

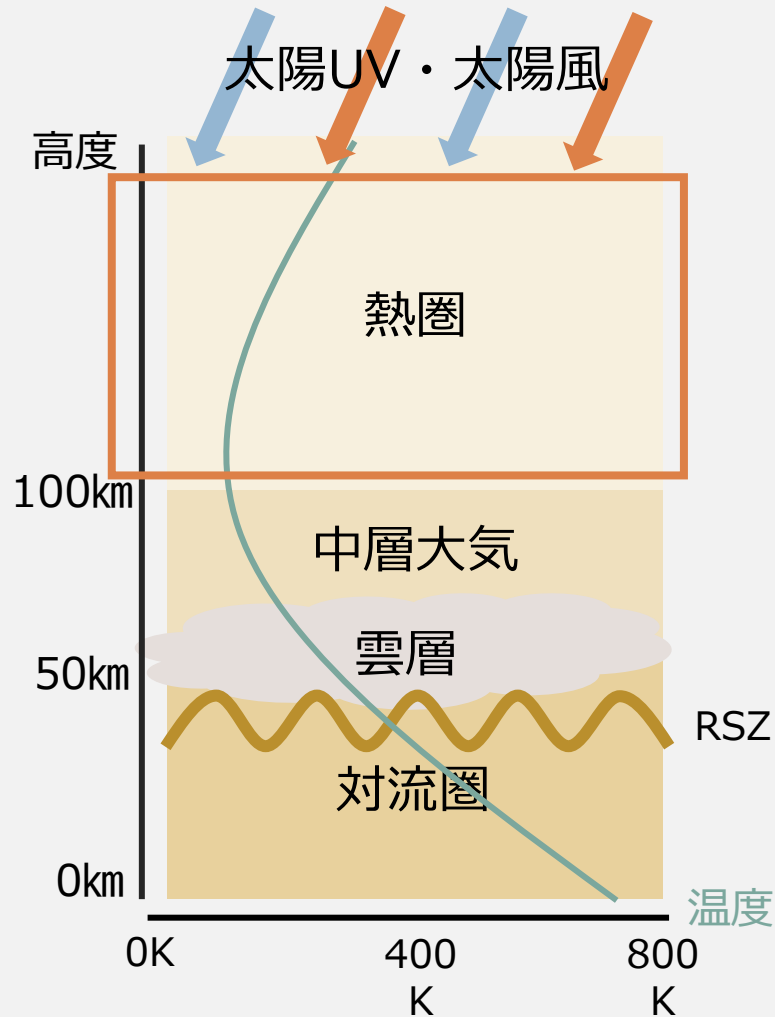
ひさき衛星によって観測された 金星熱圏水素大気光変動へ の太陽風の影響

2024/2/20-22 惑星圏シンポジウム

能勢千鶴¹, 益永圭², 土屋史紀¹, 笠羽康正¹, 吉川一朗³, 山崎敦², 村上豪², 木村智樹⁴, 北元⁵

¹東北大惑星プラズマ大気研究センター, ²宇宙科学研究所, ³東京大学, ⁴東京理科大学, ⁵東北工業大学

1.金星大気の鉛直構造



- 金星大気の鉛直構造と温度
- 熱圏上部は太陽放射・太陽風（数日スケールで変化）にさらされている。
- 下層からはスーパーローテーション（4日循環）・熱潮汐波の影響を受けている。
(Masunaga2015,Nara2020)
- 熱圏には酸素原子や水素原子が存在する。
⇒**極端紫外の波長で大気光として観測が可能**

1. 大気光の励起機構

• 大気光

外部からの作用で大気中の原子・分子が励起し、基底状態に戻るときに光を出す。



地球の大気光

紫外線波長の大気光の変動⇒熱圏の変動

• 昼間大気光の励起機構

1. 太陽放射の共鳴散乱・蛍光

原子や分子が太陽放射の特定の波長の光を選択的に吸収して励起し、基底状態に戻る際再放出する。

(H Ly- α 121.6nm · Ly- β 102.6nm, O 130.4nm)

2. 電子衝突励起

太陽放射が大気を光電離するとき生成される光電子が衝突することによる励起。

(O 135.6nm)

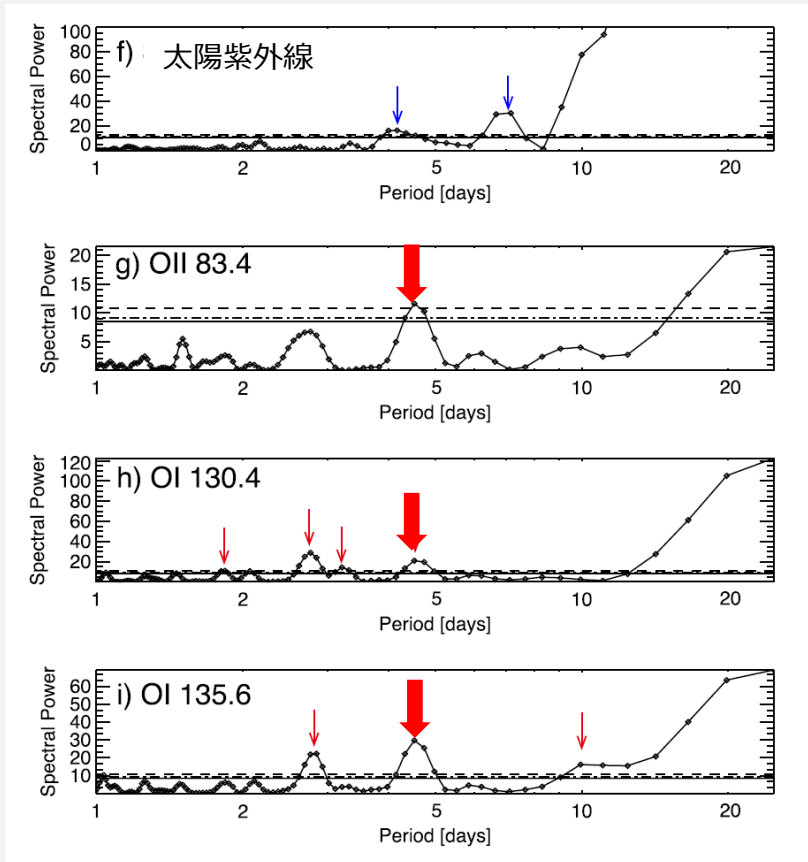
1.金星大気の酸素大気光の観測

先行研究 (Masunaga + 2015, 2017)

- 酸素原子 (130.4nm, 135.6nm) 酸素イオン (83.4nm) の観測で4日周期の変動がみられた。
- 酸素原子は高度130km〜で共鳴散乱・電子衝突に伴う励起で発光。

⇒高度130km付近の大気の変動を反映


- ✓ 酸素原子の4日周期変動は下層大気の影響である可能性が高い。
- ✓ 水素原子の発光高度は酸素原子より高いと言われている。



ひさき による金星大気の酸素発光の
観測から得られたピリオドグラム
(Masunaga+2015)

1. 研究の目的

金星高層大気の変動のメカニズムを知りたい

金星の大気進化・気候変動の理解へ



- 他の高度でも4日周期の変動は起きているのか？
- より上層では太陽風の到来の影響をうけるのか？

本研究の目的

金星近傍での太陽風・太陽UV放射の様相とともに水素原子（Ly- α ）の発光強度の周期解析を行い、下層大気の運動・太陽活動との関係を知る。

2. 使用したデータ

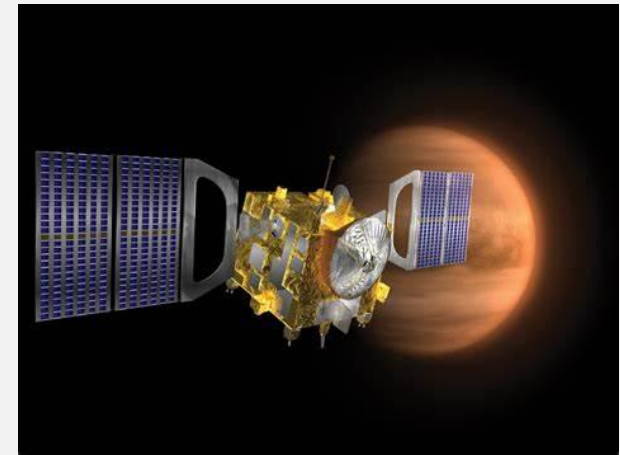
- ひさき・・・日本の惑星紫外線分光観測衛星
金星の分光観測データのLy- α (121.6nm) の波長
- Venus Express (ASPERA-4)
 - ・・・ESAの金星探査機 (粒子計測器)太陽風速度[km/s]、太陽風密度[/cm³]
太陽風動圧[nPa]
- FISM-P Venus Solar Spectral Irradiance
Ly- α 波長の太陽UV放射強度のモデル計算値

