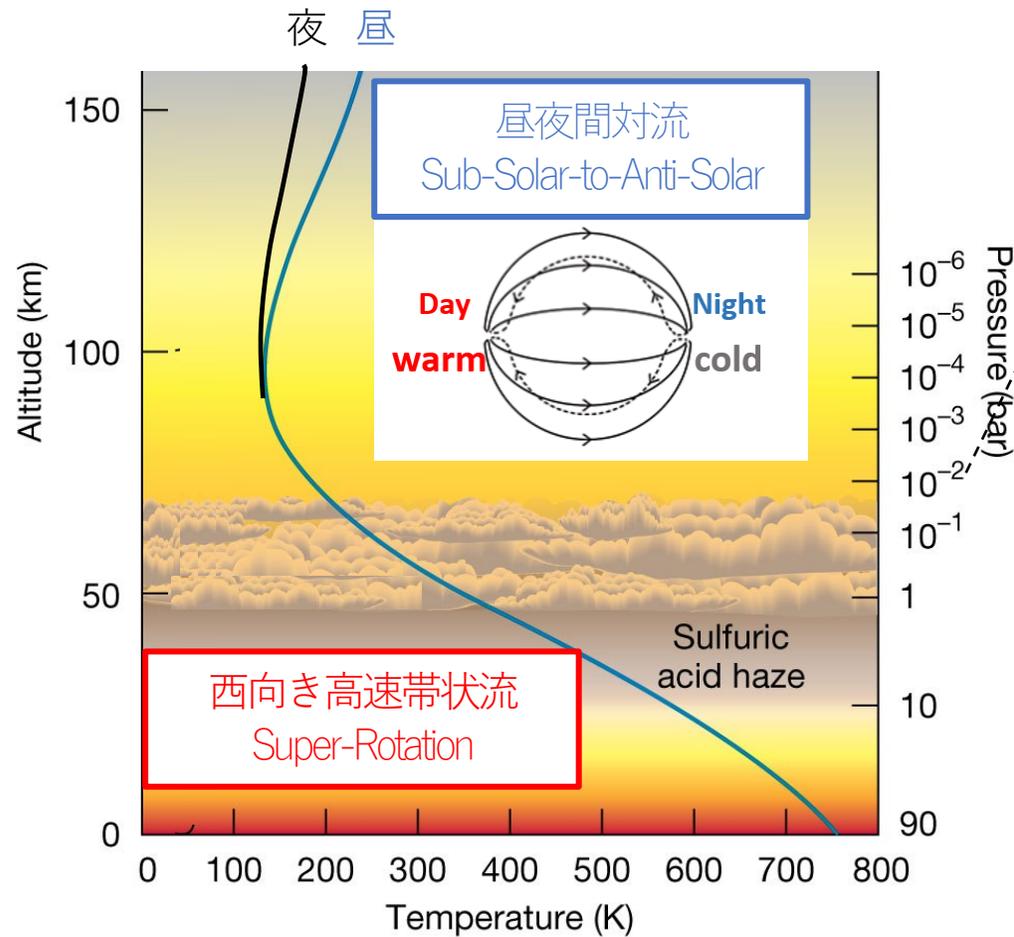


右上：VEx/VIRTISで観測されたO₂大気光の強度分布とそれから推定された大気の流れ。

昼面でCO₂の光解離で生成したOが**夜面に輸送され**、真夜中点付近で下降流を形成、高度95 km付近で大気光を光らせる。

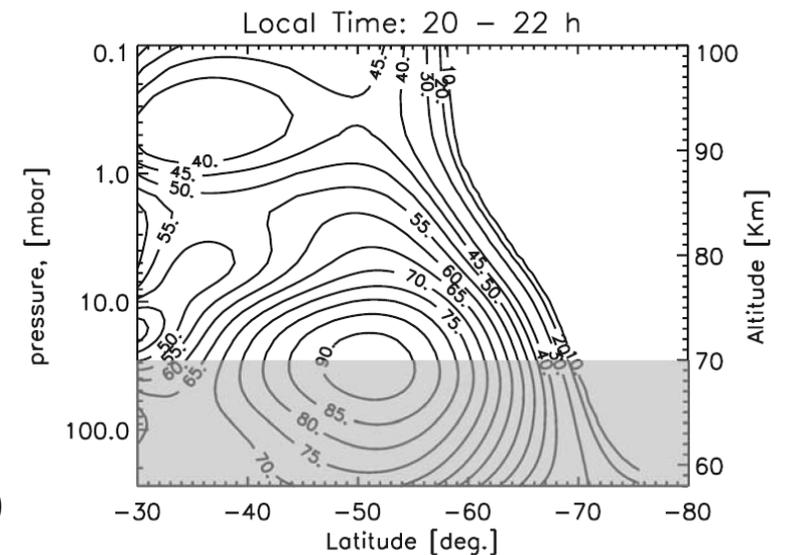
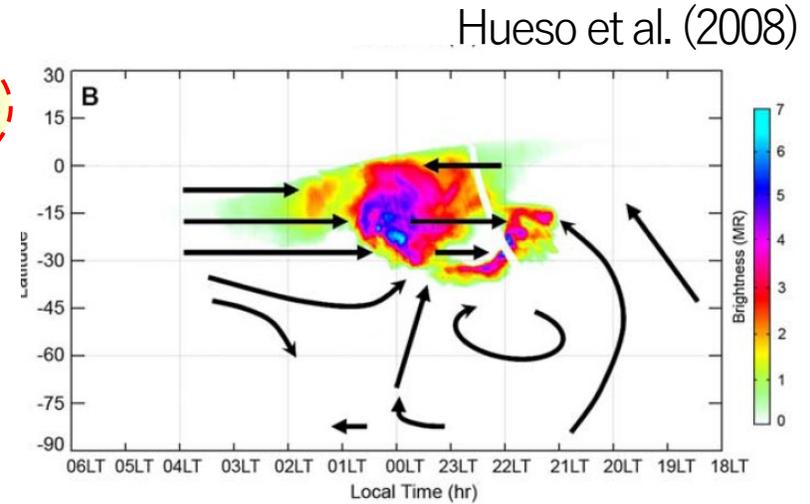
電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

雲層より上空の大気力学はどのようなになっているのか？



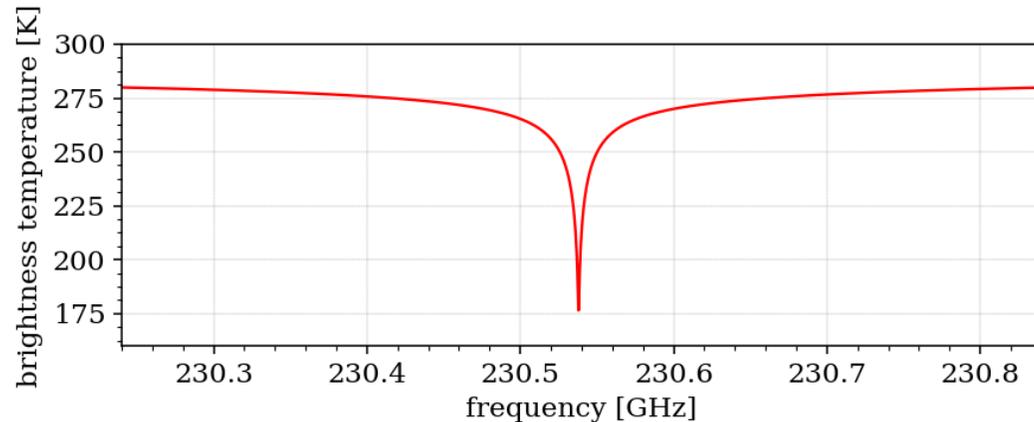
右：VEX/VIRTISで観測された気温場から旋衡風近似を用いて導出された東西風速。

Piccialli et al. (2008)



電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

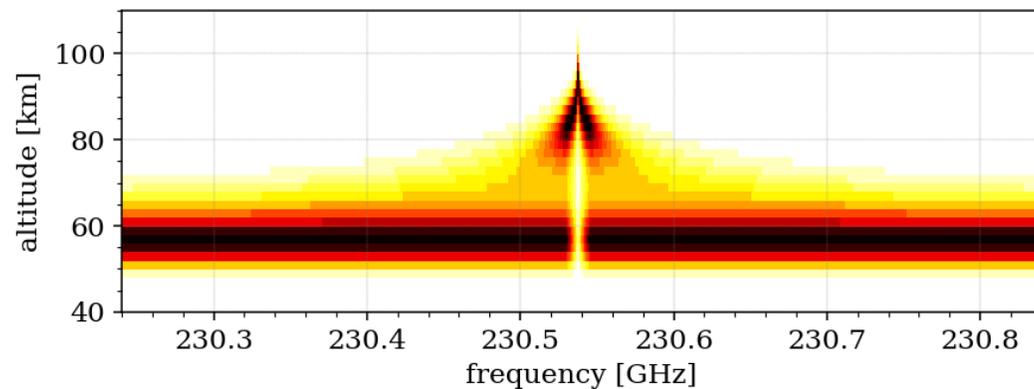
- ALMAなどに代表される電波干渉計 – ヘテロダインによる**超高周波数分解能 ($\sim 10^7$)**.
- 分子の吸収線一本一本の形 (= **圧力広がり**) と **ドップラーシフト** も観測可能.



波長 1.3 mm の金星 CO 吸収線のモデルスペクトル。
下図は、各波長での放射がどの高度から射出されているか = **どの高度を観測しているのか**を示した図。

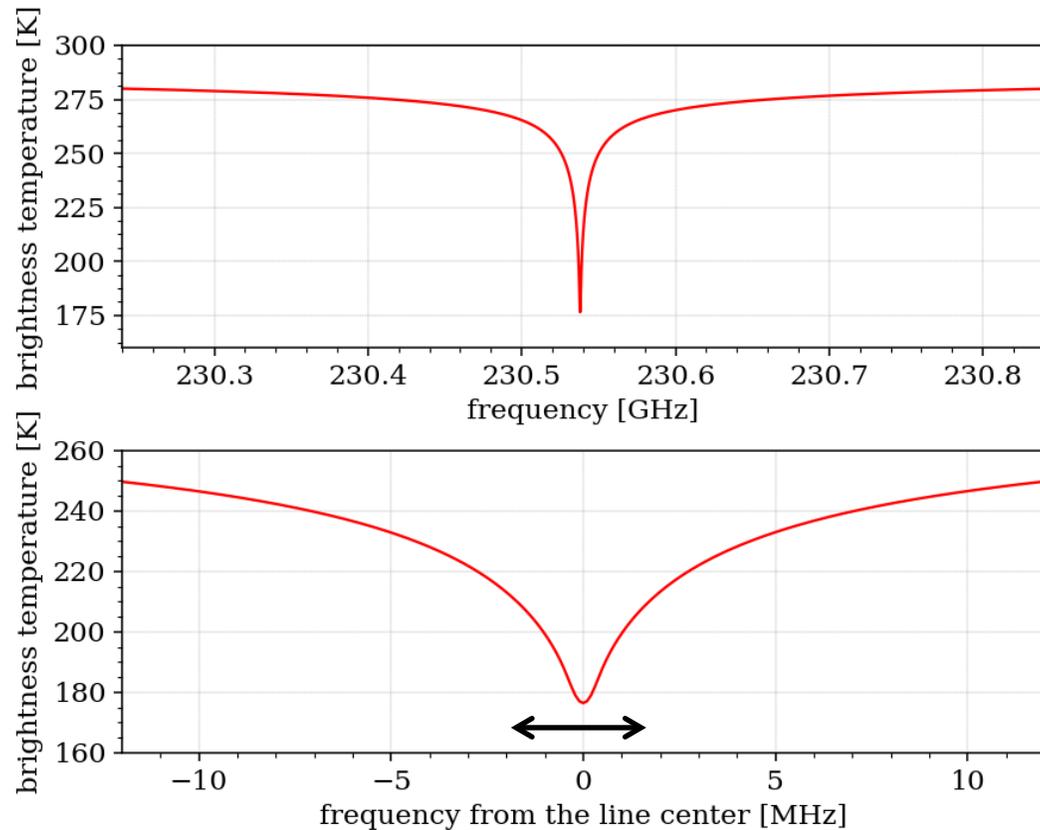
吸収が及ばない波長域の放射 (連続波) では高度 55 – 60 km 付近 (雲層) からの放射が届く。

