

ALMA 望遠鏡による火星大気観測：フラックス較正の問題点について

佐川 英夫^{1*}, 青木 翔平², Kazi Rygl³, Eric Villard⁴

1. 京都産業大学 2. ベルギー・リエージュ大 3. イタリア・INAF 4. ヨーロッパ南天天文台

アルマ望遠鏡（アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計，以下 ALMA）は、ミリ波・サブミリ波帯において他に類を見ない高感度と高空間分解能を実現する地上観測施設である。その観測性能は太陽系内天体の観測にも威力を発揮し、タイタン大気における複雑な有機分子の発見など、様々な科学的成果がもたらされている[e.g., 1, 2]。その一方で、太陽系内天体の惑星、特に金星・火星・木星・土星などの視直径が 10 秒角以上になるような惑星の観測には、resolve out という観測手法特有の問題が付きまとう。Resolve out とは、干渉計が、ある有限の大きさよりも広がった電波源構造に対して感度が無いために生じる問題である。例えば、一様に広がった電波源を干渉計で観測しても、得られる電波マップではその一様な空間分布が再現されない[3]。Resolve out してしまった輝度成分は惑星の輝度分布モデルなどの外部情報を用いて補正する必要がある。この補正をする際、元々の観測データの輝度が正しく較正されていることが、最終的に正しい電波マップを得るための重要な前提条件となる。

2019 年、広がった構造を持つ天体を観測対象とした ALMA のフラックス較正に関して、無視できない問題点があることが発表された[4]。ALMA は干渉計で取得した相互相関ビジビリティを各アンテナ素子での自己相関ビジビリティ（①）で規格化したものを観測データとして取得する。この規格化されたビジビリティを元の物理的に意味が有る放射輝度に較正する際には、観測対象から少し離れた場所の地球大気（スカイ）の放射を測定した Tsys 測定と呼ばれるシグナル（②）を乗算している。ここで、①と②が完全に一致しないことは自明であるが、ALMA が観測するような「暗い」観測対象の①は前景の地球大気からの放射が支配的となり、②と似た値となる。しかし、広がった、非常に明るい電波源構造を持つ惑星に関しては①と②の解離が激しくなり、その結果、ALMA データのフラックス較正に有意な誤差が導入されるというのがこの問題の内容である（詳細は ALMA からの公式発表[4]を参照のこと）

我々は ALMA によって得られた火星データを解析していく中で、以下の問題点を確認した。

- [a]. フラックス較正済みデータの放射輝度が、火星大気モデルから予想される輝度に対して有意に低い。
 - [b]. ALMA 12m アンテナ干渉計と 7m アンテナ干渉計 ACA とで較正済みフラックスに有意な差が有る。
 - [c]. ALMA データから導出した火星中間大気の流れ分布が火星大気大循環モデルの予想と著しく異なる。
- 次項以降に添付した発表資料では、これらの問題がフラックス較正の問題[4]に起因するものかどうかを検証した。その結果、[a]および[c]に関しては、[4]の問題が確かに影響を及ぼしていることが分かった。現在、問題[4]を（可能な限り）解決するための再キャリブレーション方法の構築を進めている。

[1] Moullet et al. (2015), ASP Conf. 499, 295. [2] 佐川 (2017), 天文月報 110, 317. [3] Butler and Bastian (1999), ASP Conf. 180, 625. [4] <https://help.almascience.org/kb/articles/what-errors-could-originate-from-the-correlator-spectral-normalization-and-tsys-calibration>

ALMA望遠鏡による火星大気観測 フラックス校正の問題点について

佐川 英夫 (京都産業大学)

青木 翔平 (ベルギー・リエージュ大),

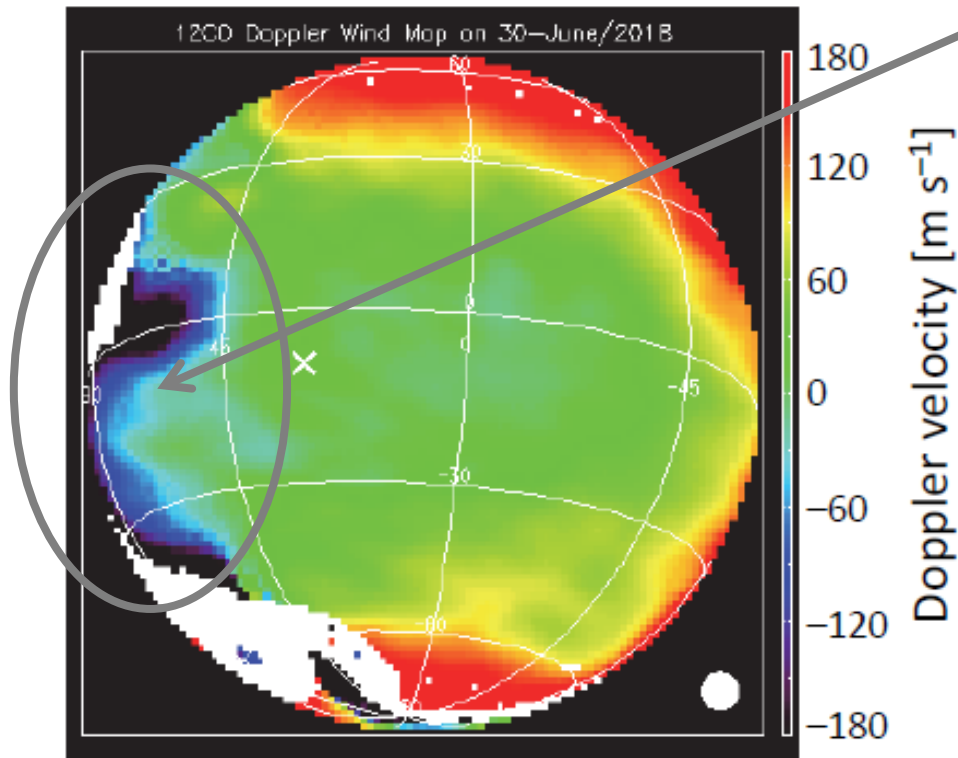
Kazi Rygl (イタリア・INAF), Eric Villard (ESO)