Period 1: 2014年3月7日~4月3日

Period 2: 2014年4月25日~5月23日



ひさき衛星

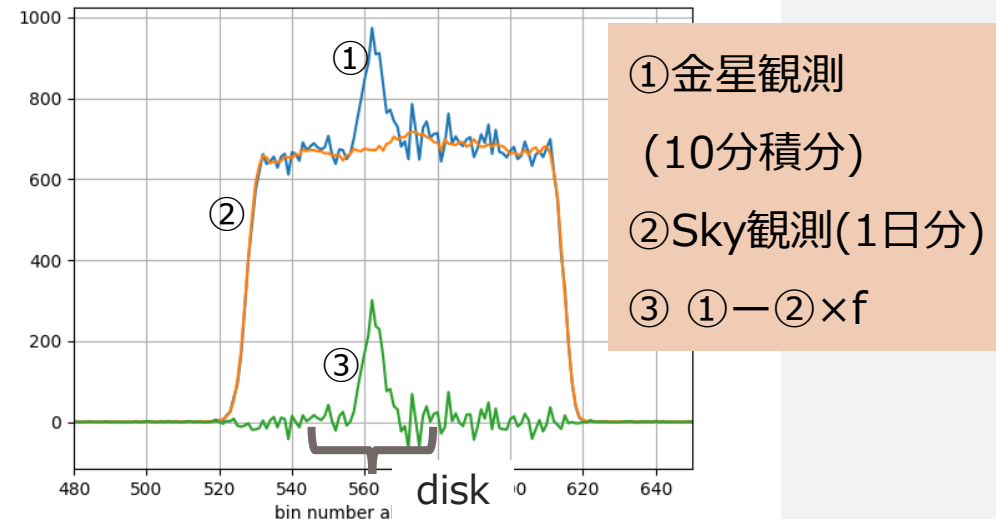
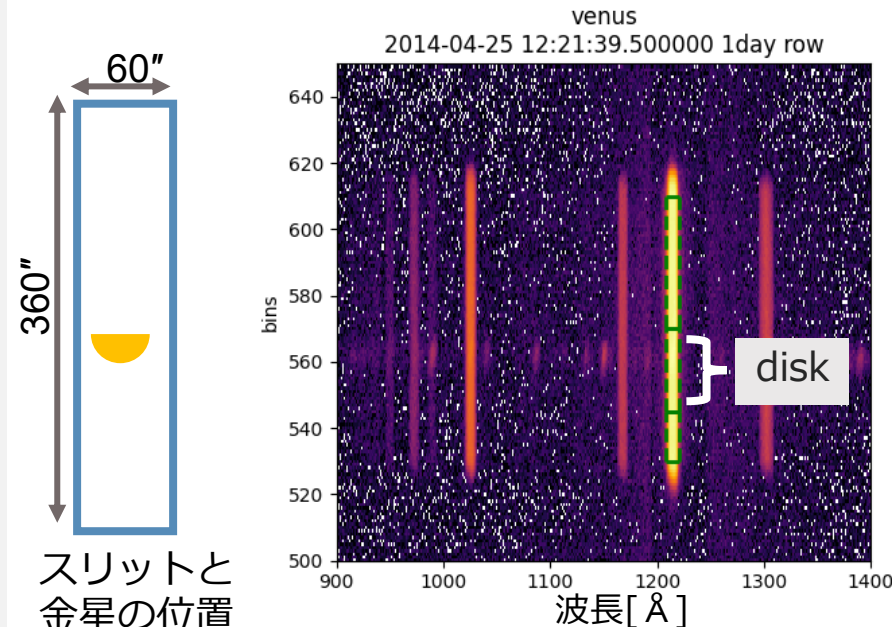


Venus Express

2. 金星大気光の明るさ導出

$$I = \frac{C \cdot f}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 (L_X \cdot L_Y)^{-1}} \times \frac{100}{A_i} \text{ [Rayleigh]}$$

- **C** : disk領域のカウント合計 [count/min]
- d : 金星視直径 [arcsec]
- L_X, L_Y : 1pixが見込む大きさ (10" , 4.2")
- A_i : 金星の発光面積 [%] (補正こう)
- f : geometric factor
[Rayleigh(count/min)⁻¹pix⁻¹]



左:二次元スペクトル 右:Ly-aの範囲で波長方向に積分した1次元スペクトル

2. 解析手法

周期解析・・・LombScargle periodogram

- 不等時間間隔の時系列のスペクトル解析をする方法
- 金星大気光の明るさ、太陽UV放射、太陽風風速に対してピリオドグラムを作成 ⇒ 同一周期性の有無を調査

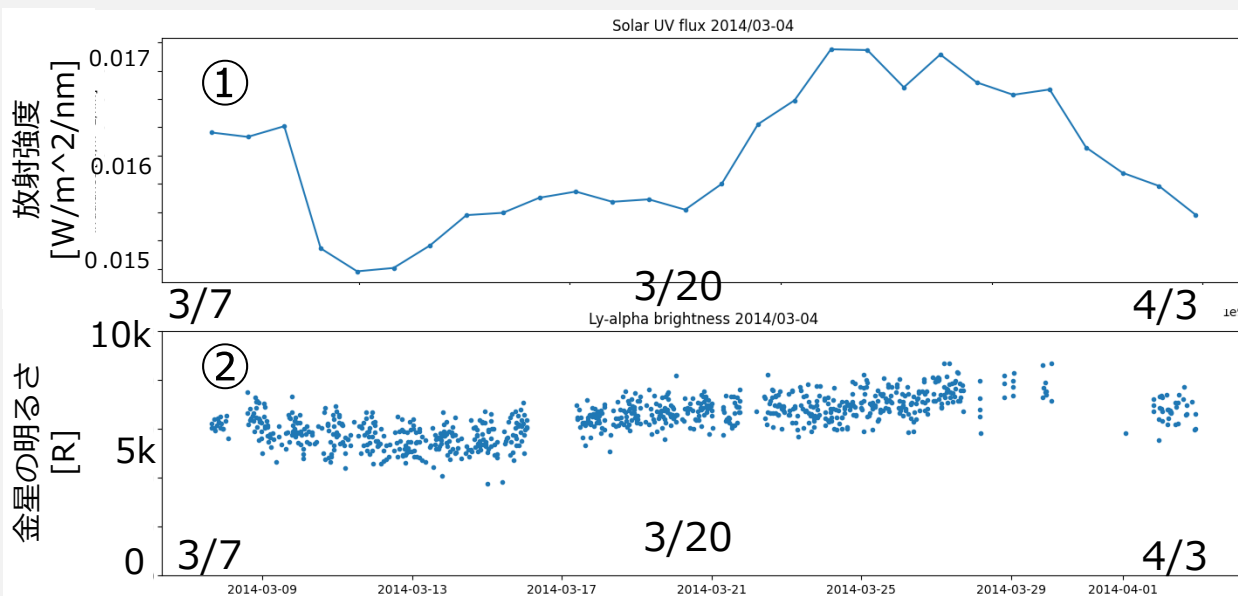
明るさの補正

- 金星大気光の明るさ = (太陽UV放射による共鳴散乱) + (太陽風の影響)
- 太陽風の影響を見るために、共鳴散乱で発光した量を差し引く

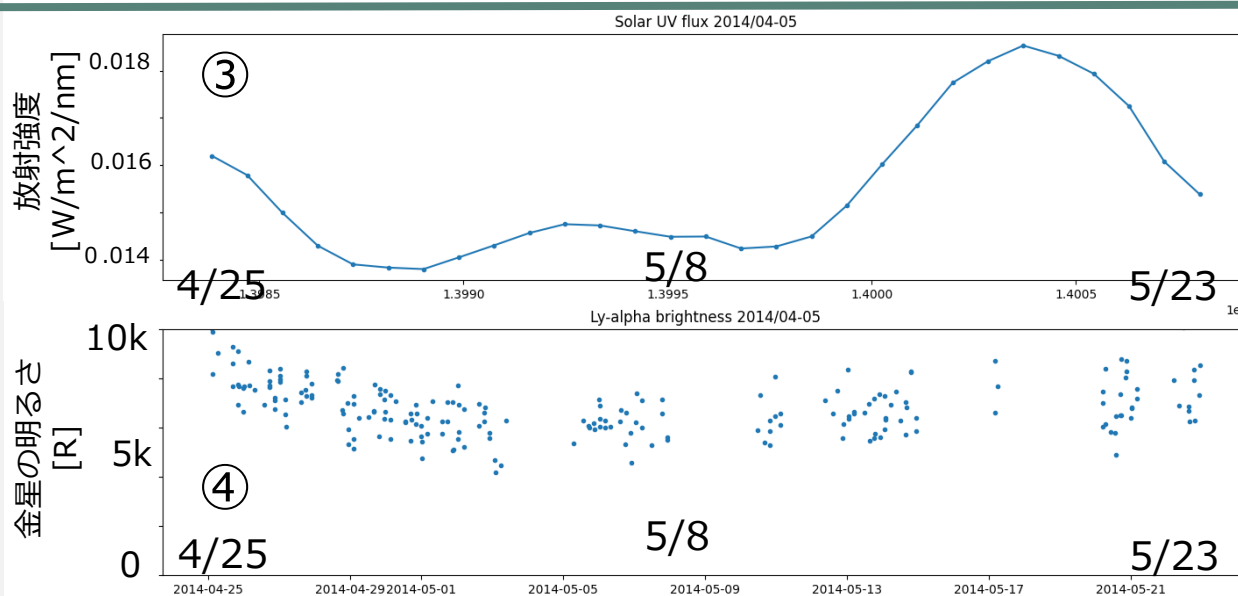
$$I_{residual} = I_{obs} - \underbrace{a * solar\ UV\ irradiance + b}$$