その高度よりも上空に存在する CO が吸収線を形成。
吸収線の中心付近では高度 ~ 100 km 付近を観測。



電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

- ALMAなどに代表される電波干渉計 – ヘテロダインによる**超高周波数分解能** ($\sim 10^7$).
- 分子の吸収線一本一本の形 (= **圧力広がり**) と **ドップラーシフト** も観測可能.

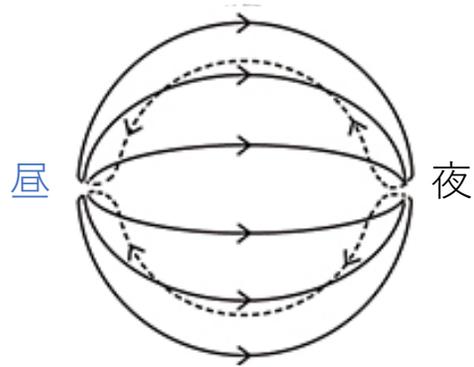


吸収に寄与する CO 分子が **観測視線方向**に近づくか / 遠ざかるかで、吸収線の波長が左右に**ドップラーシフト**.
特に吸収線中心部分がシフトを測定しやすく、 $\sim 10 - 30$ m/s 程度の精度で視線方向速度を観測可能.

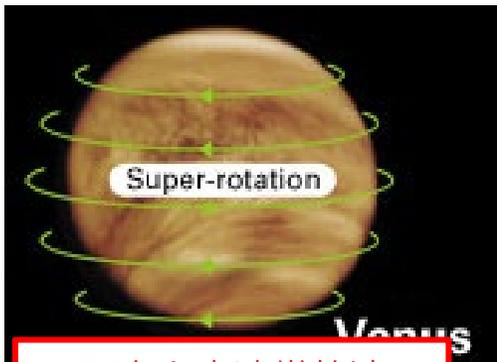
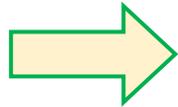
(視線方向成分のみという条件は付くが)
上層大気の風を直接的に観測する効果的手法.

電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

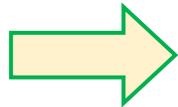
- 「視線方向速度」のイメージを持って貰うために…



昼夜間対流
Sub-Solar-to-Anti-Solar

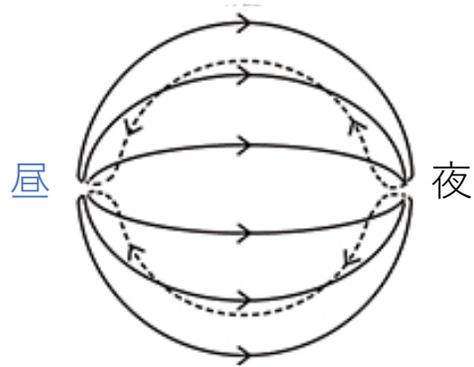


西向き高速帯状流
Super-Rotation

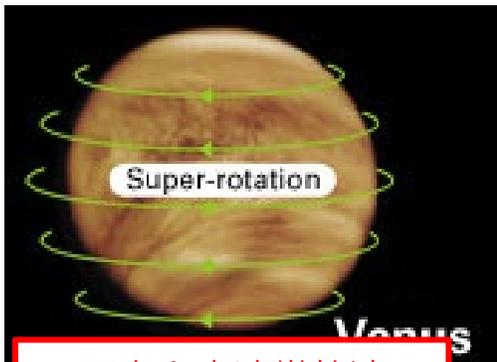
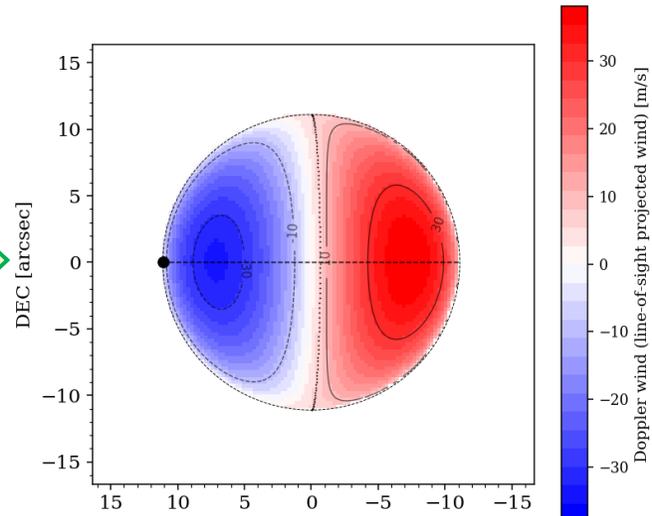
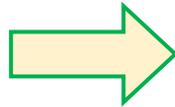


電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

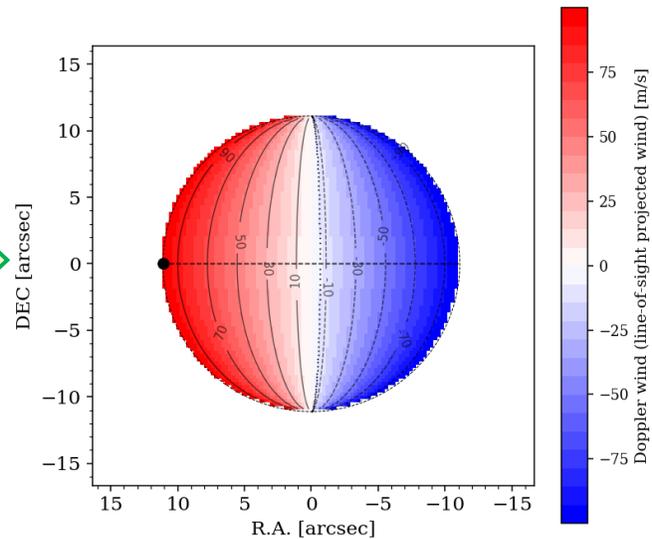
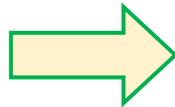
- 「視線方向速度」のイメージを持って貰うために…



昼夜間対流
Sub-Solar-to-Anti-Solar

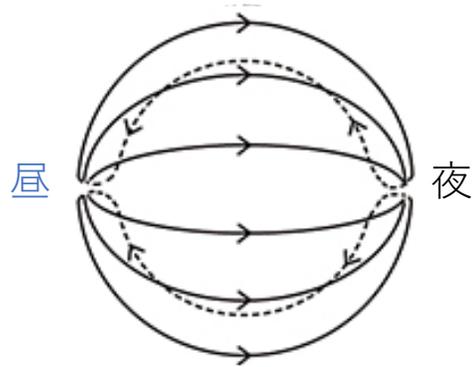


西向き高速带状流
Super-Rotation

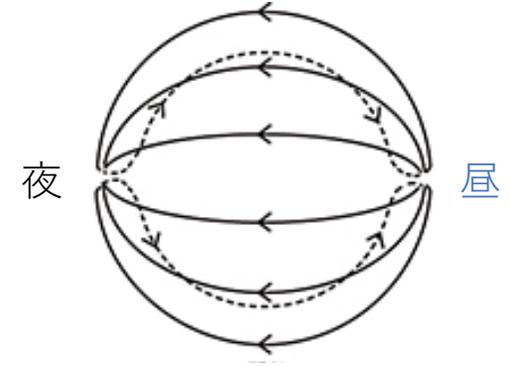
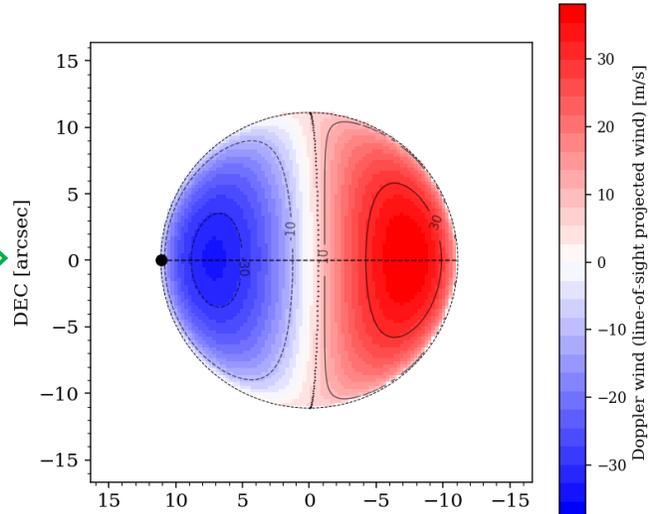
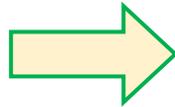


電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

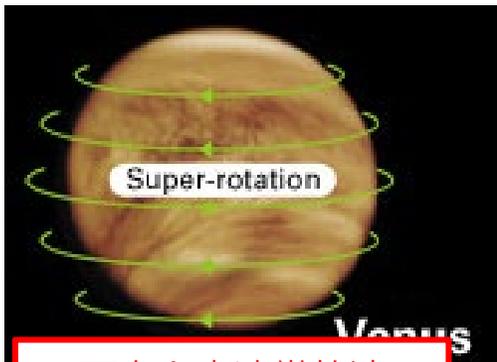
- 「視線方向速度」のイメージを持って貰うために…



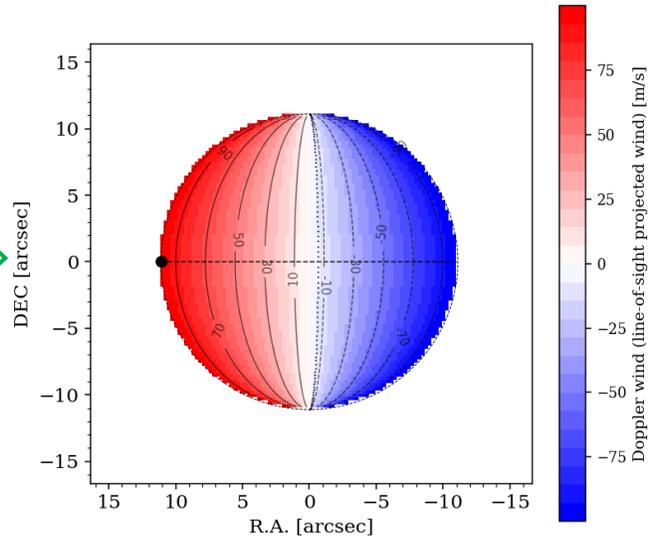
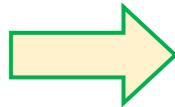
昼夜間対流
Sub-Solar-to-Anti-Solar



…この観測ジオメトリでの昼夜間循環は西向き帯状流の視線速度分布と区別困難.