発端

- ALMAの火星観測データから求めた風速分布 (高度 $\sim 40 - 60$ km) が、GCMから予想される風速分布と大きく異なっている。

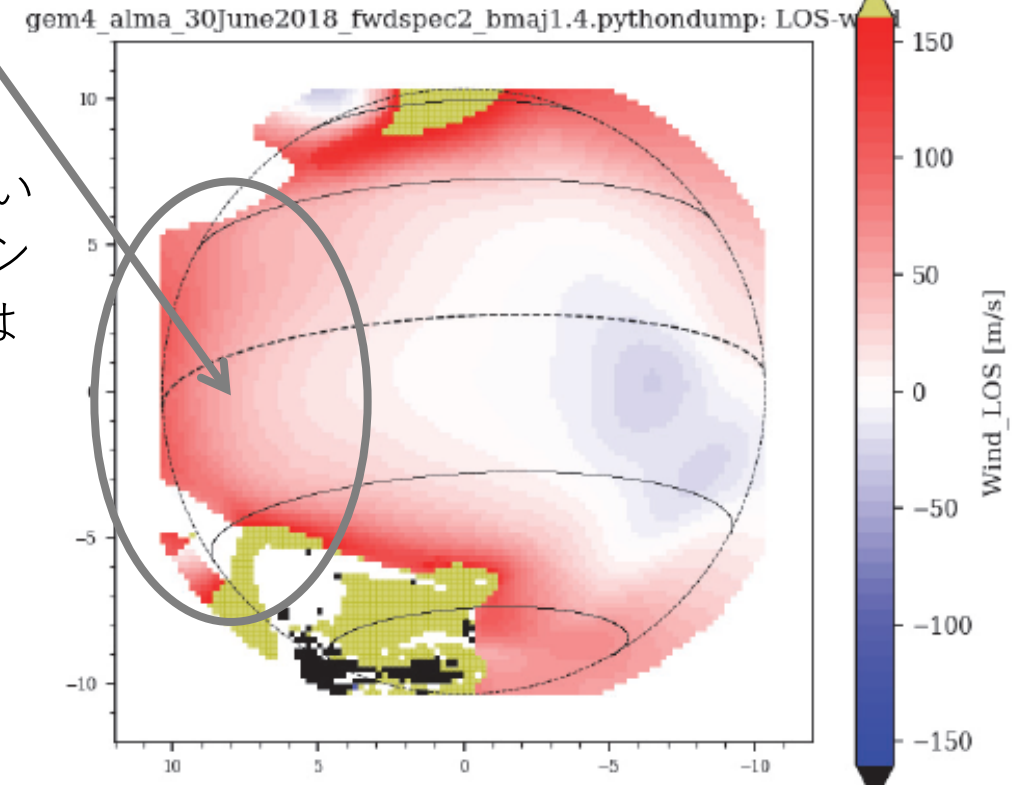
→ 事実であればサイエンス的にインパクト大だが… 本当であろうか？

ALMAデータから求めた風速分布



観測データでは西側リムが強いブルーシフト (西風のセンス) になっている一方で、GCMのシミュレーションではレッドシフト (東風のセンス) に。

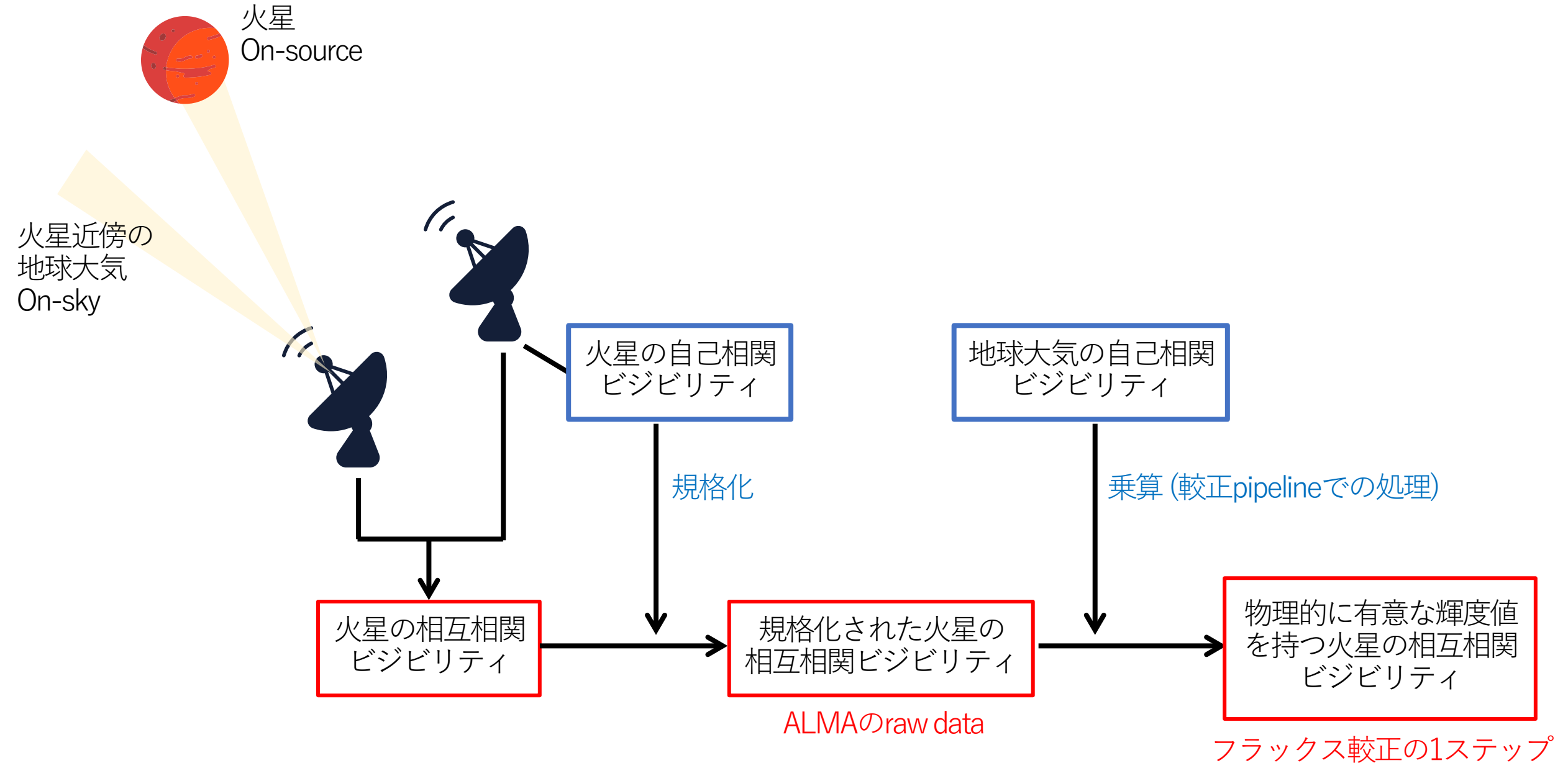
GCMデータを元にALMA観測を模擬して得られた風速分布

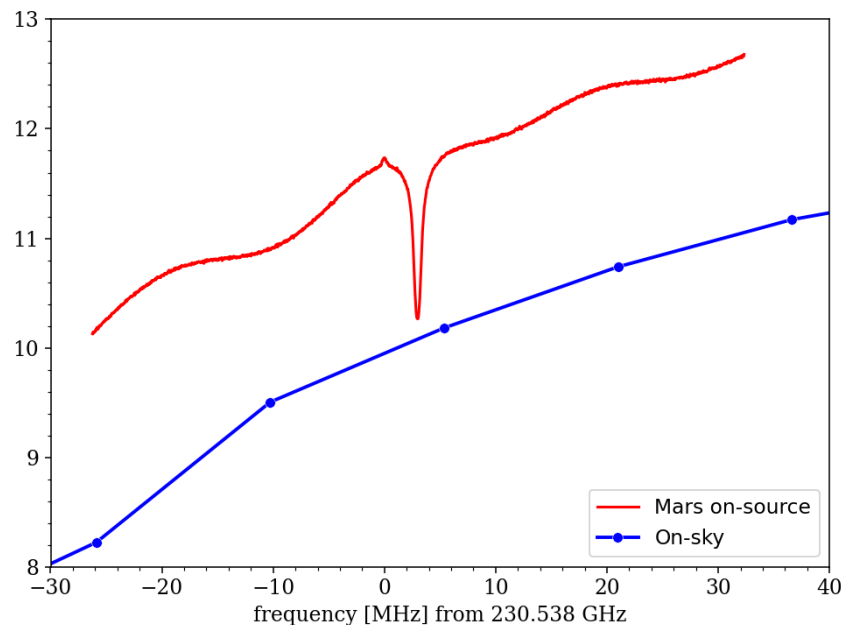
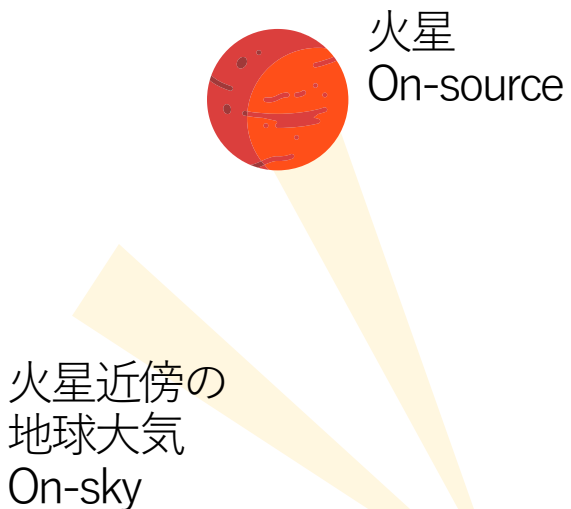


その後、分かってきたこと

- 端的に言うと、ALMAのデータ取得(記録)方法とフラックス較正方法が、火星のような「明るすぎる」天体には不具合をもたらす。