太陽UV放射と金星の明るさの
相関関係から算出した明るさ

3. 金星水素大気光の発光強度の時系列



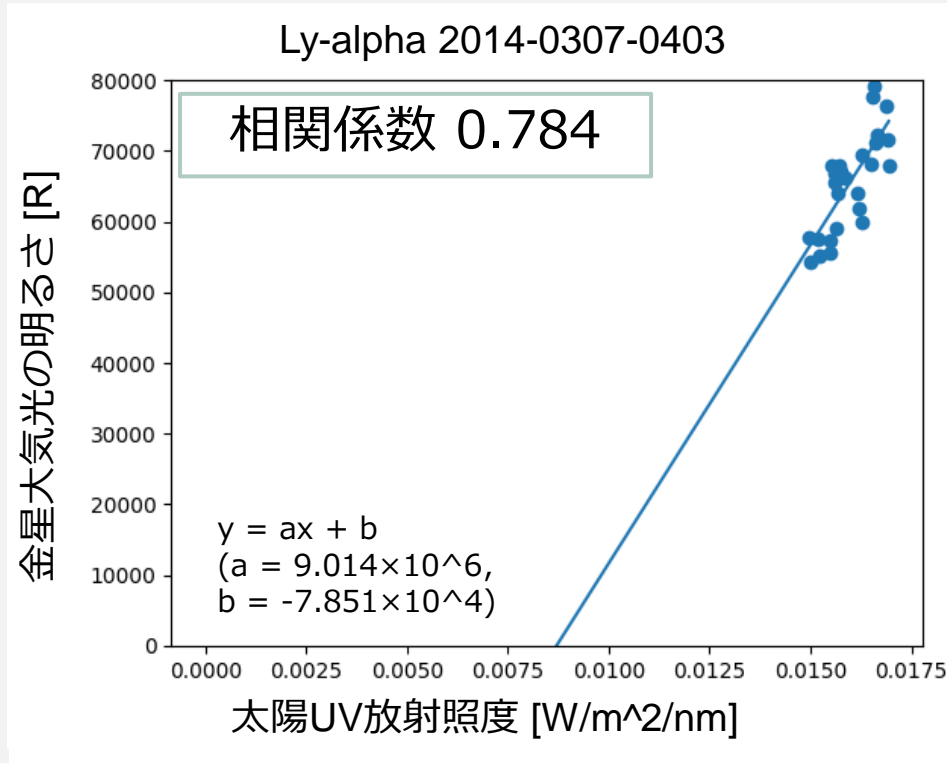
- Period1と2は同じ太陽面を見込んでいる。
- Period1は高速太陽風の到来があり、Period2は太陽風が静穏な状態だった。



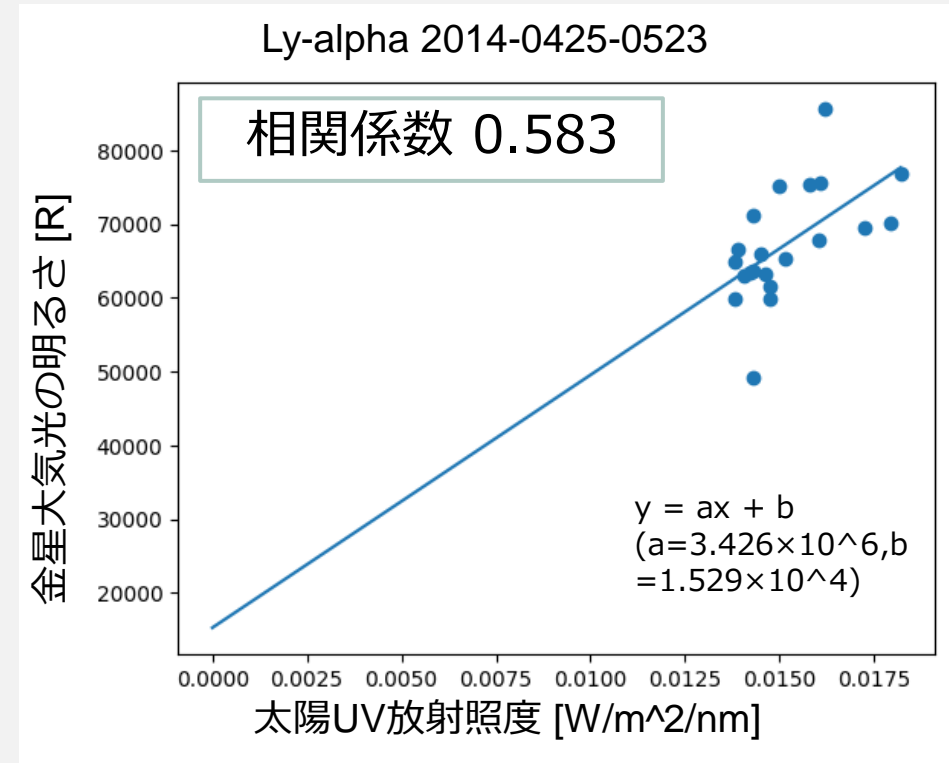
- ① 太陽UV放射照度(P1)
- ② 金星大気光のLy-aの明るさ(P1)
- ③ 太陽UV放射照度 (P2)
- ④ 金星大気光のLy-aの明るさ(P2)

3. 金星の明るさと太陽UV放射との相関関係

• Period 1



• Period2



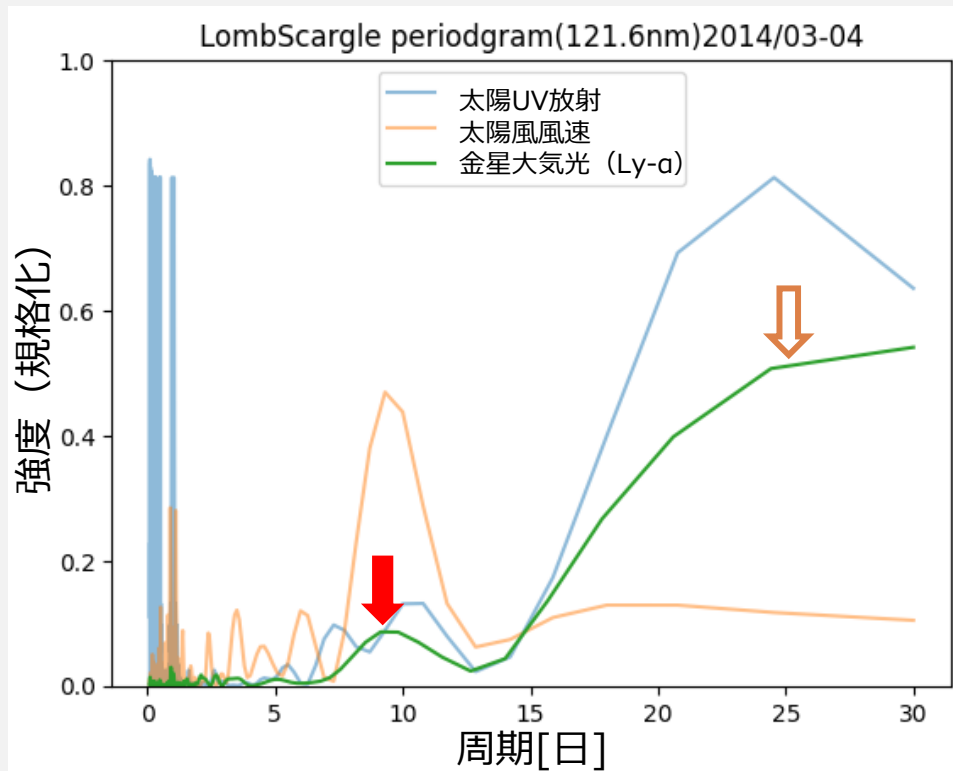
金星水素大気光の明るさと太陽UV放射に正の相関がある。

(t検定より95%の有意水準で有意)

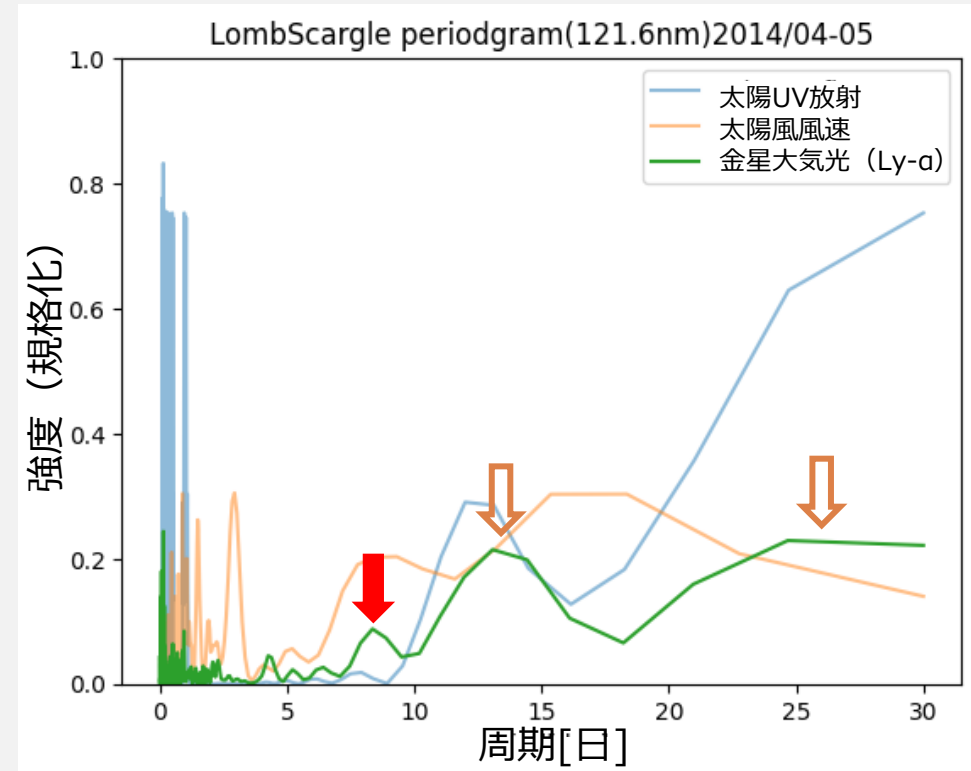
⇒大気光が共鳴散乱によって発光していることと整合的である。

3. 周期解析

• Period1



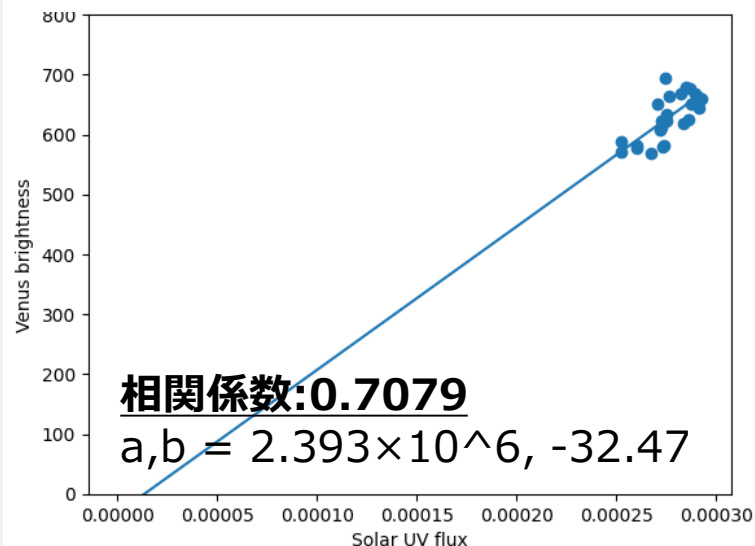
• Period2 (太陽風のデータは5/14まで)