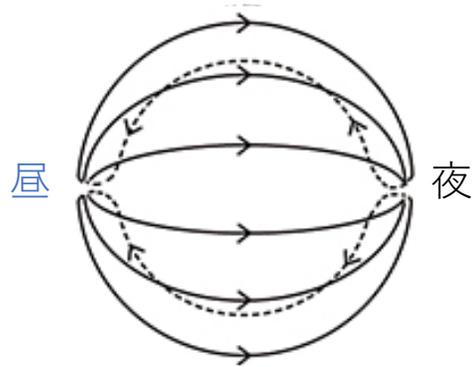
西向き高速帯状流
Super-Rotation



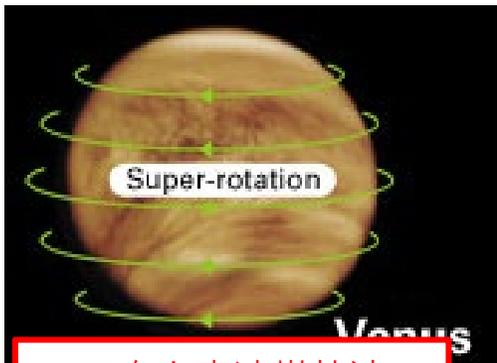
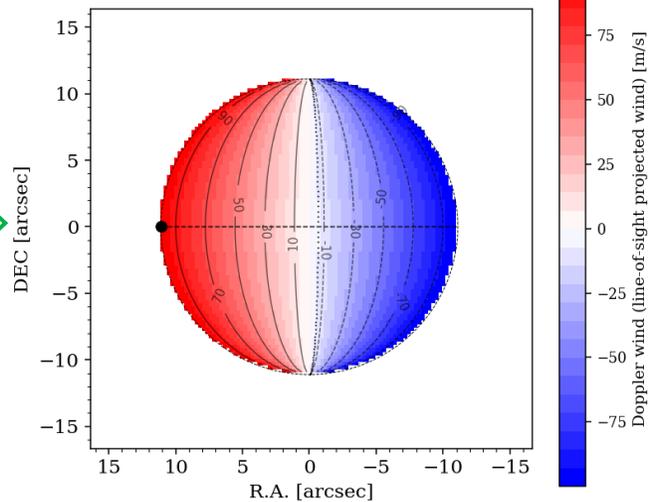
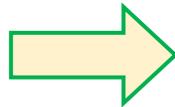
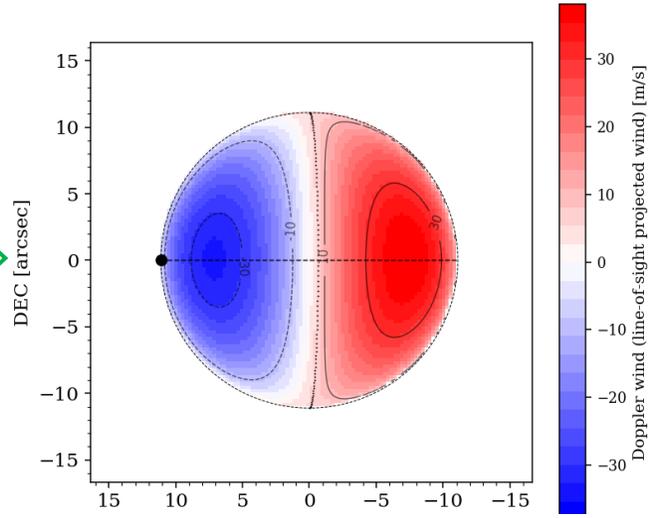
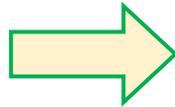
重要： 視線方向速度分布から水平面内の東西・南北風速への変換は (何かしらの仮定無しには) 不可能.

電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

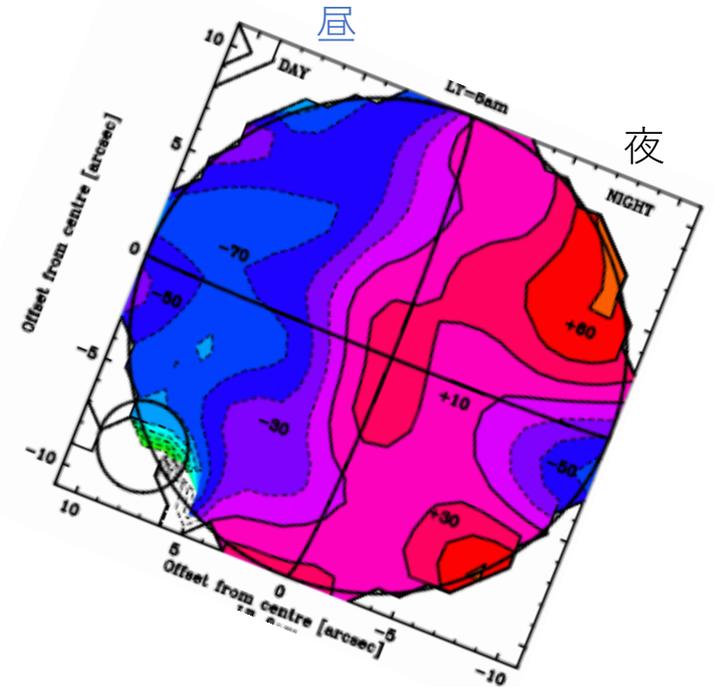
- 実際の観測データの例を見てみると… 解釈が難しい。



昼夜間対流
Sub-Solar-to-Anti-Solar



西向き高速帯状流
Super-Rotation

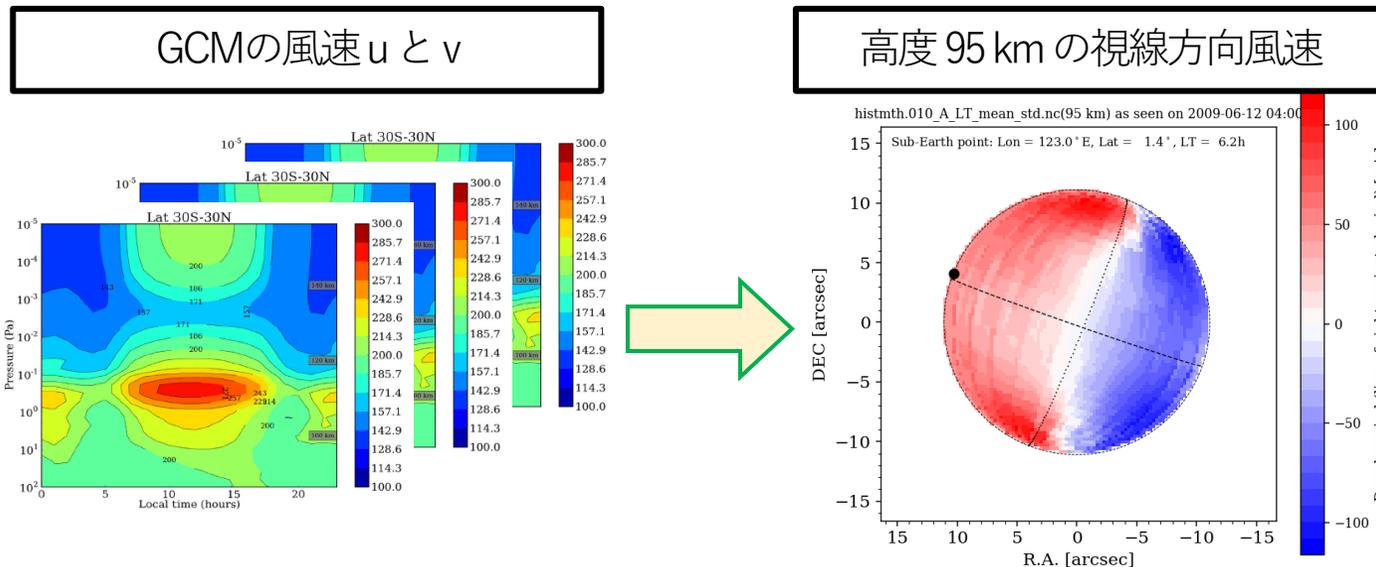


Moulet et al. (2012)

重要： 視線方向速度分布から水平面内の東西・南北風速への変換は (何かしらの仮定無しには) 不可能。

電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

- 現在取り組んでいる解析：Gabriella Gilliさん（リスボン天文台）らとの共同研究
観測データの視線方向速度分布を水平面内風速に翻訳するのではなく、
上層大気GCMで得られる水平面風速を観測ジオメトリの視線方向速度に変換して、
観測結果と比較。



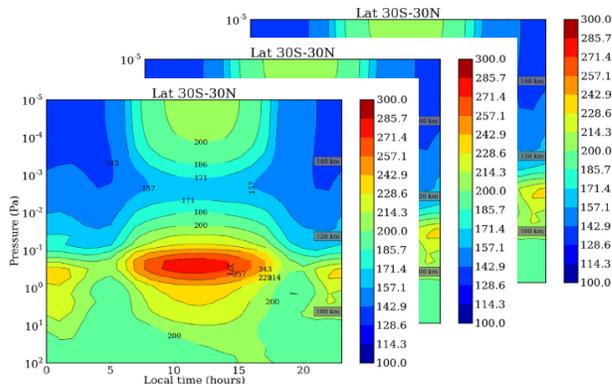
電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

- 現在取り組んでいる解析：Gabriella Gilliさん（リスボン天文台）らとの共同研究

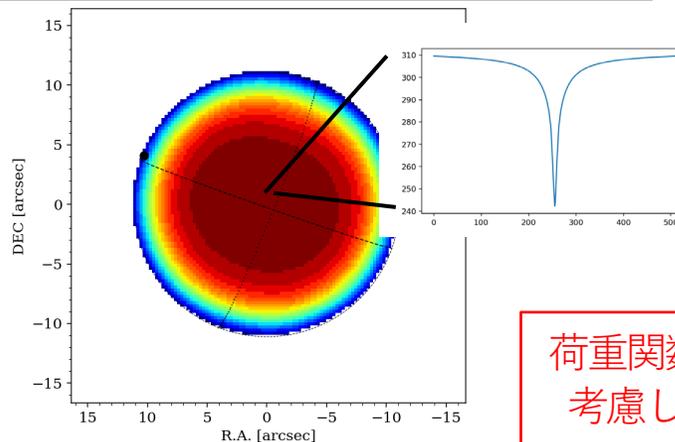
観測データの視線方向速度分布を水平面内風速に翻訳するのではなく、上層大気GCMで得られる水平面風速を観測ジオメトリの視線方向速度に変換して、観測結果と比較。