- ALMA側からの情報は ALMA Knowledge Base
<https://help.almascience.org/kb/articles/what-errors-could-originate-from-the-correlator-spectral-normalization-and-tsys-calibration> を参照のこと。
- その結果、スペクトルのフラックス密度の絶対値に誤差が生じるだけではなく、**スペクトルの形状そのもの**にも誤差が生じることに。
→ スペクトルの形状から導出する気温分布や風速分布に誤差が伝搬。

現状でのALMAのデータ取得・フラックス校正方法

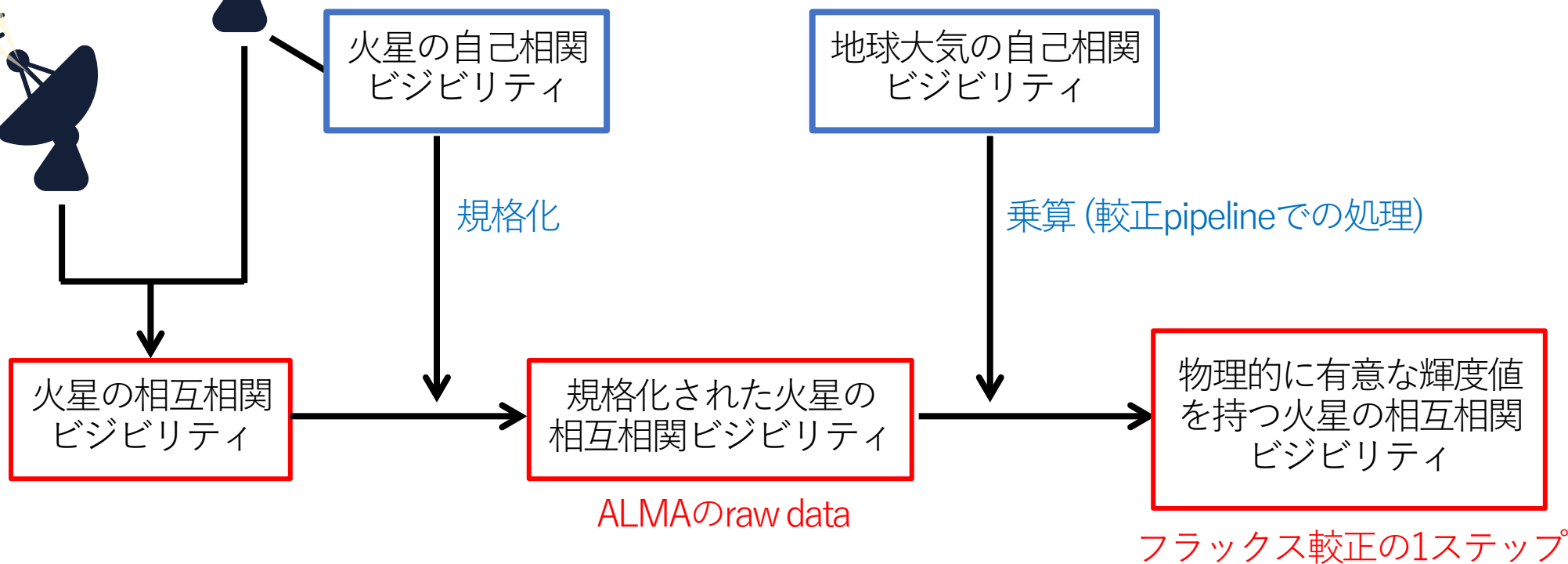




Red = 火星の自己相関 (実観測データ)

Blue = 地球大気の自己相関 (実観測)

火星の自己相関には (当然ながら) 火星のCOラインが含まれるが、一方で、地球大気の自己相関には火星のCOラインは (当然ながら) 含まれない。
規格化する際の分母とそれを復元する際の乗算係数とが**一致しない**。