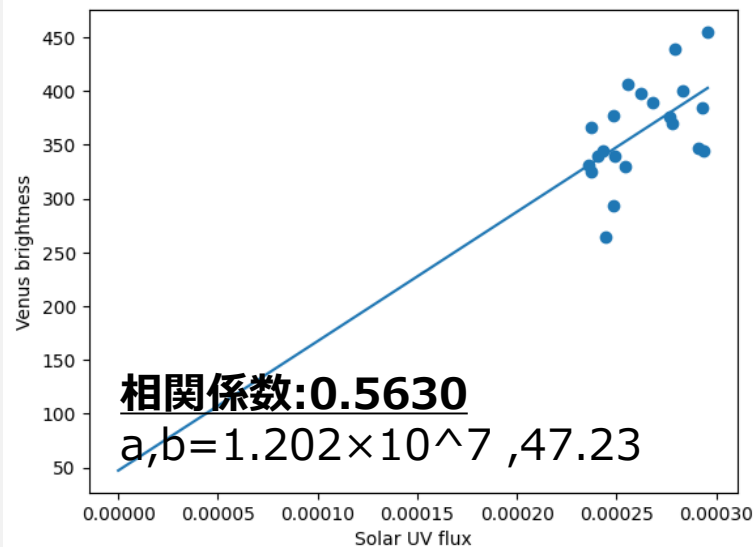
酸素原子・イオンの観測で確認されていた4日周期は確認されなかった。
2つの期間に共通して9~10日周期がみられる。(信頼区間99%)

3. Ly-βの解析結果

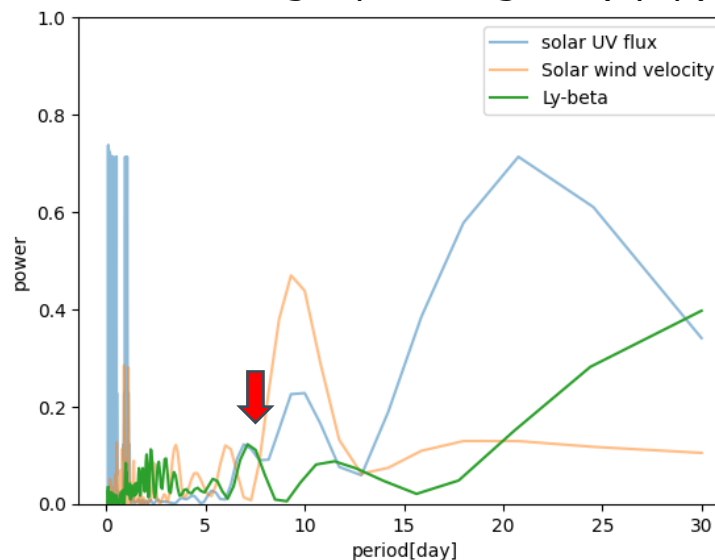
Ly-βの明るさと太陽UVfluxの相関関係



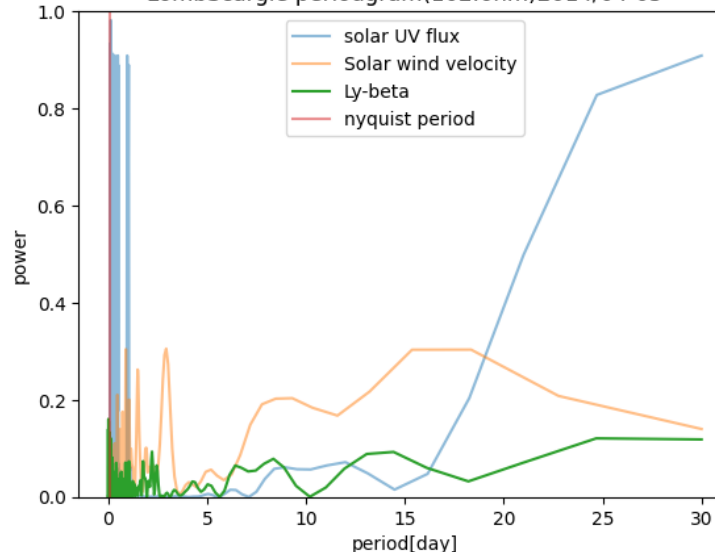
102.6nm 2014-0425-0523



LombScargle periodogram(Ly-β)



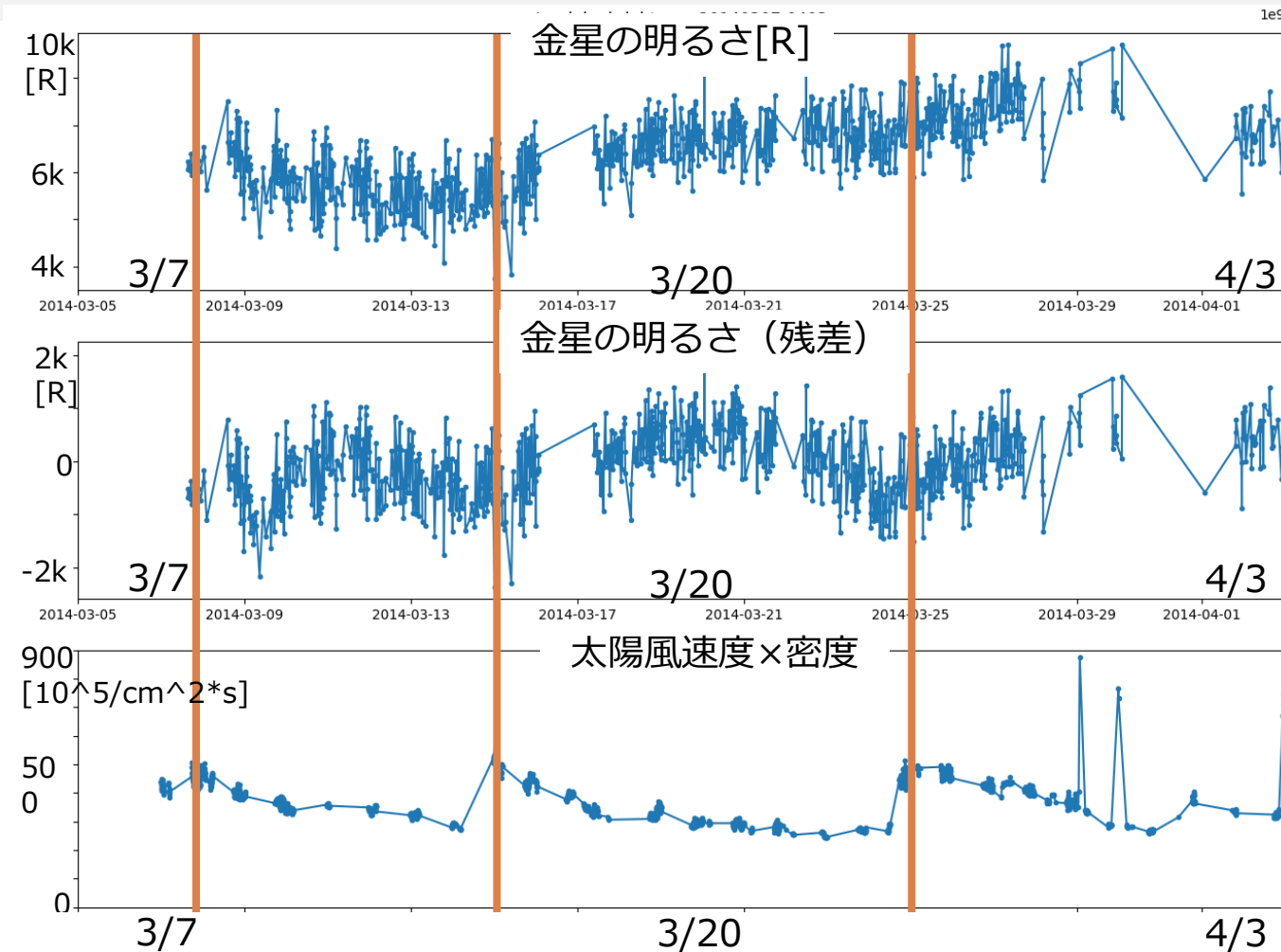
LombScargle periodogram(102.6nm)2014/04-05



Period1・2ともに太陽UVフラックスとLy-βの明るさに正の相関がある。(t検定により95%有意水準で有意であることを確認)