より正しく解析するため、**放射伝達計算を行いCOの疑似観測スペクトルを作成し、その疑似データを観測データと同様のドップラーシフト導出方法で処理。**

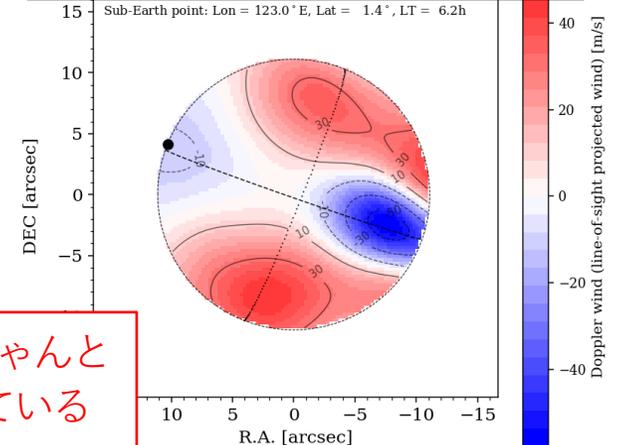
GCMのT,P,CO,風速uとv



金星COスペクトルをディスク上の各地点で放射輸送計算

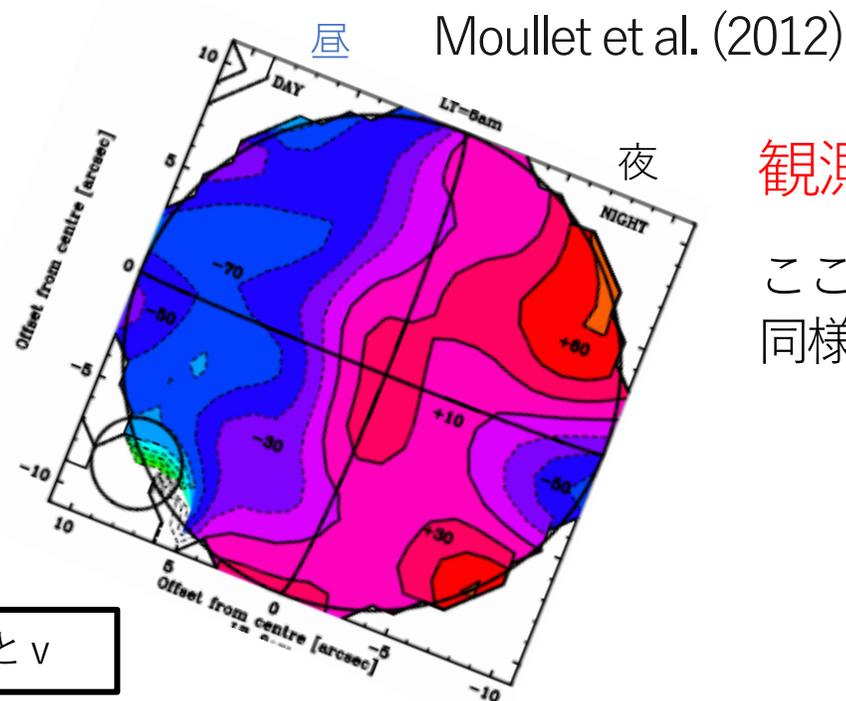


観測データと同様に解析して取得した視線方向速度分布



荷重関数の広がりをちゃんと考慮した解析になっている

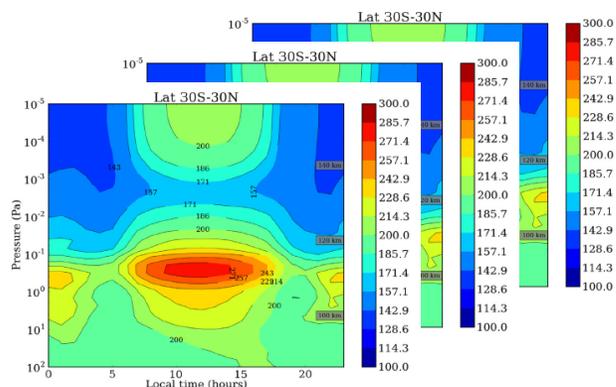
電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測



観測データを定性的に説明できる！

ここまでは、Hoshino et al. (2012) の東北大GCMでも同様の結果を得ていた。

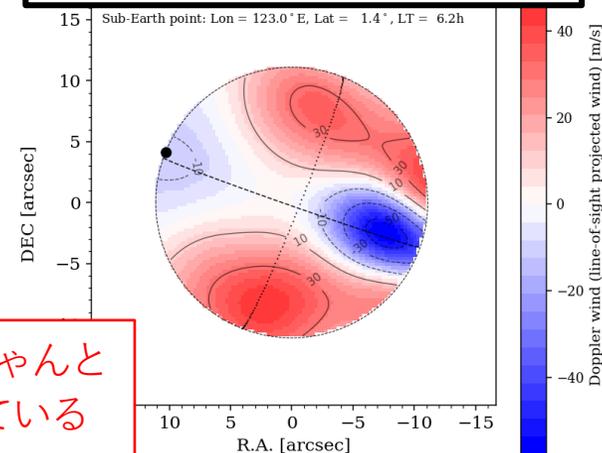
GCMのT,P,CO,風速uとv



金星COスペクトルをディスク上の各地点で放射輸送計算

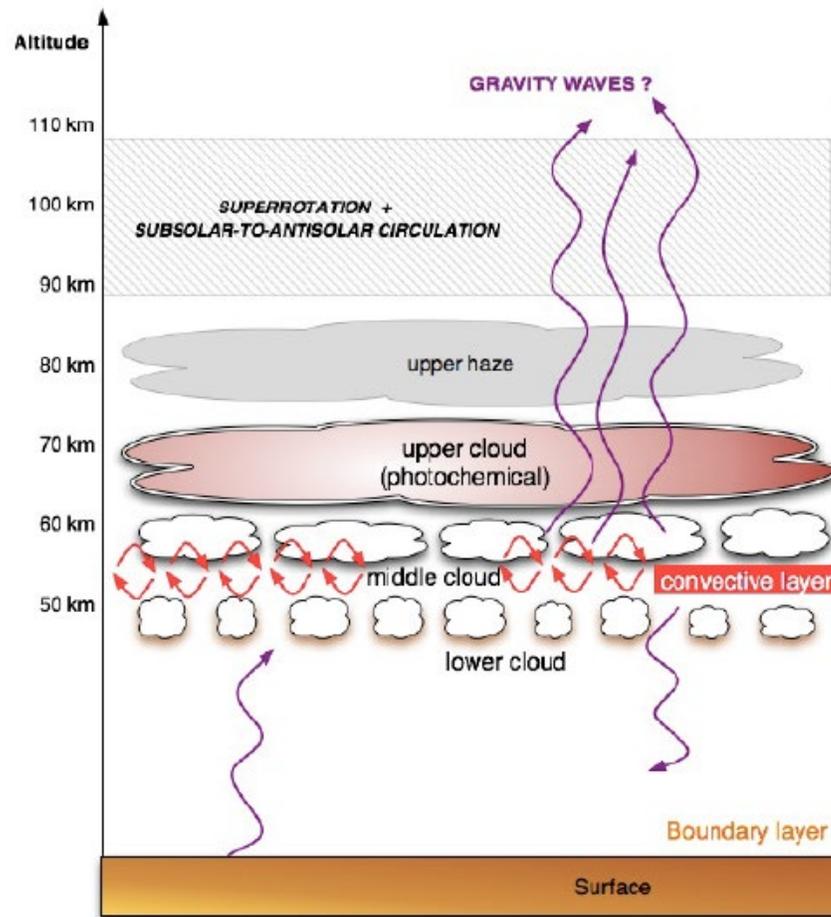
荷重関数の広がりをちゃんと考慮した解析になっている

観測データと同様に解析して取得した視線方向速度分布



電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

- 現在取り組んでいる解析：Gabriella Gilliさん（リスボン天文台）らとの共同研究
Gilli et al. (2013) のGCMでは非地形性の大気重力波を確率論的に発生させている。



- 重力波の生成パラメータは以下の通り：

発生高度 ~ 55 km.

EPフラックスの最大振幅 0.005 kg/m/s²

水平波長

位相速度

飽和/拡散に関するパラメータ

- このうち、水平波長と位相速度に関して幾つか値を振り、観測された視線方向速度分布と比較。

電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

比較したデータセット (観測 6 事例, GCM 3 例)

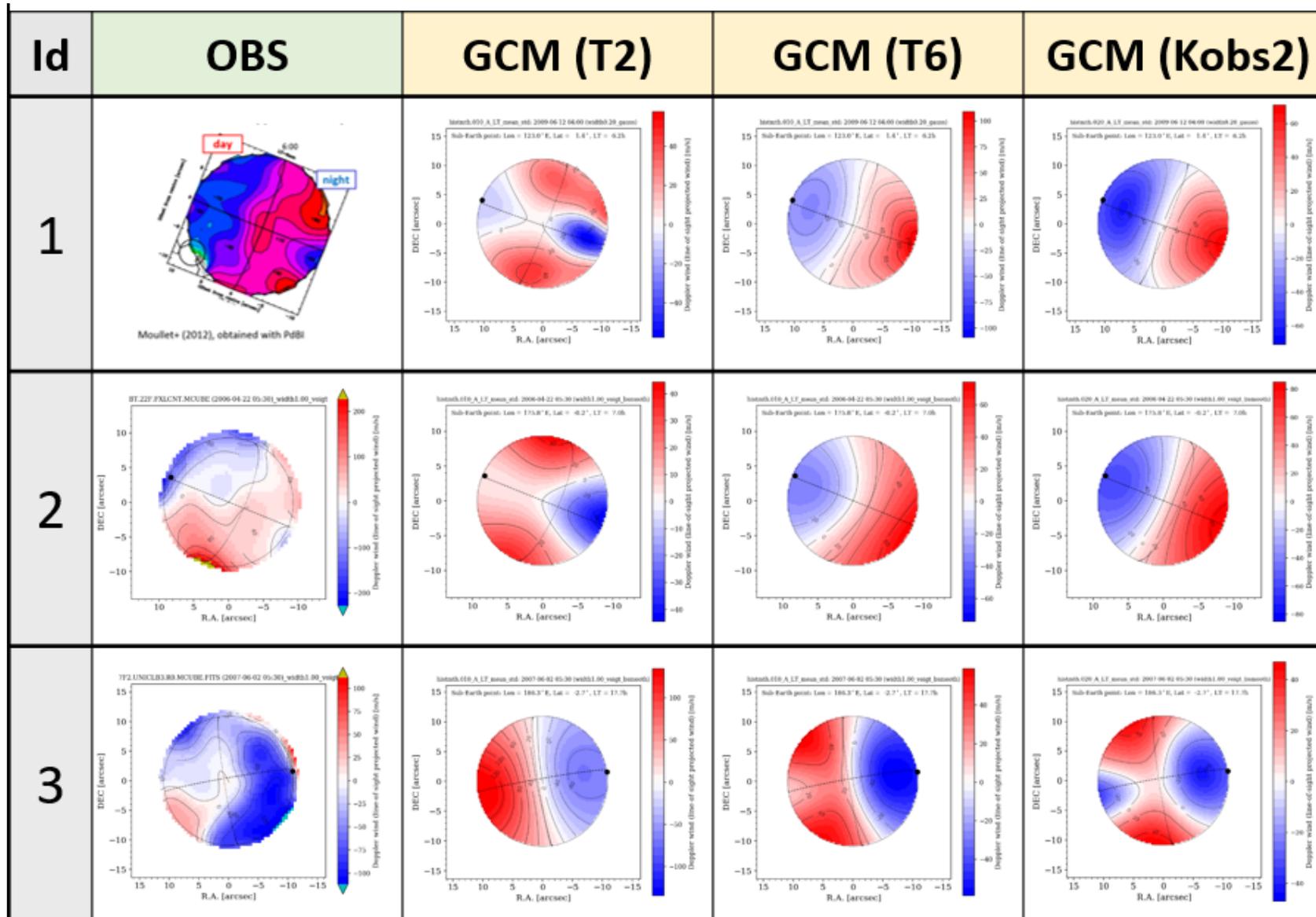
Doppler-wind maps obtained from CO (1 – 0) maps