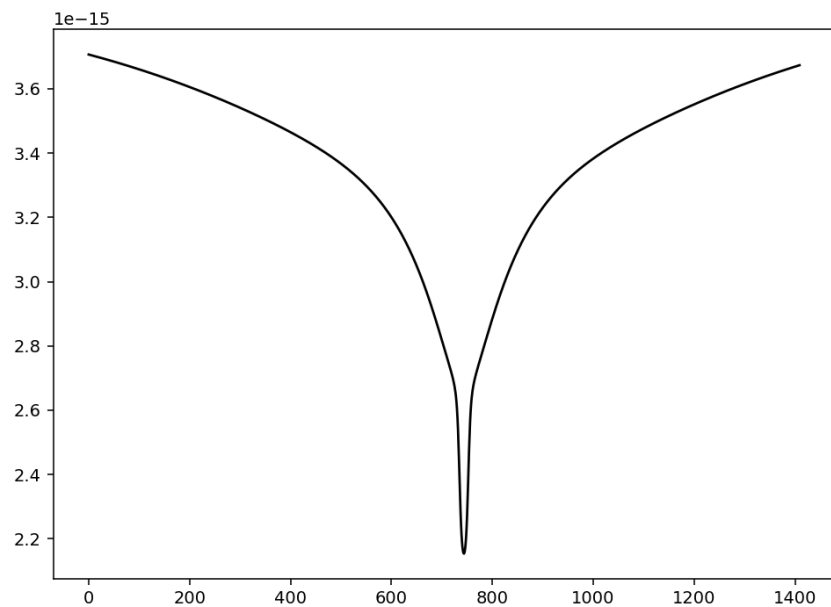
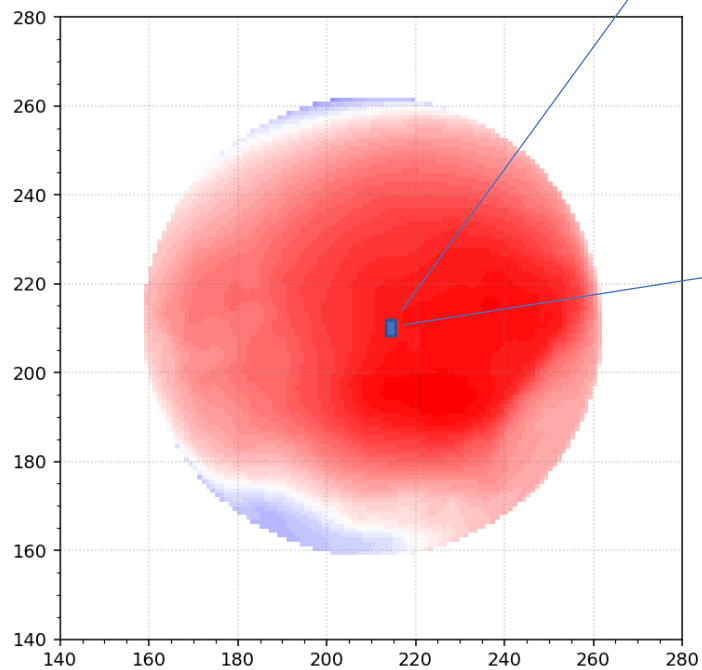


スペクトル形状に対する影響の評価

干渉計の取得データであるビジビリティ (空間周波数成分) ではなく、イメージ空間でのシミュレーションで影響を評価 (その方が分かりやすいので).

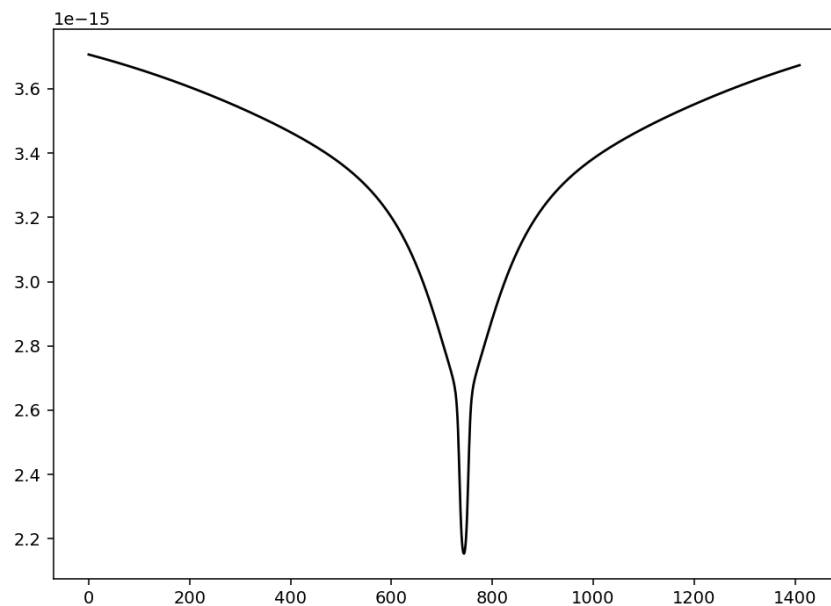
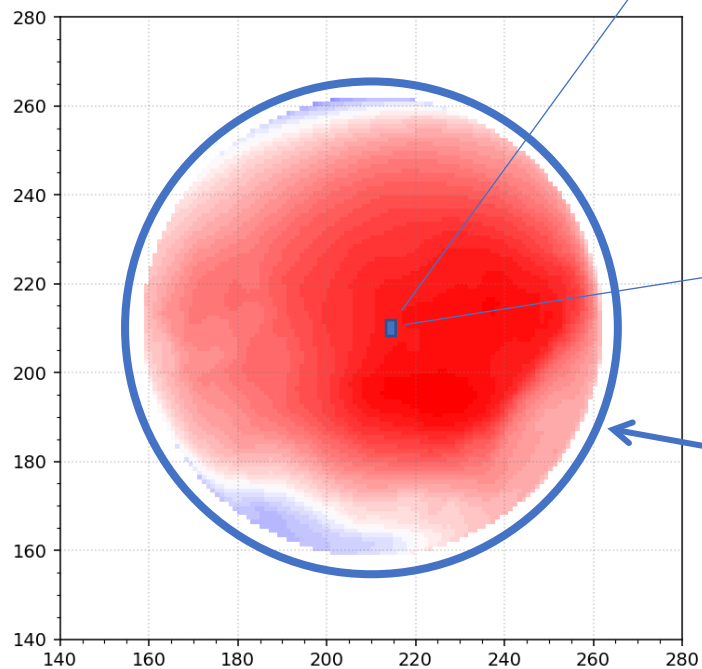
1. まず、火星GCMの気温・気圧・風速・CO分布の出力から、火星ディスク上の各地点におけるCOスペクトルを計算. 風速の視線方向成分に相当するドップラーシフトも考慮済み.
2. ALMAの12mアンテナを単一鏡として利用して火星を観測した場合のTotal Powerスペクトルを計算 (= 自己相関スペクトルに相当).
3. 1. を 2. で割ることで、ALMAが行っている「相互相関データの自己相関データによる規格化」を模擬.
4. スペクトル形状がどのように変化するかを確認.