周期解析からPeriod1ではLy-aの明るさに約7日周期の変動が確認できた。

3. 金星の明るさと太陽風との応答

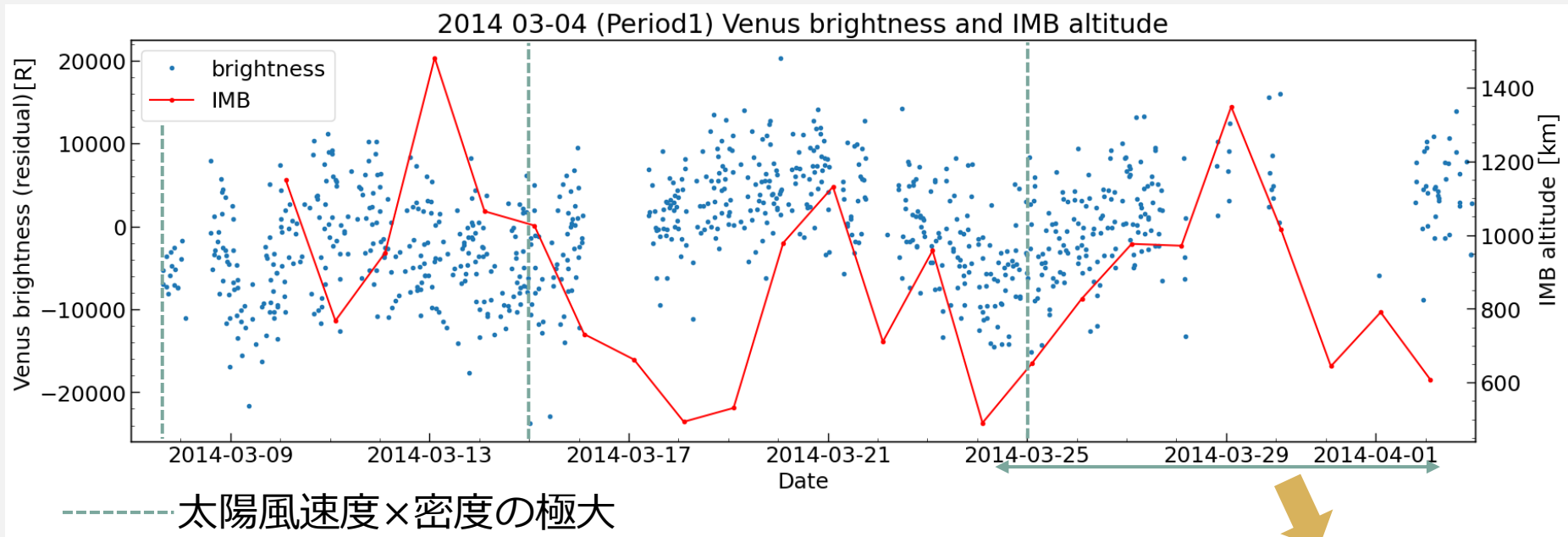


Period1(2014 3/7-4/3)

高速太陽風が到達したのちに、時間差で金星の明るさが増光し、元に戻るよう見える。

Period2では見られていない。

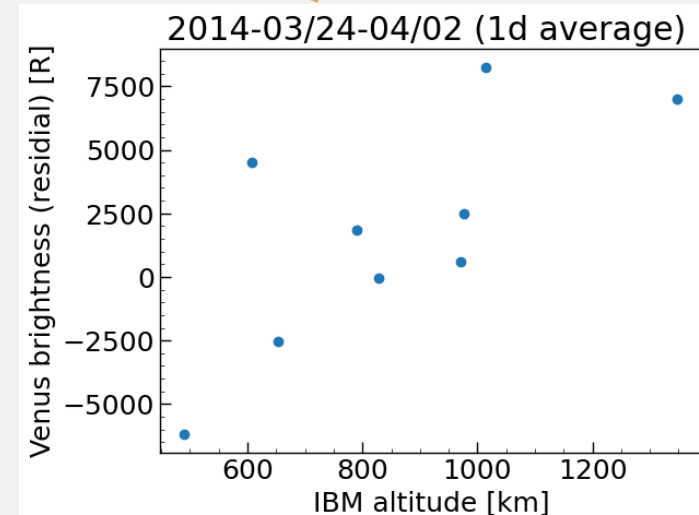
4. 太陽風に伴う大気光変動のメカニズム



VEXが観測した誘導磁気圏界面(IMB)高度との比較 (Period1)

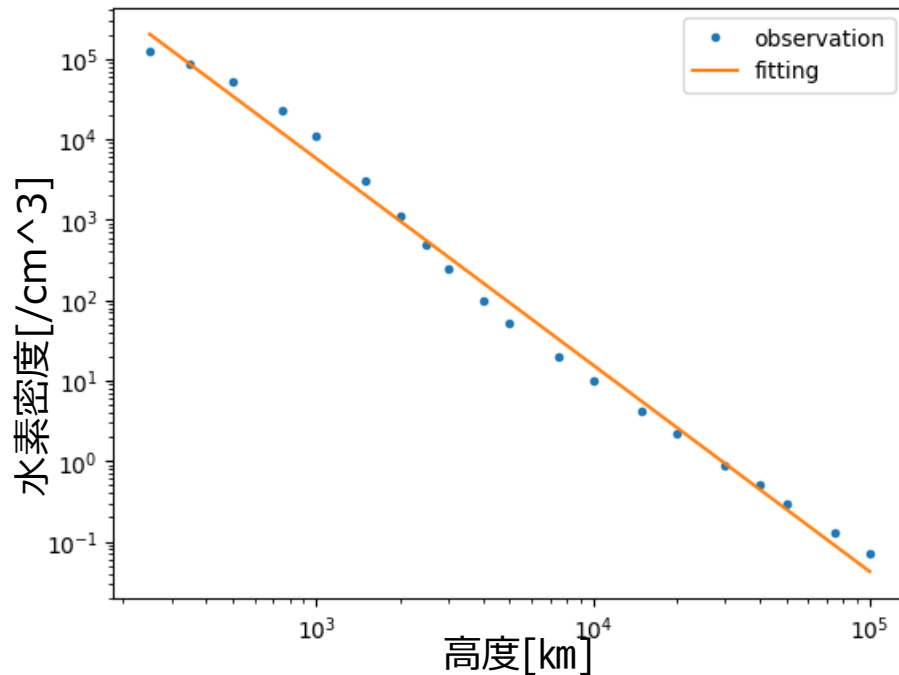
- Venus Express が1周回ごとにIMB高度を観測
- IMB高度とLy- α の明るさに正の相関がある。(3/24-4/2)

→太陽風の到来に伴って電離圏密度が変化し、大気光の明るさが変化する可能性が示唆される。⇒展望

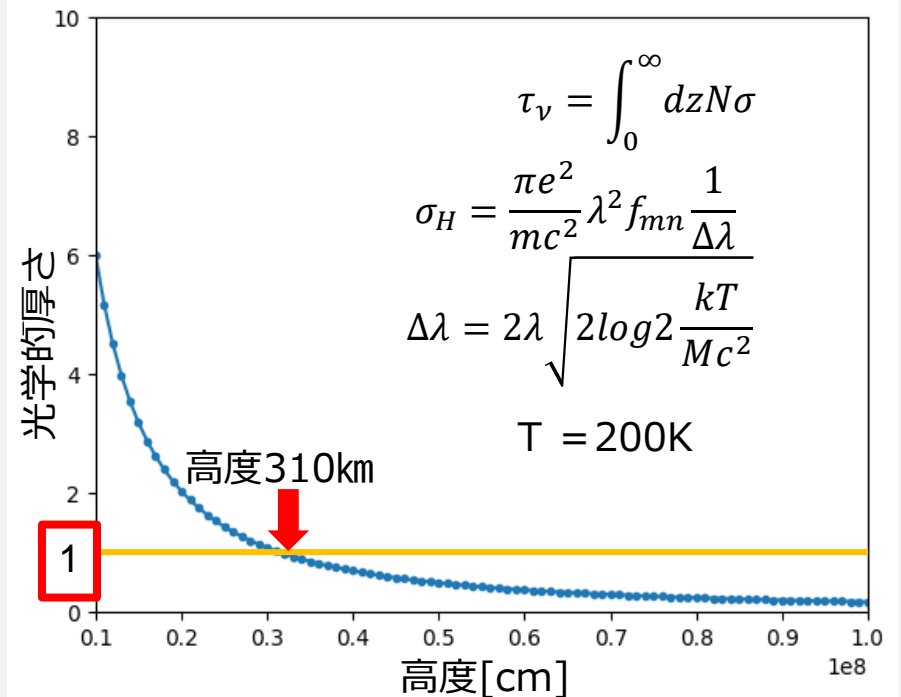


4. 金星水素大気の光学的厚さ

金星大気の水素密度分 (Chaufruy+2012)



金星の水素大気の光学的厚さ



金星水素大気は高度310kmで光学的厚さが1

⇒ひさきで観測しているのは310kmより上空の大気光

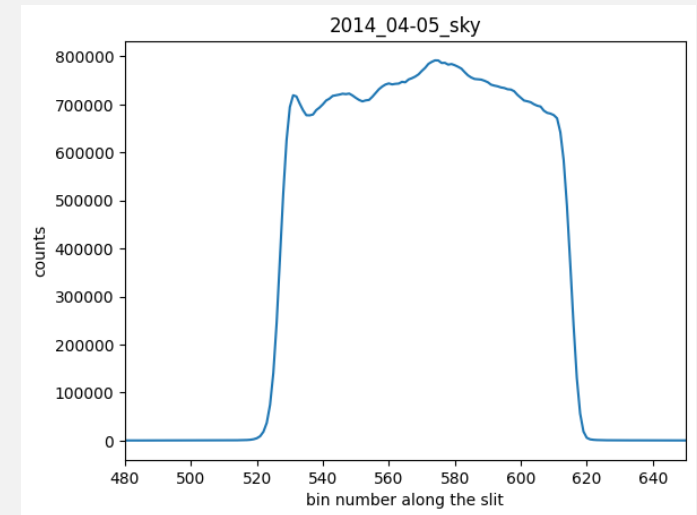
⇒酸素の観測で見た4日周期が見えないのは整合的

- 金星水素大気光の周期解析では、酸素原子の解析で確認されていた、4日周期の変動（下層大気の影響）は見られず、Period1ではLy- α に9~10日周期が、Ly- β に7日周期が、Period2ではLy- α に14日周期が95%信頼区間内に確認された。
- ひさきが観測した水素原子の発光（Ly- α ）は高度310kmより上層で起きているものであり、酸素原子の発光より高高度の領域であり4日周期が見えないのは整合的である。
- 高速太陽風の到来4日後増光し、もとの明るさに戻る現象が確認された。Venus Expressで観測されたIMBの高度変化の時系列を比較すると、IMB高度が低くなると下がったときにLy- α の大気光が暗く、高くなると明るくなる傾向も確認された。
- これらの解析結果から、水素大気光の変動成分には太陽風が寄与していると考えられる。太陽風の到来に伴う電離圏の圧縮・膨張と電荷交換反応頻度の変化で具体的なメカニズムを説明することが今後の展望である。