Id	Venus diameter [arcsec]	Dayside Illuminated fraction (m = morning terminator is seen inside the apparent disk, e = evening terminator)	Spatial resolution [arcsec] (major axis x minor axis)	Observation date (Observatory name)
1	22.0	0.53 m	4.1 x 4.1	2009-06-12 (PdBI)
2	18.7	0.62 m	5.5 x 5.2	2006-04-22 (NMA)
3	21.9	0.53 e	5.0 x 4.4	2007-06-02 (NMA)
4	24.2	0.50 e	4.9 x 4.5	2004-04-01 (NMA)
5	29.2	0.42 e	5.4 x 2.3	2005-11-16 (NMA)
6	40.3	0.27 e	5.3 x 3.0	2005-12-08 (NMA)

Parameters for non-orographic GWs in the GCM

Id	Horizontal wavelength [km] (min – max)	Phase speed [m/s] (min – max)	EP-flux [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$]	Launch altitude [km]
T2	300 – 6000	1 – 111	0.005	~55
T6	50 – 1000	1 – 61	0.005	~55
Kobs	50 – 600	1 – 61	0.005	~55

電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

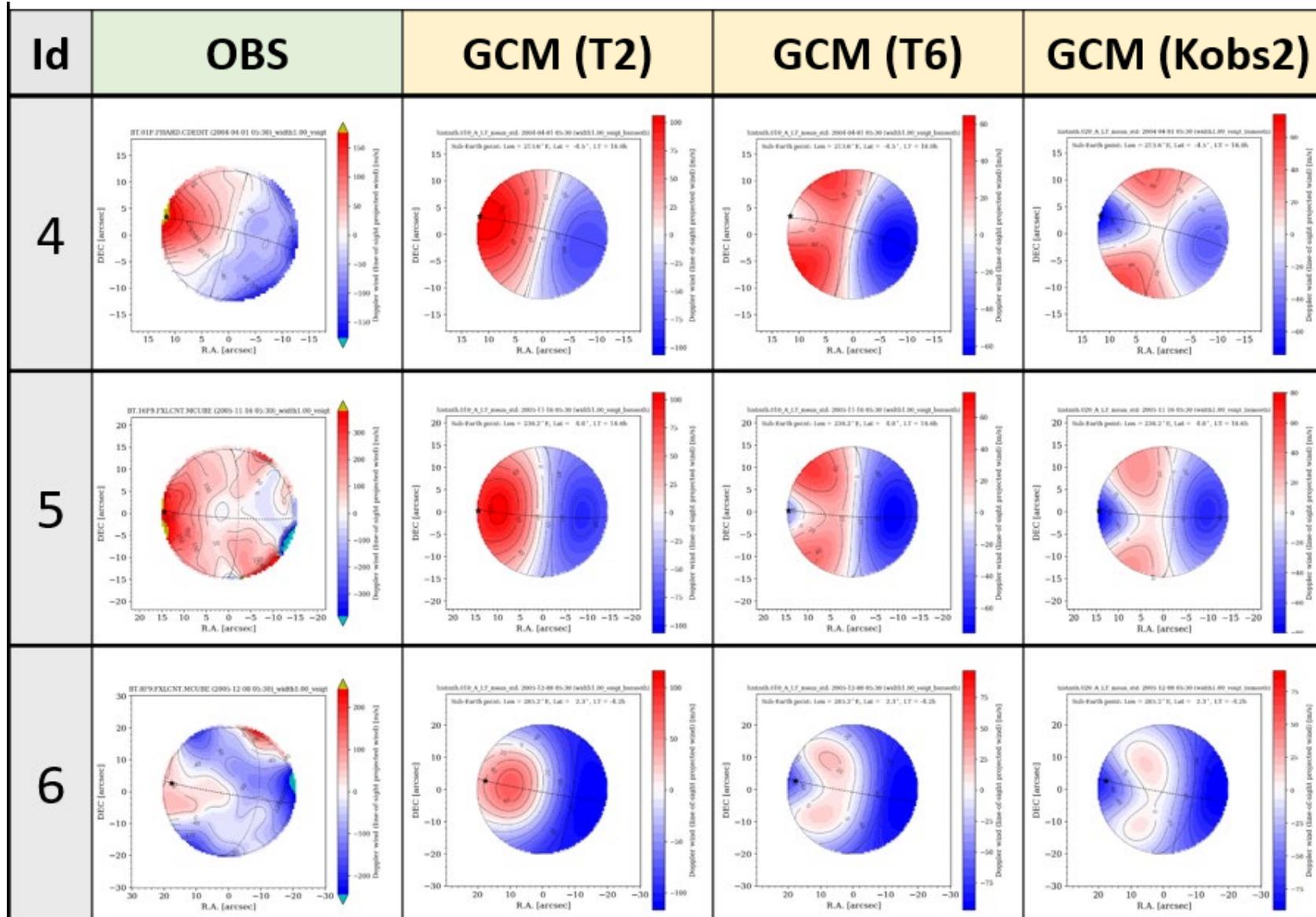


比較的、整合性が良さそうなのはT2のGCM。Kobs2は良いとは言えない。

一方、T2で想定している重力波のパラメータは必ずしも現実的では無い。

直ぐには結論が出ない状況。

電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測



電波干渉計による金星上層大気のドップラーシフト観測

今後の課題

- 観測との比較事例を増やす。GCMの重力波パラメータをもう少し振ってみる。
- GCMの重力波パラメータに対する視線方向風速分布の**感度を定量的に示す**。
- 観測データから気温場を推定できるデータもあり、GCMと気温場での比較を試みる。

Phosphine gas in the cloud decks of Venus

データ解析

化学反応・大気化学モデル (但し地球)

Jane S. Greaves^{1,2}✉, Anita M. S. Richards³, William Bains⁴, Paul B. Rimmer^{5,6,7}, Hideo Sagawa⁸,
David L. Clements⁹, Sara Seager^{4,13,14}, Janusz J. Petkowski⁴, Clara Sousa-Silva⁴, Sukrit Ranjan⁴,
Emily Drabek-Maunder^{1,10}, Helen J. Fraser¹¹, Annabel Cartwright⁷, Ingo Mueller-Wodarg⁹,
Zhuchang Zhan⁴, Per Friberg¹², Iain Coulson¹², Elisa Lee¹² and Jim Hoge¹²

電波天文屋さん (系外)

アストロバイオロジー専門家 (特に系外惑星)

Measurements of trace gases in planetary atmospheres help us explore chemical conditions different to those on Earth. Our nearest neighbour, Venus, has cloud decks that are temperate but hyperacidic. Here we report the apparent presence of phosphine (PH₃) gas in Venus's atmosphere, where any phosphorus should be in oxidized forms. Single-line millimetre-waveband spectral detections (quality up to ~15σ) from the JCMT and ALMA telescopes have no other plausible identification. Atmospheric PH₃ at ~20 ppb abundance is inferred to be produced by either lightning, volcanic activity, or by analogy with biological processes on Earth. The gas was sought, while in situ cloud and surface measurements were taken.

Author contributions

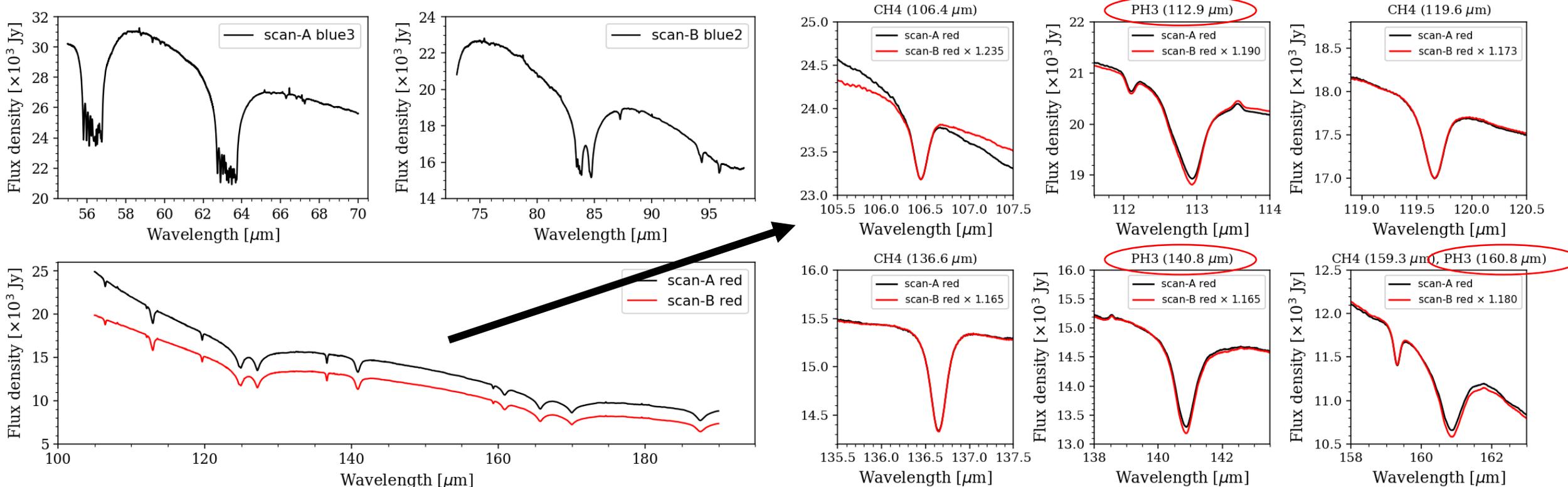
J.S.G. and A.M.S.R. analysed telescope data; H.S. developed a radiative transfer model; J.J.P. and W.B. worked out chemical kinetics and thermodynamics calculations; P.B.R., S.R., J.J.P., W.B. and S.S. worked on photochemistry; C.S.-S provided spectroscopic expertise and line parameter analysis; A.C., D.L.C., E.D.-M., H.J.F., C.S.-S., S.S., I.M.-W. and Z.Z. contributed expertise in astrochemistry, astrobiology, planetary science and coding; P.F., I.C., E.L. and J.H. designed, made and processed observations at the JCMT. J.S.G., A.M.S.R., W.B., J.J.P., D.L.C., S.S. and P.B.R. wrote the paper.