GCMの出力から計算した (現実的な) 火星COスペクトルデータ.

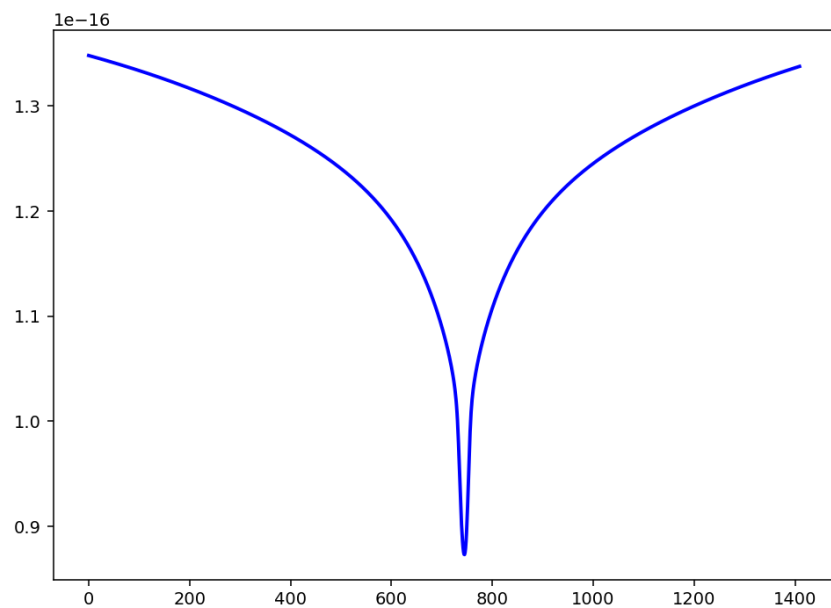


とある地点での火星COスペクトル.
このような吸収線が観測されると嬉しい.

GCMの出力から計算した (現実的な) 火星COスペクトルデータ.

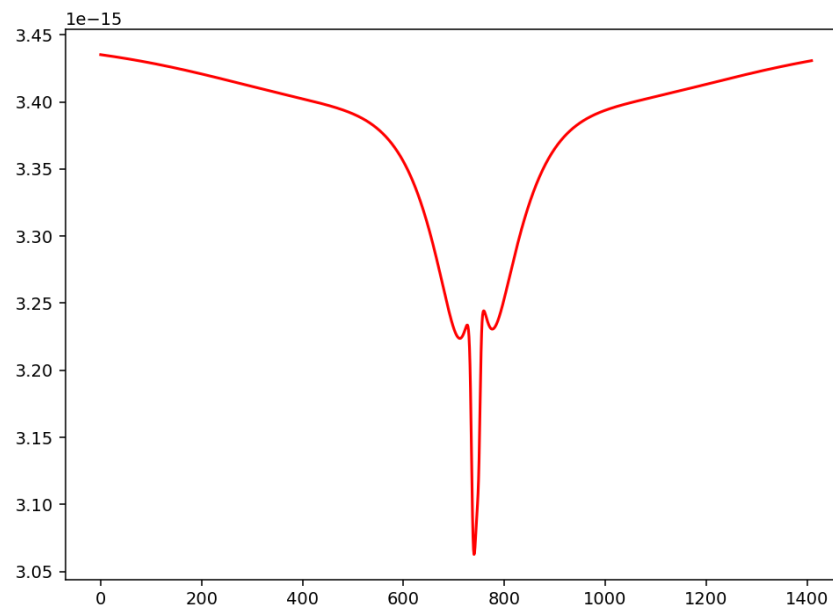
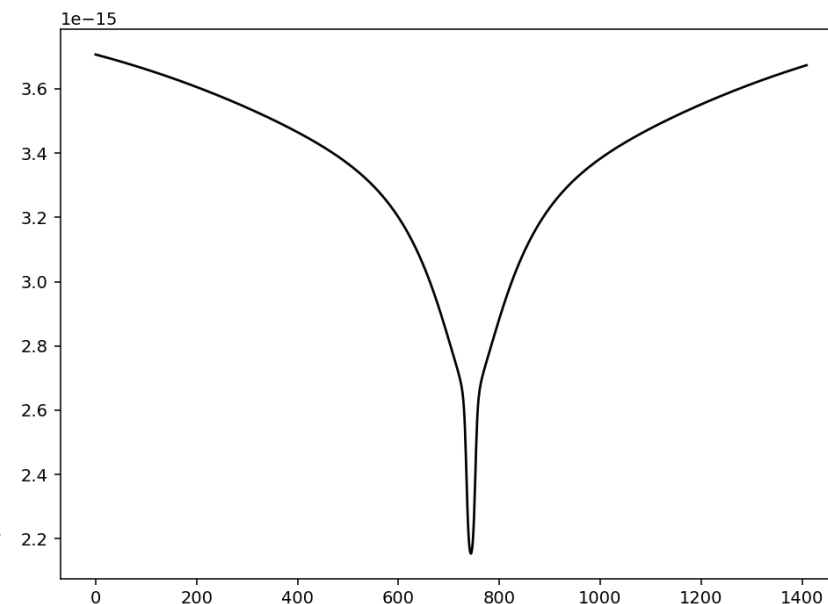
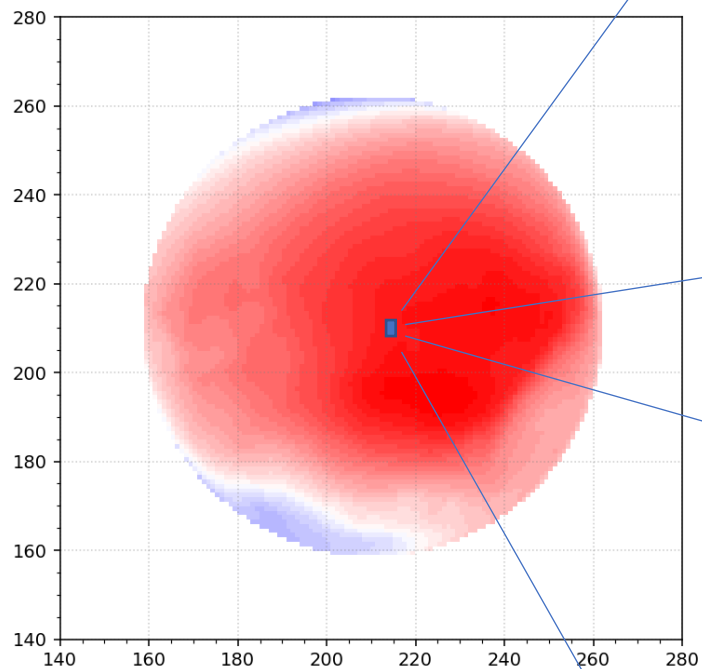


とある地点での火星COスペクトル.
このような吸収線が観測されると嬉しい.