- Anderson, D. E. (1976), The Mariner 5 Ultraviolet Photometer Experiment: Analysis of Hydrogen Lyman Alpha Data. *Journal of geophysical research*, vol.81, No7
- Bertaux, J. L., et al. (1982), Altitude Profile of H in the Atmosphere of Venus from Lyman α Observations of Venera 11 and Venera 12 and Origin of the Hot Exospheric Component. *Icarus* 52, 221-244
- Chaufray, J.-Y., Bertaux, J.-L., Quémerais, E., Villard, E., Leblanc, F. (2012). Hydrogen density in the dayside venusian exosphere derived from Lyman- α observations by SPICAV on Venus Express. *Icarus*, 217, 767-778. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.09.027>
- Forbes, J.M., et al. (2006), Solar Rotation Effects on the Thermospheres of Mars and Earth. *Science* 312, 1366, doi: 10.1126/science.1126389
- Forbes, J.M., et al. (2007), Oscillation of Venus' upper atmosphere. *Geophysical research letters*, 34, L08202, doi:10.1029/2007GL029252
- Lomb, N. R. (1976), Least-squares frequency analysis of unequally spaced data, *Astrophys. Space Sci.*, 39, 447-462.
- Masunaga, K., et al. (2015), Periodic variations of oxygen EUV dayglow in the upper atmosphere of Venus: Hisaki/EXCEED observations, *J. Geophys. Res. Planets*, 120, 2037-2052, doi:10.1002/2015JE004849.
- Masunaga, K., Seki, K., Terada, N., Tsuchiya, F., Kimura, T., Yoshioka, K., et al. (2017). Dawn-dusk difference of periodic oxygen EUV dayglow variations at Venus observed by Hisaki. *Icarus*, 292, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.12.027>
- Nara, Y., Imamura, T., Masunaga, K., Lee, Y. J., Terada, N., Yoshioka, K., et al. (2020). Vertical coupling between the cloud-level atmosphere and the thermosphere of Venus inferred from the simultaneous observations by Hisaki and Akatsuki. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125, e2019JE006192. <https://doi.org/10.1029/2019JE006192>
- Oshio, T., et al. (1979), "TAIYO" Solar Hydrogen Ly- α Measurement. *J. Geomag. Geoelectr.*, 31, Suppl., S43-S52
- VanderPlas, J. T. (2018), Understanding the Lomb-Scargle Periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 236, 16. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aab766>

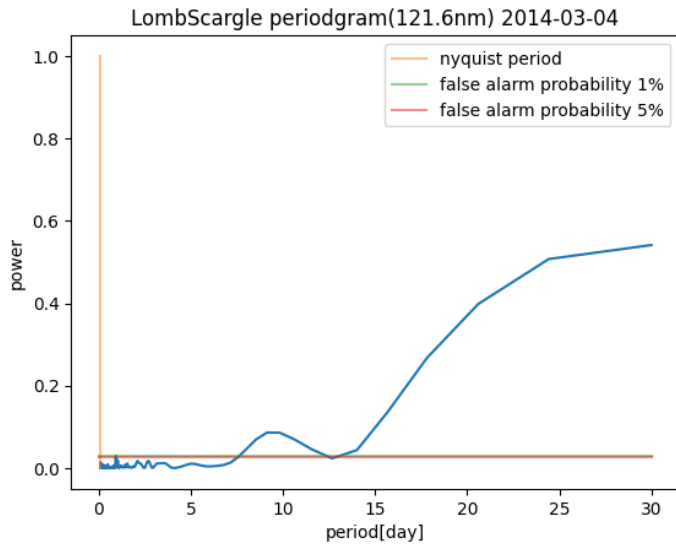
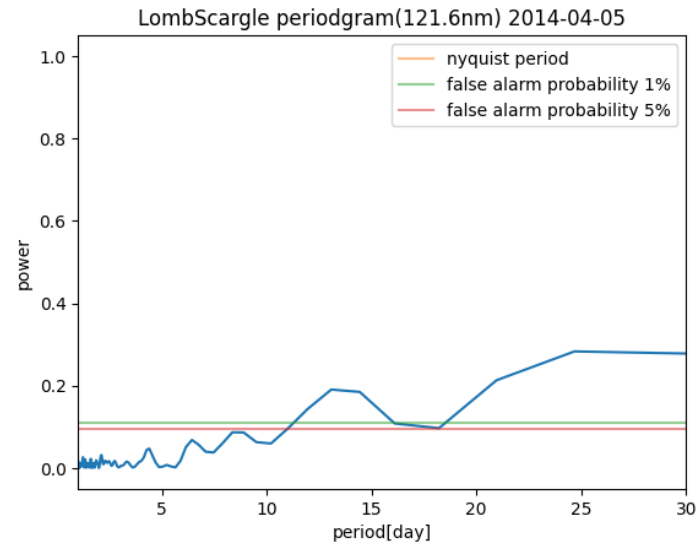
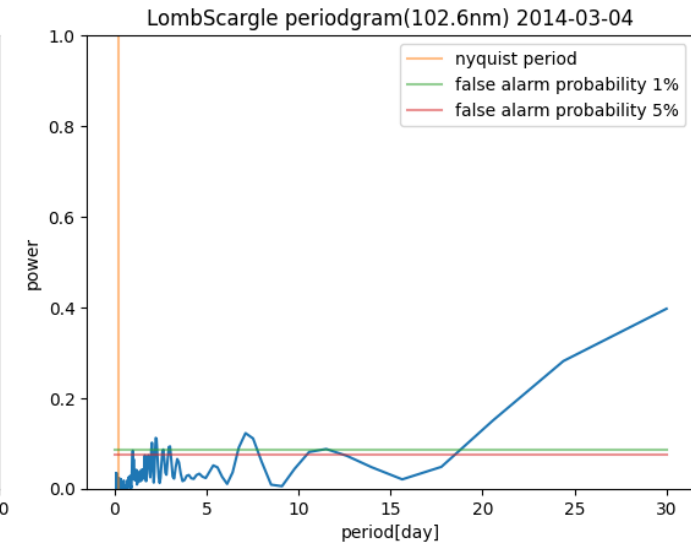
データセレクション

- Period1 2014年3月7日～4月3日
 - Disk とSky観測の見分けはfitの'Calflg'で判断
 - 金星観測時は'dis',sky観測時は'ena'と入っている。
 - Sky (ジオコロナ等) の引き算はスリット内にskyが一様に分布しているとして、同じ時間の金星が入っていないpixを使って差し引いた。
- Period2 ②2014年4月25日～5月23日
 - Calflg が正常に機能していなかった。
⇒1次元スペクトルの形で判断
 - スリットの空間方向の感度ムラが無視できないのでSky観測データを用いて同じpixで差し引いた。

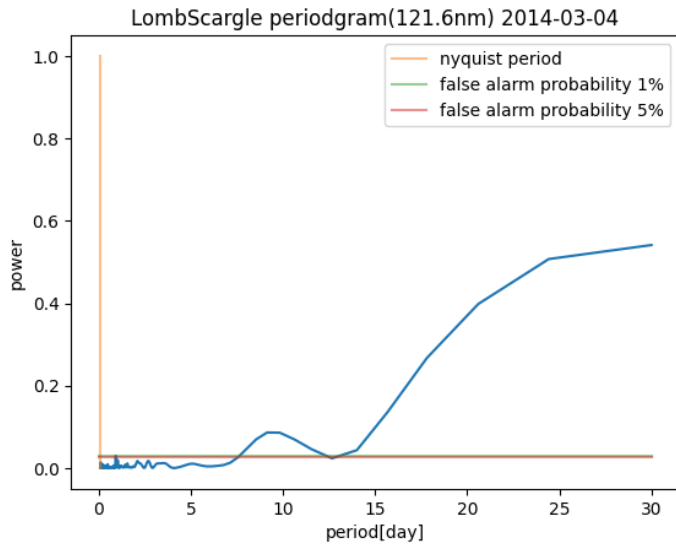
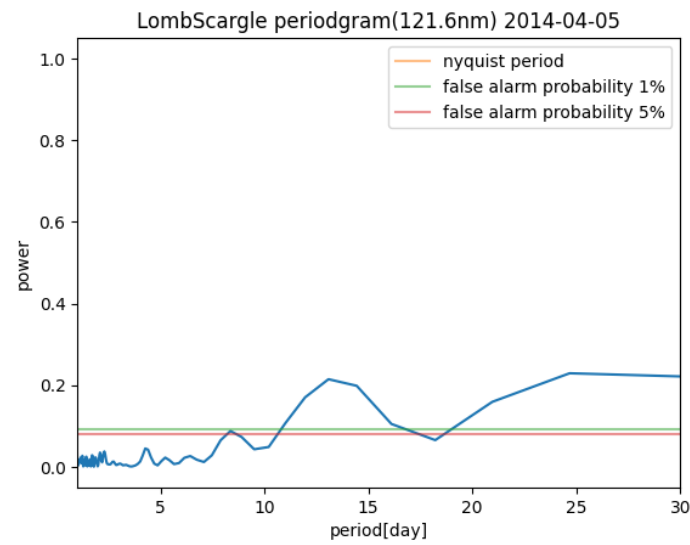
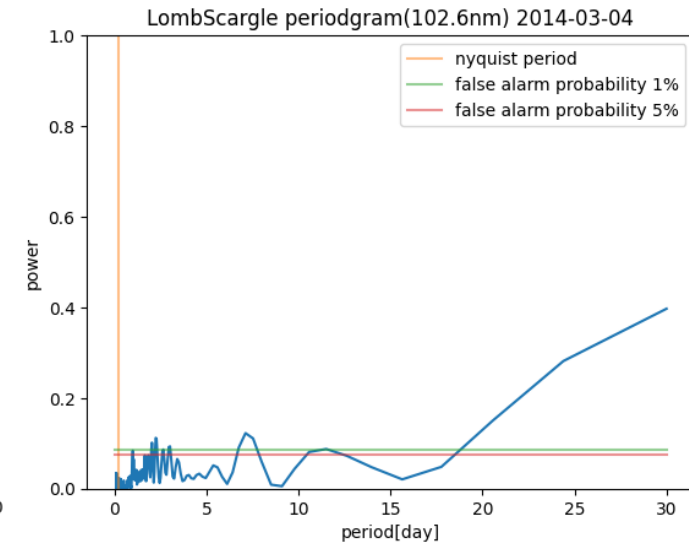