Greaves et al. (2020) について (注: 佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

- そもそも PH₃ とは何なのか, なぜ金星でその分子を探したのか.

P = リン. いわゆる地球生命構成元素 CHNOPS の一つ.

PH₃ = リン化水素. ホスフィン. 木星や土星大気には存在する微量成分.



木星大気の遠赤外線スペクトル (Sagawa et al., in prep.)

Greaves et al. (2020) について (注: 佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

- そもそも PH_3 とは何なのか, なぜ金星でその分子を探したのか.

P = リン. いわゆる地球生命構成元素 CHNOPS の一つ.

PH_3 = リン化水素. ホスフィン. 木星や土星大気には存在する微量成分.

木星などでは大気深部の高温高压領域で P と H が結合して生成.
その後, 大気循環で対流圏上部に輸送されてきたものが観測されている.

一方, 地球では… ppt ~ ppb レベルでしか存在しない微量成分.

無機的な生成ソースは極めて限定的で, 嫌気性のバクテリアの代謝反応で生成.

酸素が多数存在する大気下では, 酸素と結合したリン酸塩として存在.

Greaves et al. (2020) について (注：佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

- そもそも PH₃ とは何なのか、なぜ金星でその分子を探したのか。

ASTROBIOLOGY
Volume 20, Number 2, 2020
© Mary Ann Liebert, Inc.
DOI: 10.1089/ast.2018.1954

Phosphine as a Biosignature Gas in Exoplanet Atmospheres

Clara Sousa-Silva,^{1,2} Sara Seager,¹⁻³ Sukrit Ranjan,^{1,4} Janusz Jurand Petkowski,¹ Zhuchang Zhan,¹
Renyu Hu,^{5,6} and William Bains⁷

Sousa-Silva et al. (2020) : **PH₃ を系外惑星 (岩石型) における生命探査指標として提案.**

CH₄と異なり、非生命由来による偽陽性の可能性が低い。難点は反応性の高さ。

JWSTを用いても系外惑星での PH₃ の検出には数十時間以上の積分が必要。

Greaves et al. (2020) について (注：佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

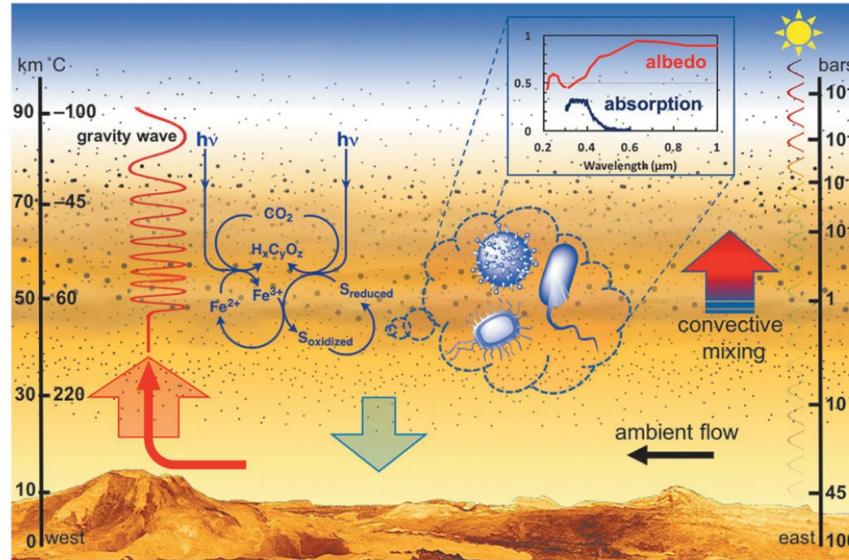
- 金星の雲層が生命に適した環境という説は昔からあった。

PLANETARY SCIENCE

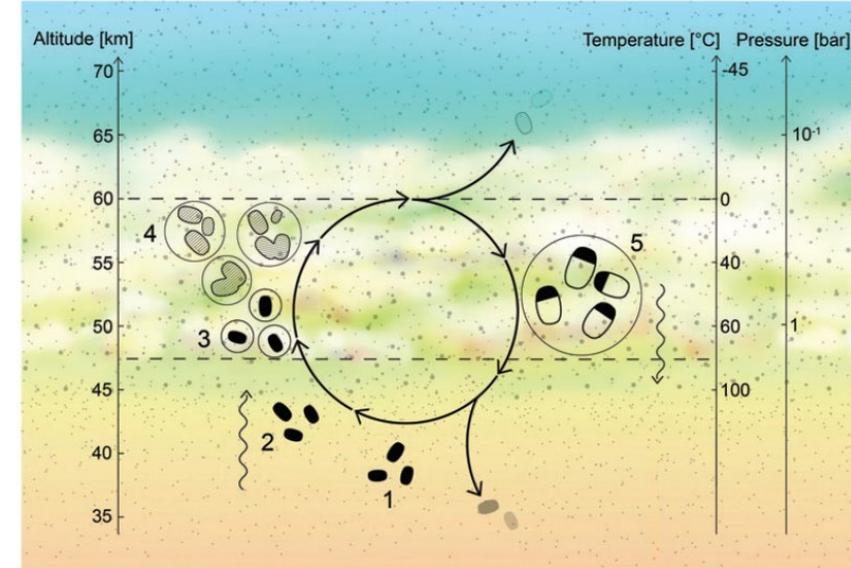
Life in the Clouds of Venus?

WHILE the surface conditions of Venus make the hypothesis of life there implausible, the clouds of Venus are a different story altogether. As was pointed out some years ago¹, water, carbon dioxide and sunlight—the prerequisites for photosynthesis—are plentiful in the vicinity of the clouds. Since then, good additional evidence has been provided that the clouds are composed of ice crystals at their tops^{2,3}, and it seems likely that there are water droplets toward their bottoms⁴. Independent evidence for water vapour also exists⁵. The temperature at the cloud tops is about 210° K, and at the cloud bottoms is probably at least 260–280° K (refs. 4 and 6). Atmospheric pressure at this temperature level is about 1 atm.⁷ The observed planetary albedo falls steeply in the violet and ultra-violet⁸, which accounts for the pale lemon yellow colour of Venus. The albedo decline would not be expected for pure ice particles, and must therefore be caused by some contaminant. Dust, ozone, C₃O₂ and other gases may possibly explain these data but, whatever the explanation, the ultra-violet flux below the clouds is likely to be low. If small amounts of minerals are stirred up to the clouds from the surface, it is by no means difficult to imagine an indigenous biology in the clouds of Venus. What follows is one such speculation.

Morowitz & Sagan (Nature, 1967)



Limaye et al. (2018)



Seager et al. (2020)

金星大気の高度 50 – 60 km付近は気温・気圧が摂氏 数十°C前後、1 気圧という環境。

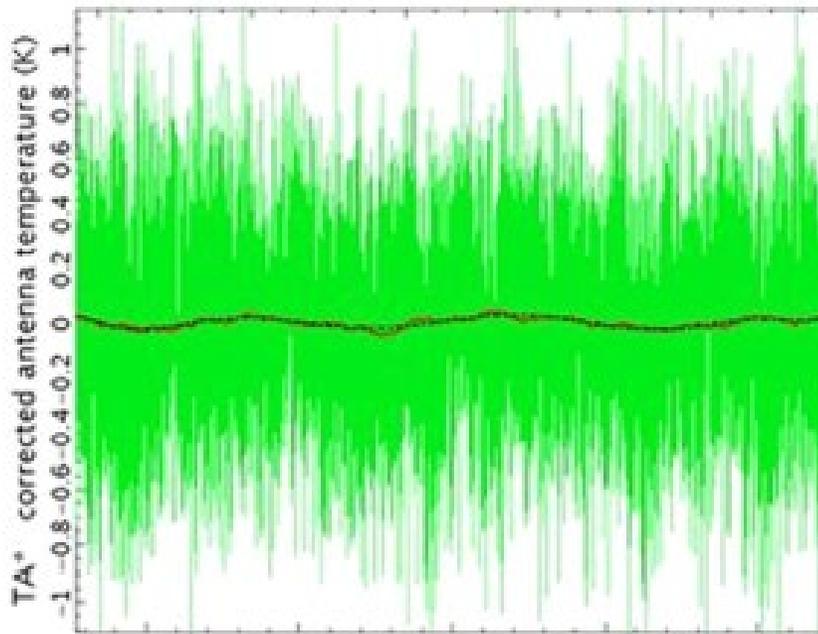
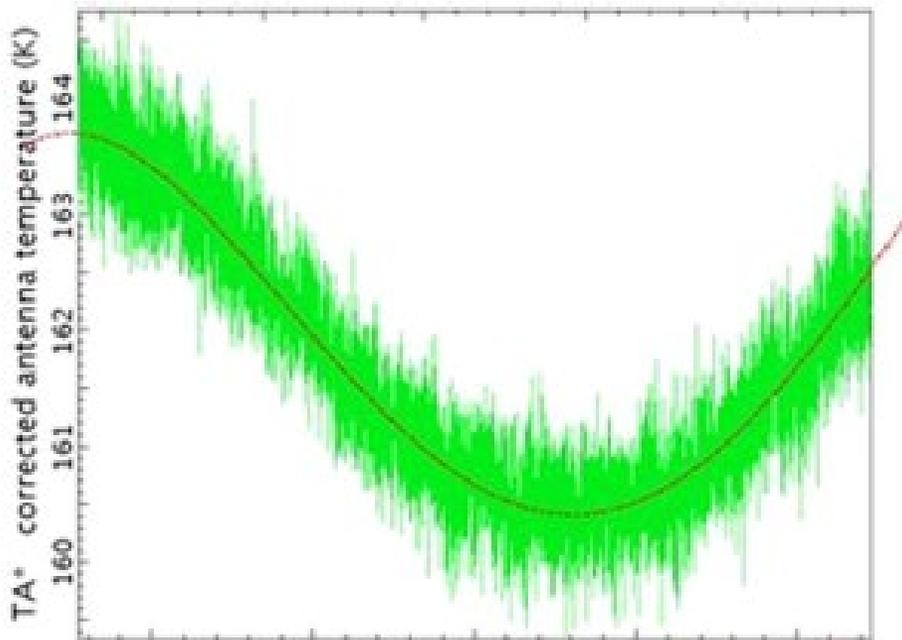
周囲に濃硫酸の雲が広がる酸性度の高さは難点だが、水滴の方に潜り込めば(?) 快適な環境なのかも?