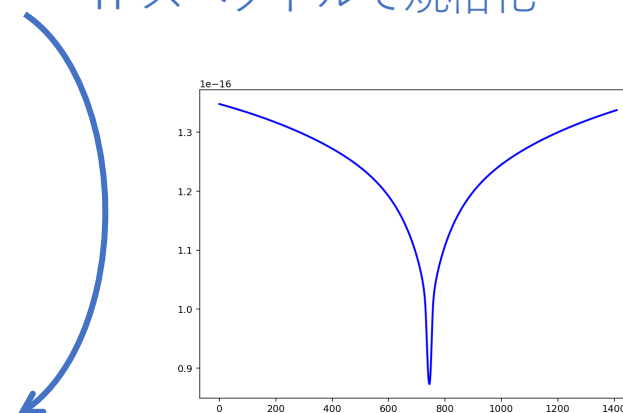
ALMAの望遠鏡を単一鏡として用いた場合に得られる Total Power スペクトル (= 全球平均スペクトル).

GCMの出力から計算した (現実的な) 火星COスペクトルデータ.



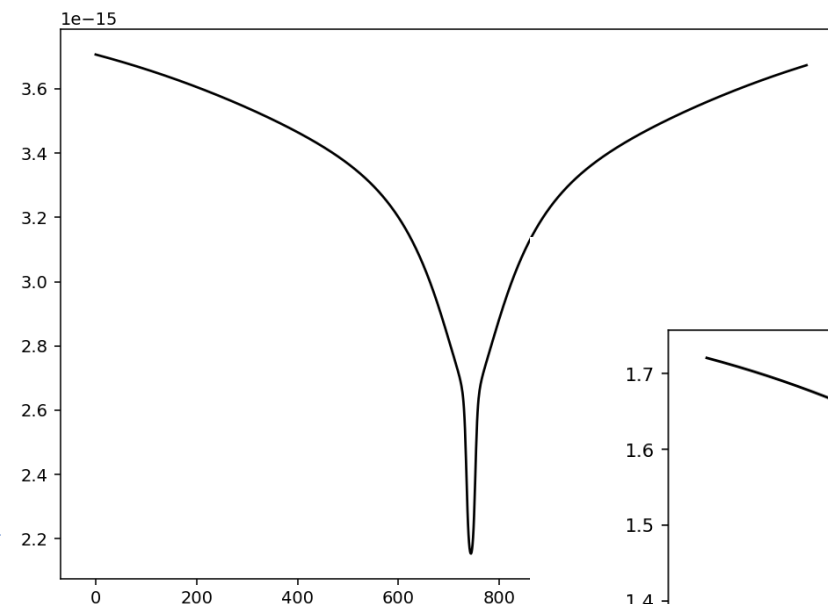
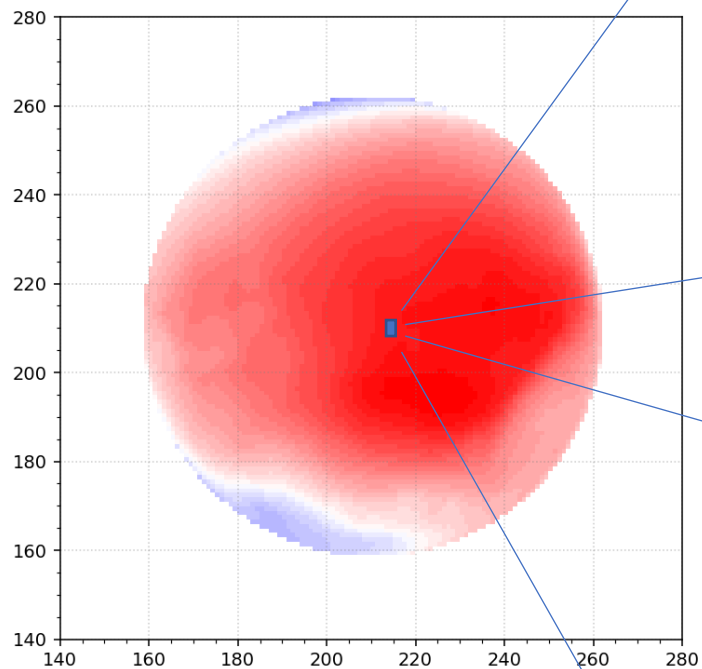
とある地点での火星COスペクトル.
このような吸収線が観測されると嬉しい.

TPスペクトルで規格化

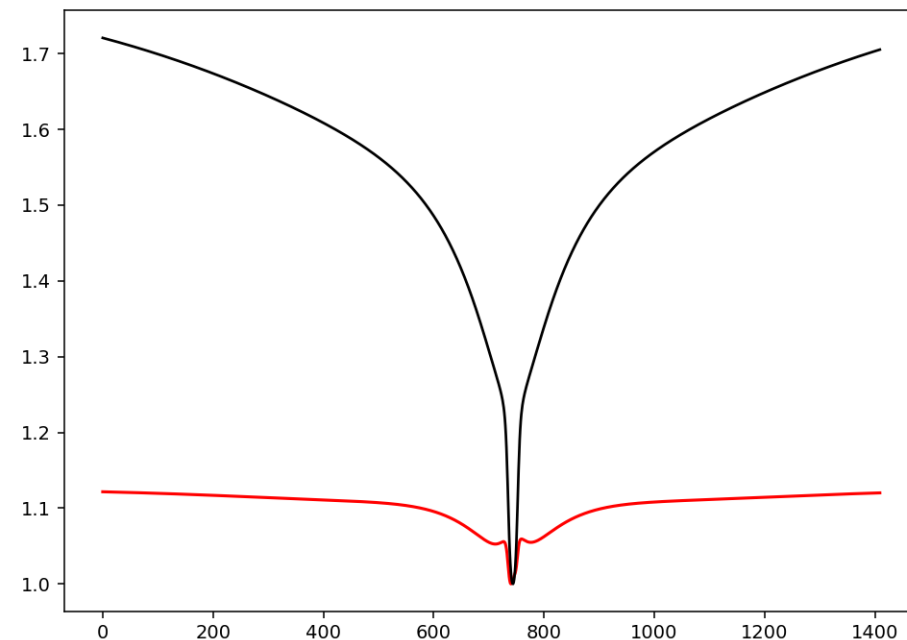
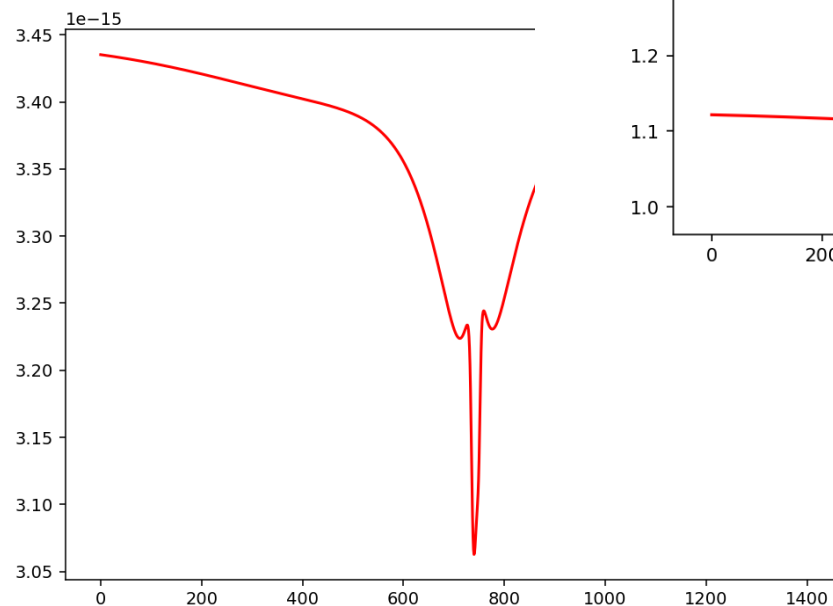