Calflg で判断されたsky観測の1次元スペクトル (Ly- α , 2014/04-03)

金星大気光の周期解析結果

Period1 Ly- α Period2 Ly- α Period1 Ly- β 

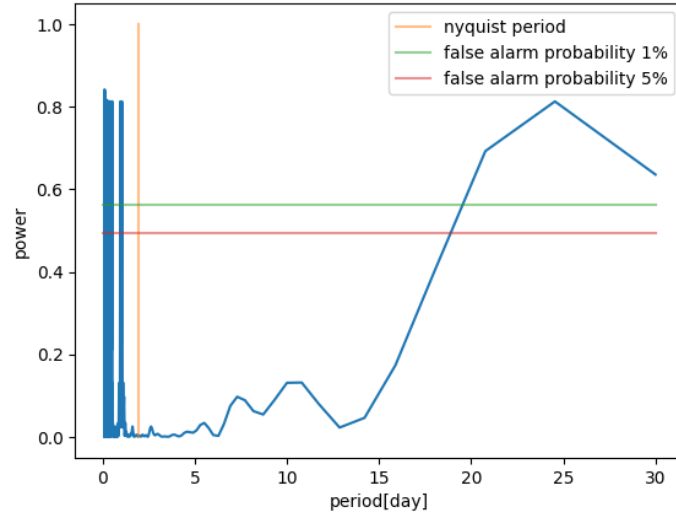
金星大気光の周期解析結果

Period1 Ly- α Period2 Ly- α Period1 Ly- β 

太陽UV放射照度の周期解析

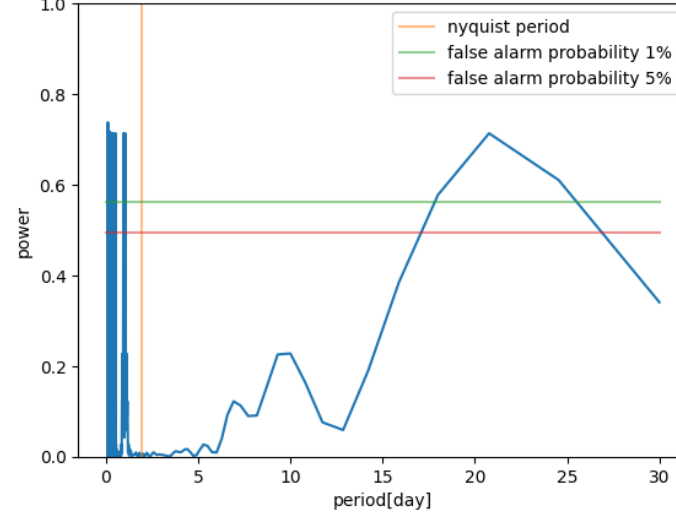
Period1 Ly- α

Solar UV(121.6nm) LombScargle periodgram(2014 03-04)



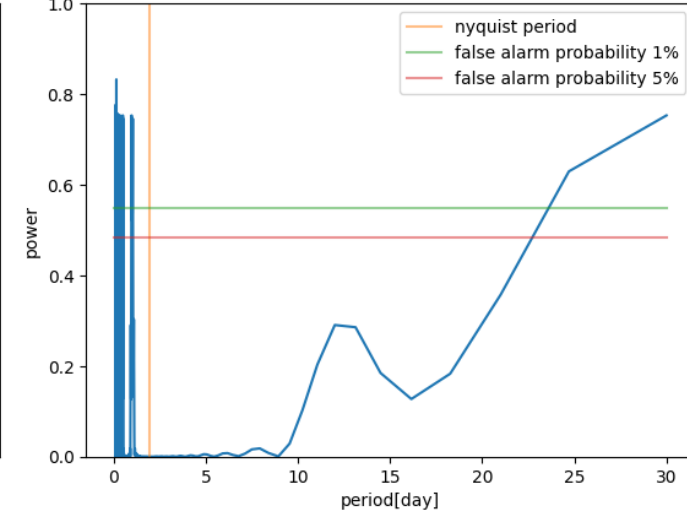
Period2 Ly- α

Solar UV(102.6nm) LombScargle periodgram(2014 03-04)



Period1 Ly- β

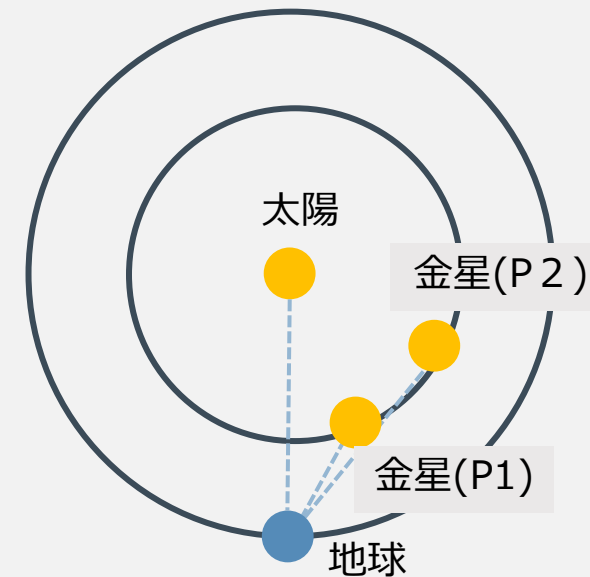
Solar UV(121.6nm) LombScargle periodgram(2014 04-05)



period1とperiod2の違い

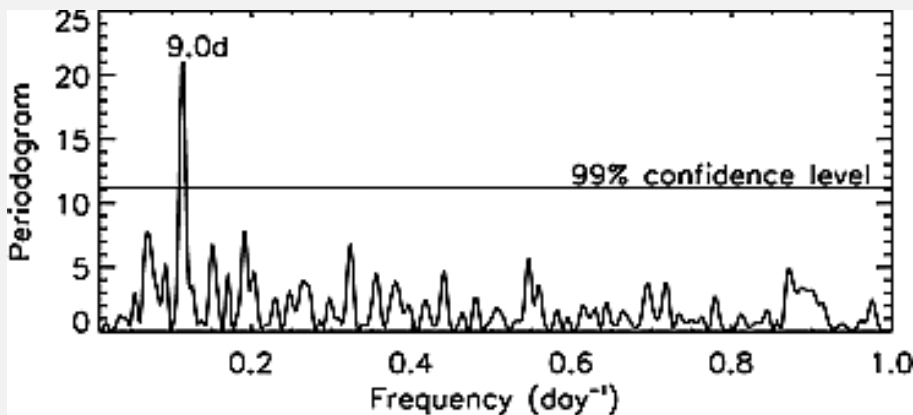
なぜperiod2 は金星水素大気光と太陽UV放射の相関が弱いのか？

- Period2 は金星の離角が大きい
⇒太陽UV放射照度のモデルに誤差がある可能性
- 姿勢制御や観測モードのフラグが不調
⇒データセレクションに不備がある可能性
- Ly-aの発光は地球コロナにも存在し、非常に明るい。
⇒検出器の感度劣化が進行（補正済み）

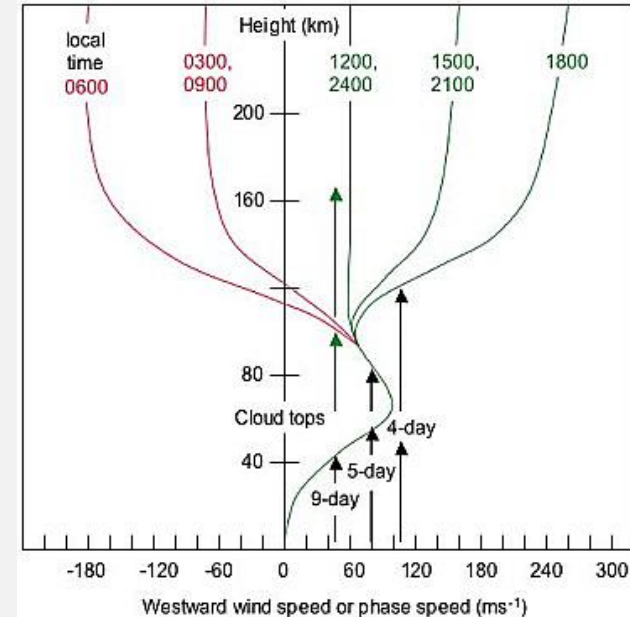


9日周期の変動

- マゼラン探査機による大気密度の観測
(1992-1993)



11日移動平均した金星夜側の大気密度の
ピリオドグラム (Forbes+2007)



金星の大気中の風のプロファイルといくつかの波の鉛直伝播に対する影響の模式図。垂直矢印は、地表または雲の上で駆動される周期が約4日、5日、および9日の波を示している。9日の波は、約1200-2400 LTのMagellan高度まで伝播する可能性があるが、4日および5日の波は低い高度で臨界レベルに達する可能性が高い。