Greaves et al. (2020) について (注: 佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

- ハワイのサブミリ波望遠鏡 JCMT と チリの ALMA 望遠鏡での観測.
- 観測したスペクトルデータの解析が非常にテクニカル:
金星大気からの非常に明るい熱放射が、定在波として観測スペクトルに重なる.

→ この定在波を除去する方法の信頼性が肝.

(そして、このポイントが現状で多数の反論を受けている所)



左: JCMT で取得された金星スペクトル. ここから4次式でベースラインを補正したものが右図(ここまではOKかも).

Greaves et al. (2020) について (注: 佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

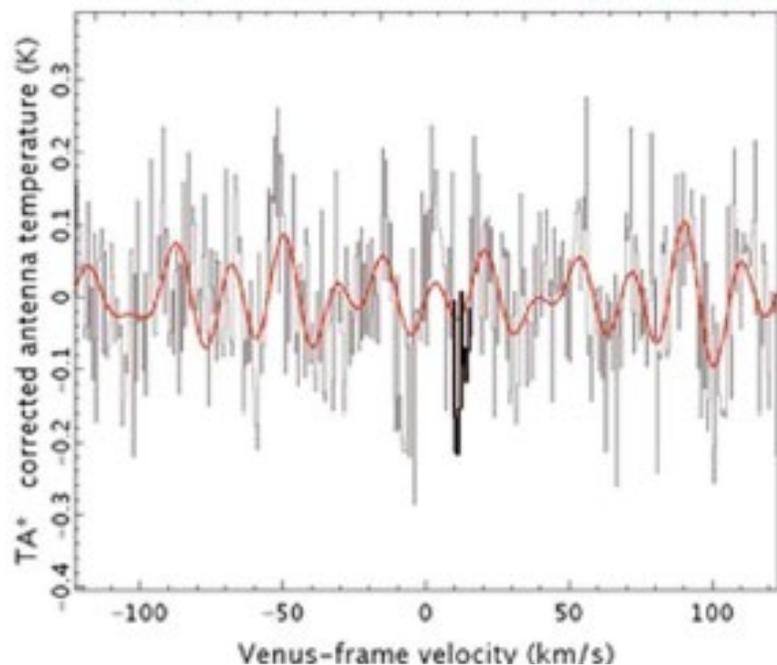
- ハワイのサブミリ波望遠鏡 JCMT と チリの ALMA望遠鏡での観測.

- 観測したスペクトルデータの解析が非常にテクニカル:

金星大気からの非常に明るい熱放射が、定在波として観測スペクトルに重なる.

→ **この定在波を除去する方法の信頼性が肝.**

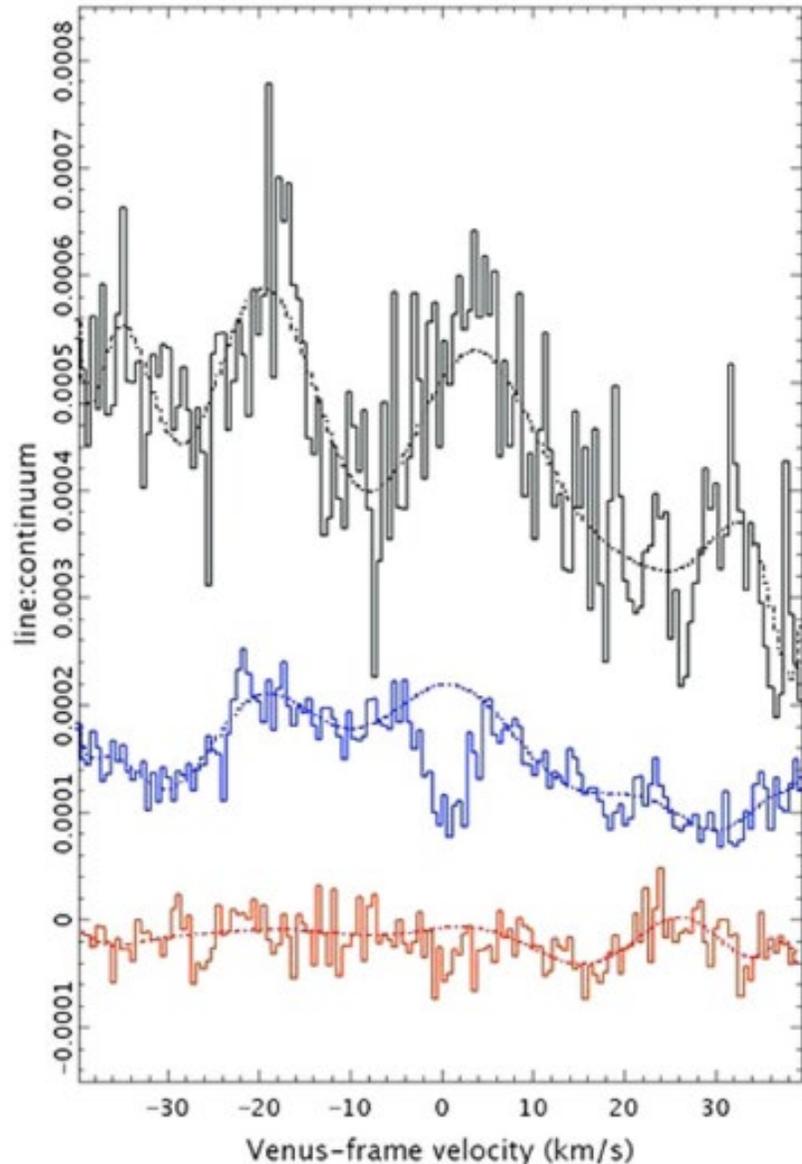
(そして、このポイントが現状で多数の反論を受けている所)



左: そして、メジアンフィルターでノイズを落とし、さらに9次(!)の多項式で細かなリップル(うねり)を除去.

観たい PH3 の吸収線と同じような線幅でのうねりを多項式フィットで除去しているため、**PH3 のライン部分に artefactを作ってしまうのでは?** という懸念も.

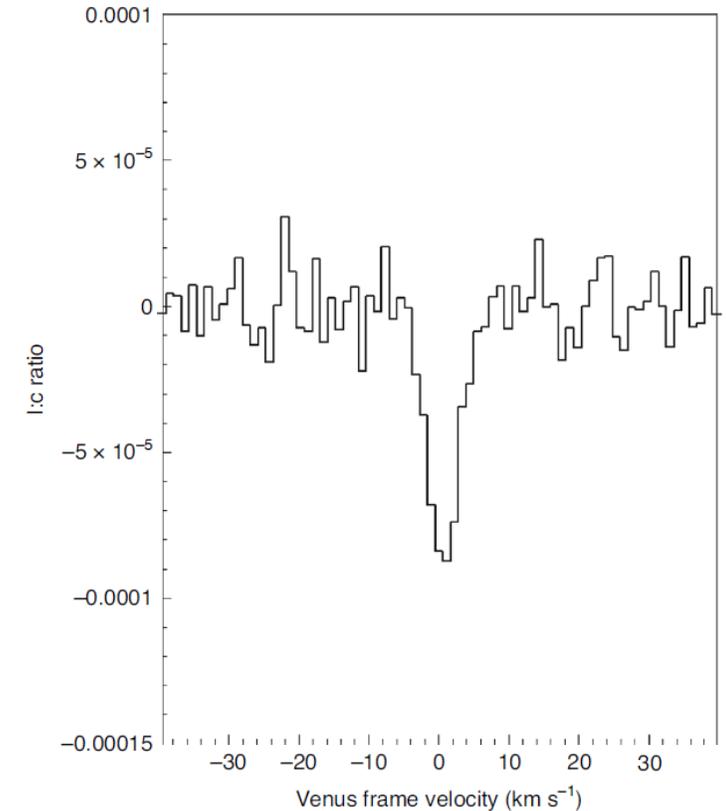
Greaves et al. (2020) について (注: 佐川の「個人的な」意見を多々含みます)



- ALMAのデータも、明るい金星本体からの放射の影響を除去するために、細かい空間周波数成分のみを利用。
- それでも観測スペクトルには定在波が乗る。

左: ALMAデータの解析. 異なる緯度帯を帯状に平均したデータに, 12次(!)の多項式をフィッティング.

右: 最終的なALMAデータ (赤道域). 縦軸は連続波レベルに対する吸収線の相対的深さ... **0.0001** という微弱な信号.



Greaves et al. (2020) について (注: 佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

- 論文発表後, 1か月もしないうちに反証論文が arXiv に投稿される.

Snellen et al. (2020) – ALMAデータの検証解析.
多項式フィットの統計的有意性が無いことを指摘.

Thompson (2020) – JCMTデータの検証解析.
同じく多項式フィットに関して, bootstrap法を用いて反証.

Villanueva et al. (2020) – Matters Arisingとして Nature Astron. に投稿.

Greaves et al. (2020) について (注：佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

- 論文発表後、1か月もしないうちに反証論文が arXiv に投稿される。

Villanueva et al. (2020) – Matters Arisingとして Nature Astron. に投稿。

No phosphine in the atmosphere of Venus

Villanueva G.L., Cordiner, M., Irwin P., de Pater I., Butler B., Gurwell M., Milam S.N., Nixon C. A., Luszcz-Cook S. H., Wilson C., Kofman V., Liuzzi G., Faggi S., Fauchez T., Lippi M., Cosentino R., Thelen A. E., Moullet A., Hartogh P., Molter E.M., Charnley S., Arney G.N., Mandell A.M, Biver N., Vandaele A.C., de Kleer K. R., Kopparapu R.

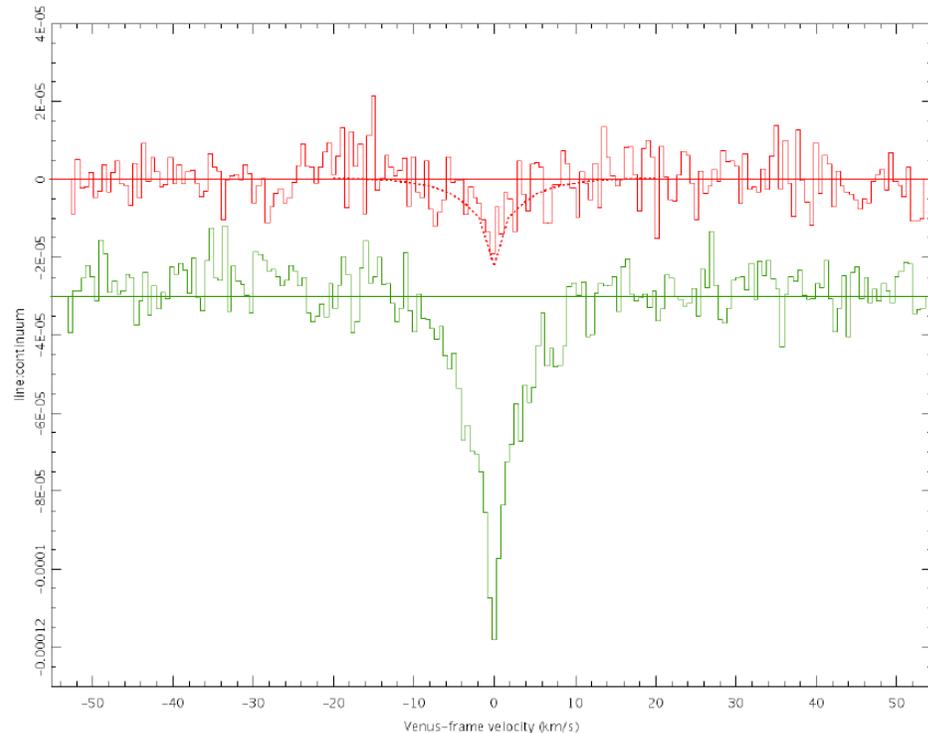
Submitted on October 26th 2020 to Nature Astronomy as a “Matters Arising” article