規格化された, とある地点での
火星COスペクトル. 規格化され
た相互相関データを模擬.

GCMの出力から計算した (現実的な) 火星COスペクトルデータ.

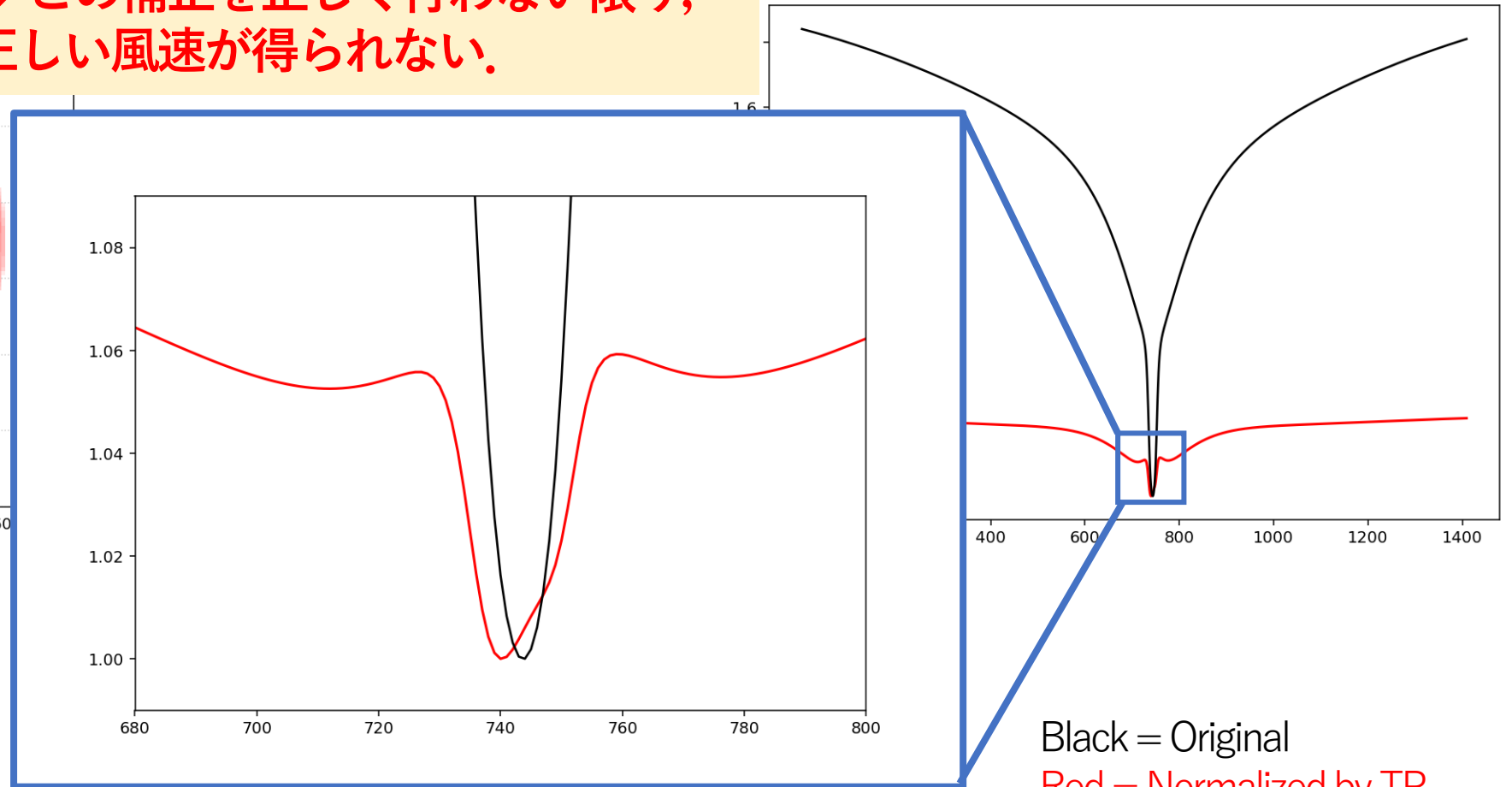
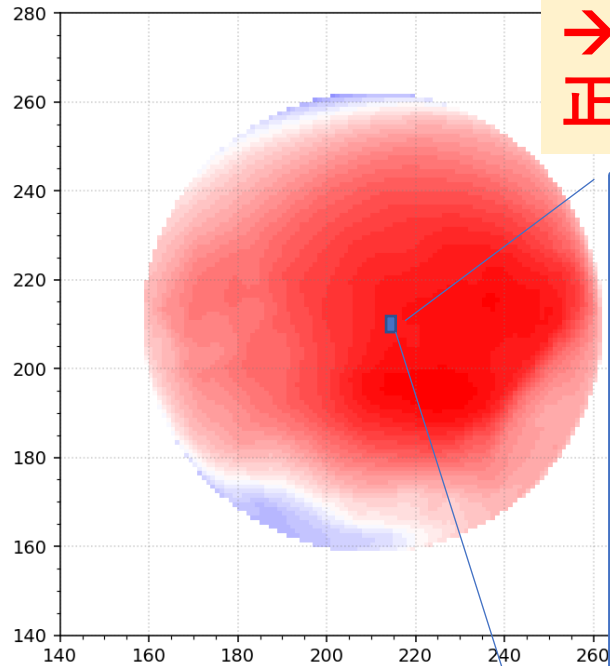


下図：本来のものと規格化済みのものとの吸収線のドップラーシフトを比較すると…



吸収線の中心部分 (一番深い部分) の位置が明らかにずれている (本来は黒線的位置にあるべきものが、赤線的位置になっている).