Submitted on October 21st 2020 to Jane Greaves and Luca Maltagliati (Nature Astronomy editor)

(共著者の顔ぶれがすごい)

Greaves et al. (2020) について (注: 佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

- ALMAデータのキャリブレーションに一部間違いがあったことが判明
ESOによる再キャリブレーションが行われる。
- Greaves et al. による Matters Arising への反論コメントが投稿。



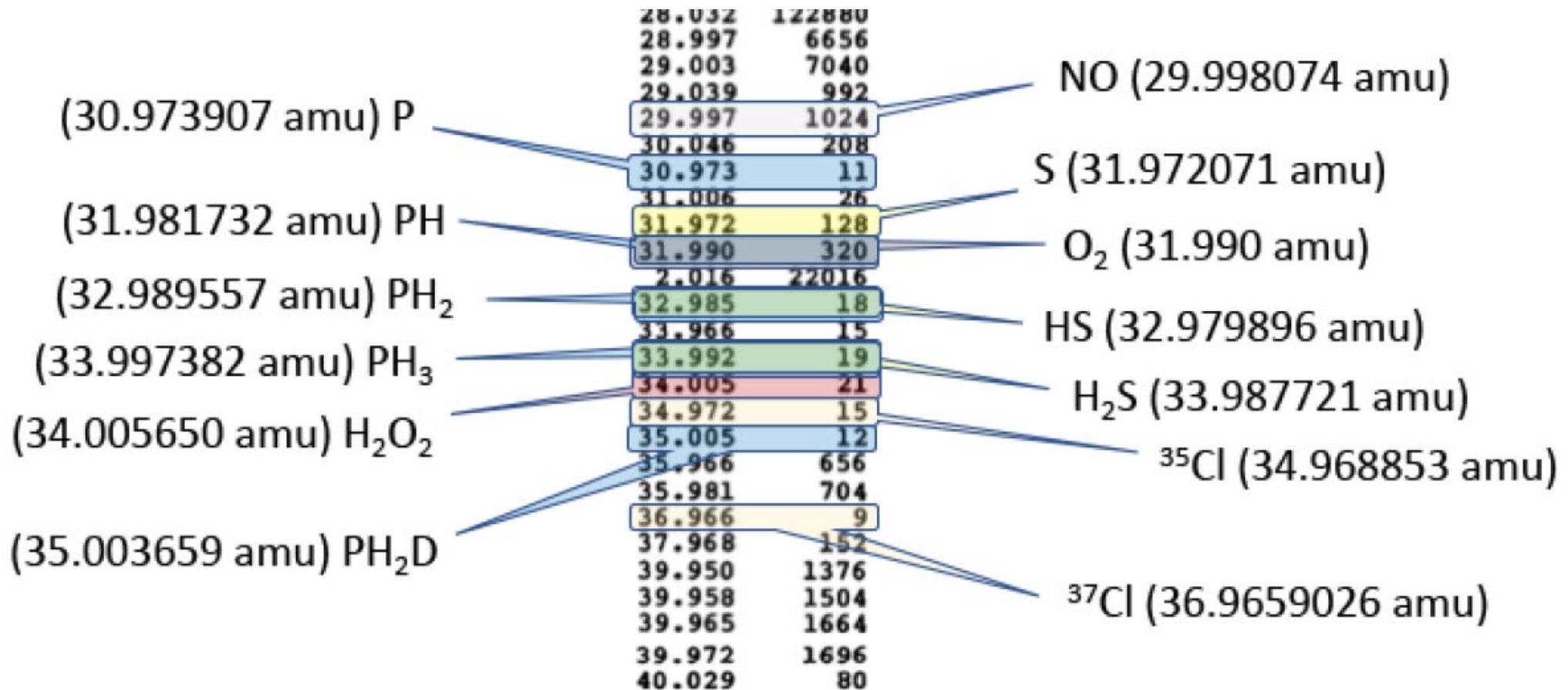
再キャリブレーションされたALMAデータの再解析を行った結果, PH₃ のシグナルは弱くなった (弱いなりに見えているという主張).

左: ALMAデータの再解析結果.
上の赤いスペクトルが PH₃. 下の緑は HDO.

Greaves et al. (2020) について (注: 佐川の「個人的な」意見を多々含みます)

- PH₃の存在を支持する(?) 声も:

Mogul et al. (2020) – Pioneer Venusプローブの質量分析器データの再確認.

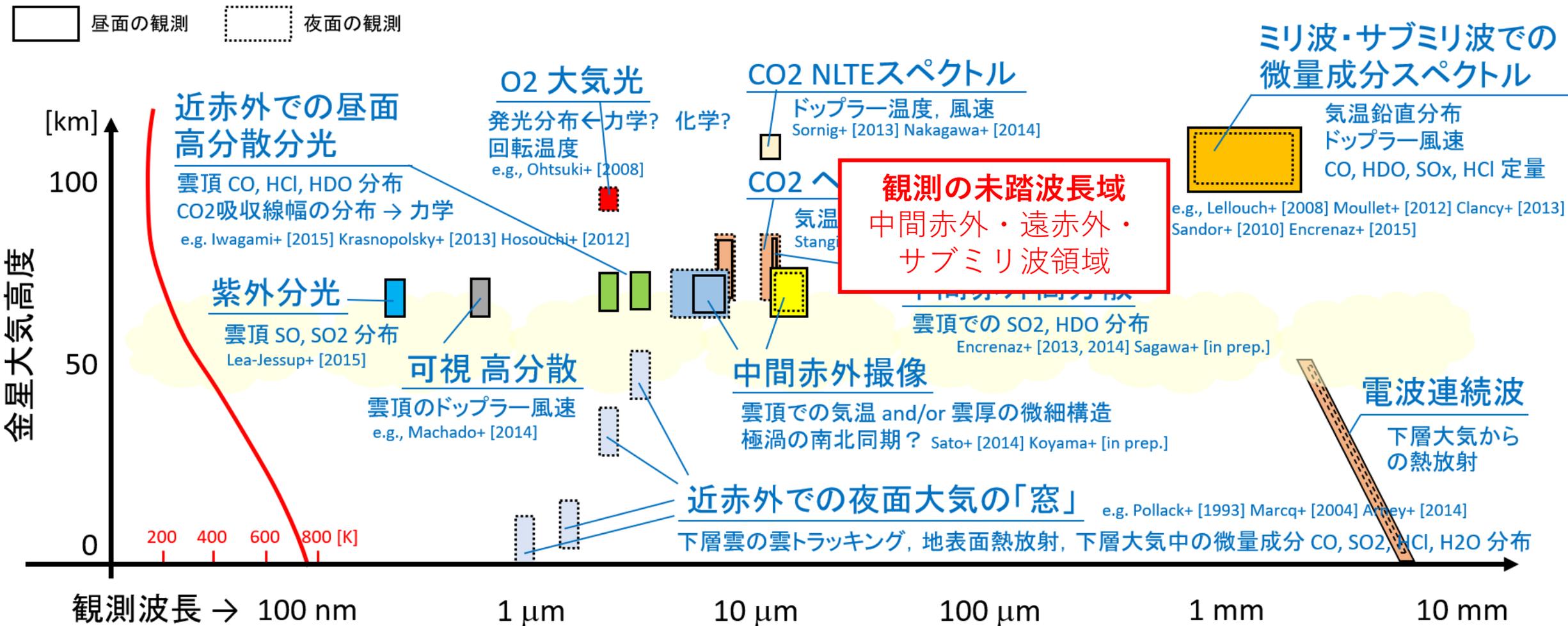


今後の課題

- **追加観測** (他の波長でも) が重要.
Greaves et al. (2020) も元々は tentative detection という論調だったのに…
- 複数の研究グループによるデータ解析の検証も必要.
Greaves et al. (2020) で良かった(?) は, データ解析のスク립トを全て公開した点.
- 存在量が微量すぎる → 本当にあるかどうかをリモセンで判断するのは難しいという
のも率直な感想.

まとめに代えて：今後の展望

光学的厚みが ~ 1 より深いところは見えない。 基本的には雲より上。



まとめに代えて：今後の展望

将来的には、探査機を利用した大気微量成分観測が実現すると画期的。

観測機器の案

サブミリ波放射計 (分光)
limb視

中間赤外分光器 (分光)
nadir視

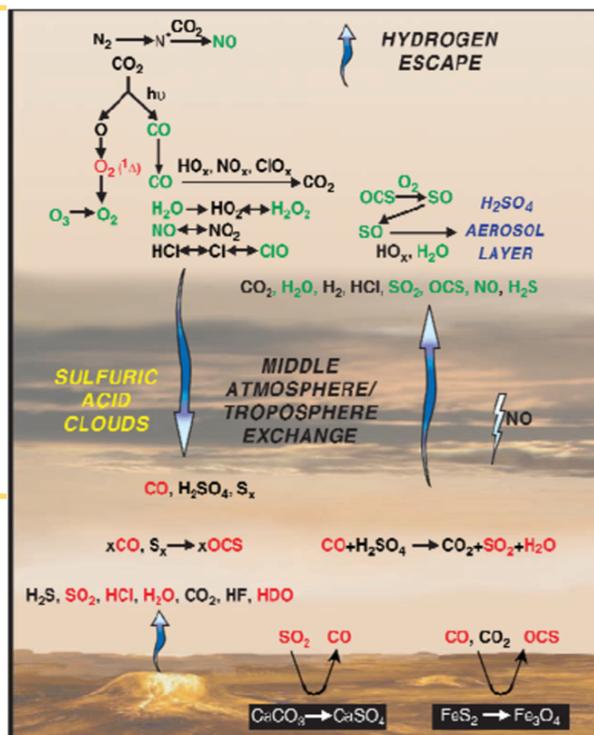
紫外分光器 (分光)
limb視 (太陽・星掩蔽)

電波掩蔽

ESAのEnVisionは、SARやRaderを用いた地表面と大気の相互作用を調べるのが目的のミッション

サブミリ波帯を使った金星探査機は存在しない。現時点で計画もない。中間赤外分光観測は周回機ではVenera 15まで遡る(フライバイ観測として、BepiColomboがある)。Venera Dには搭載予定。

佐藤隆雄さん(北海道情報大)提供のスライド



紫外～近赤外偏光
撮像装置
nadir視

近赤外分光撮像装置
nadir視 (limb視)

メモ：O₂大気光の高度分布を取得するため、近赤外分光撮像装置のlimb視も必要そう…