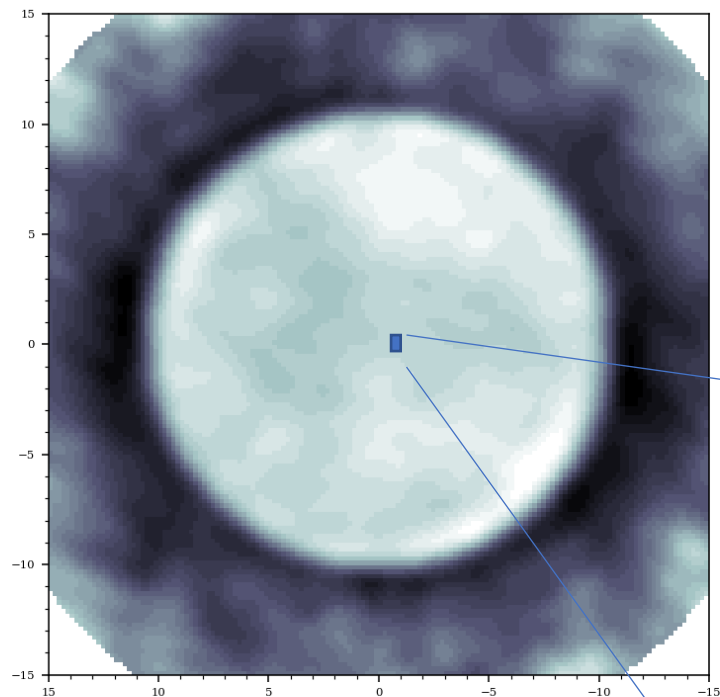
→ この補正を正しく行わない限り、正しい風速が得られない.



下図：本来のものと規格化済みのものとで吸収線のドップラーシフトを比較すると...

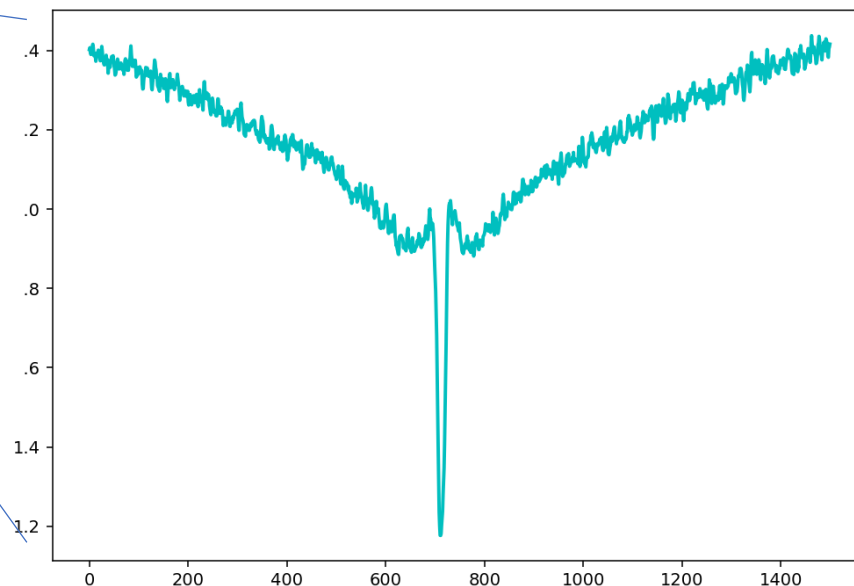
Black = Original
Red = Normalized by TP

実際のALMAデータとのスペクトル形状の比較

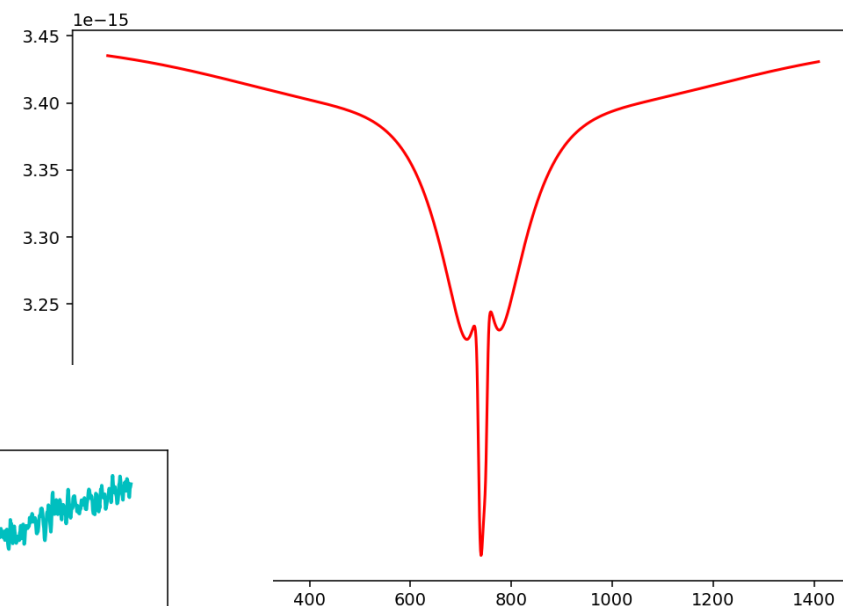


実際のALMAデータから得られた
火星輝度分布

観測データから、とある地点の
スペクトルを抽出したもの。



TPスペクトルで規格化した計算スペクトル



形状はかなり似ている！

(注) このようなスペクトル形状は、干渉計の短いベースラインのデータが欠けている問題でも再現される可能性が高く、TP規格化の影響との分離は今後の検証が必要。

まとめ：現時点で分かっていること

- ALMAによる太陽系天体（特に火星・金星といった「明るい」天体）の強いライン（COなど）は、**スペクトルのフラックス較正に大きな問題**を抱えている（可能性が高い）。
- 特に、**COの本来の吸収線の形状が歪んだ結果になっている可能性も高く**，その場合は大気物理量（気温や風速）の導出の信頼性にも問題が生じる。
- 火星は比較的信頼できるGCMが存在し，こうした観測由来の誤差を評価するには適している。
- 問題の完全な解決は不可能であるが，ある程度の解決を目指し，現在 **試行錯誤中**。
- 将来的には 観測手法そのものの改良をALMA望遠鏡側に掛け合っていきたい。