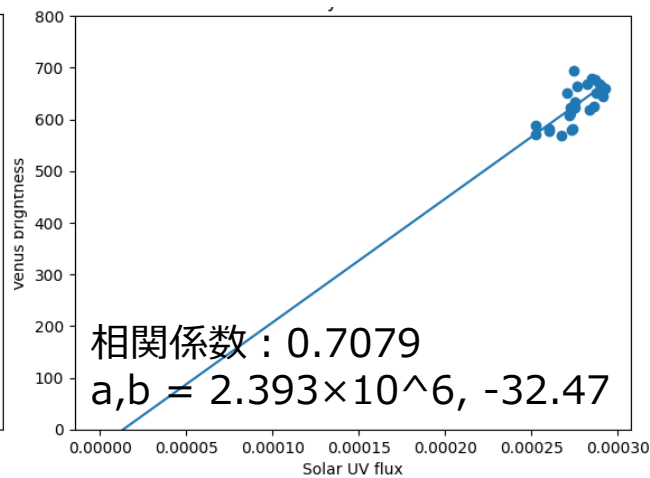
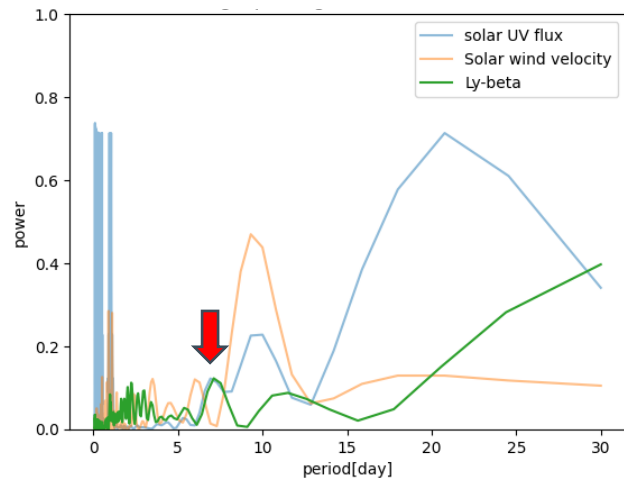
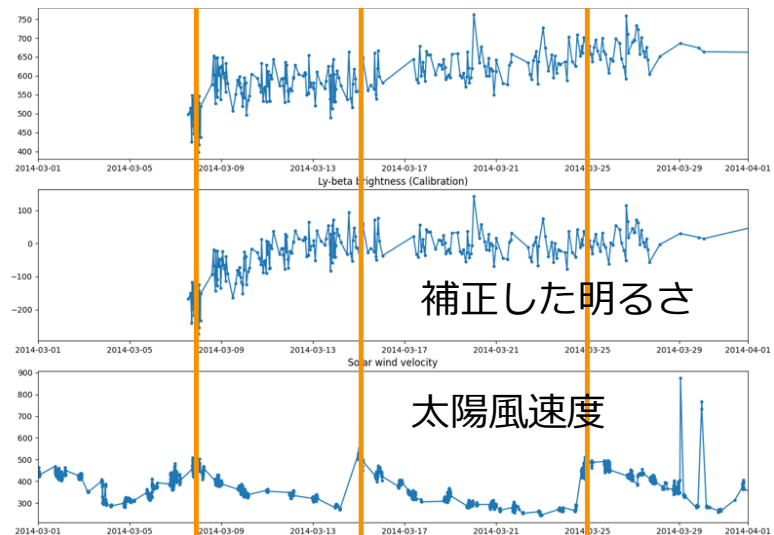
(Forbes+2007)

Ly-βの解析結果 (period1)

Ly-βの明るさ (2014-0309-0403)

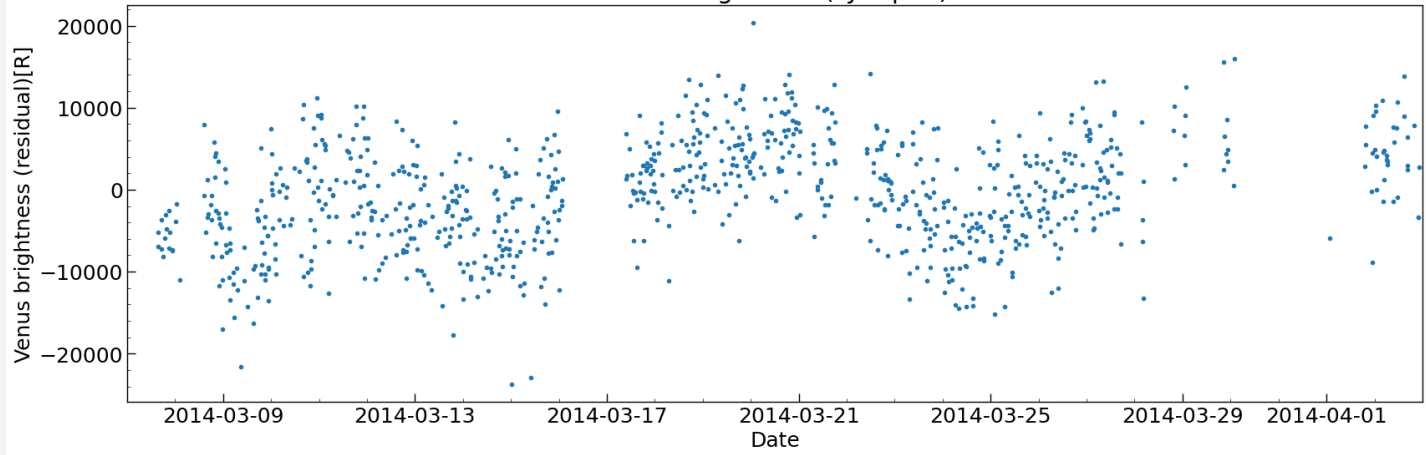
LombScargle periodogram(Ly-β)

Ly-βの明るさと太陽風の相関関係

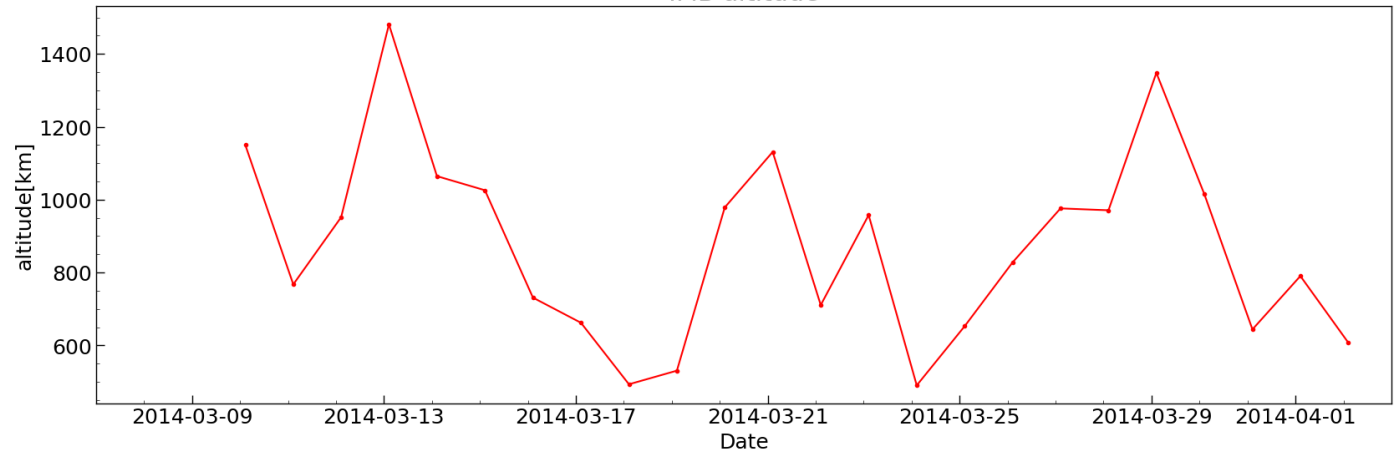


- 太陽UVフラックスと強い相関がある。
- 高速太陽風の到来との対応は見られない。

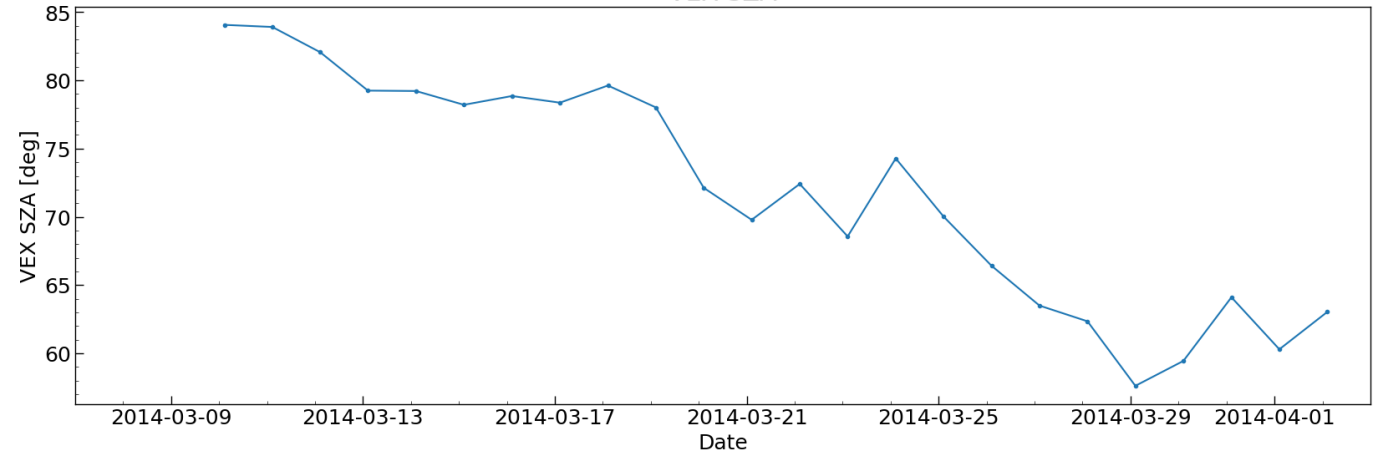
Venus brightness (Ly-alpha)



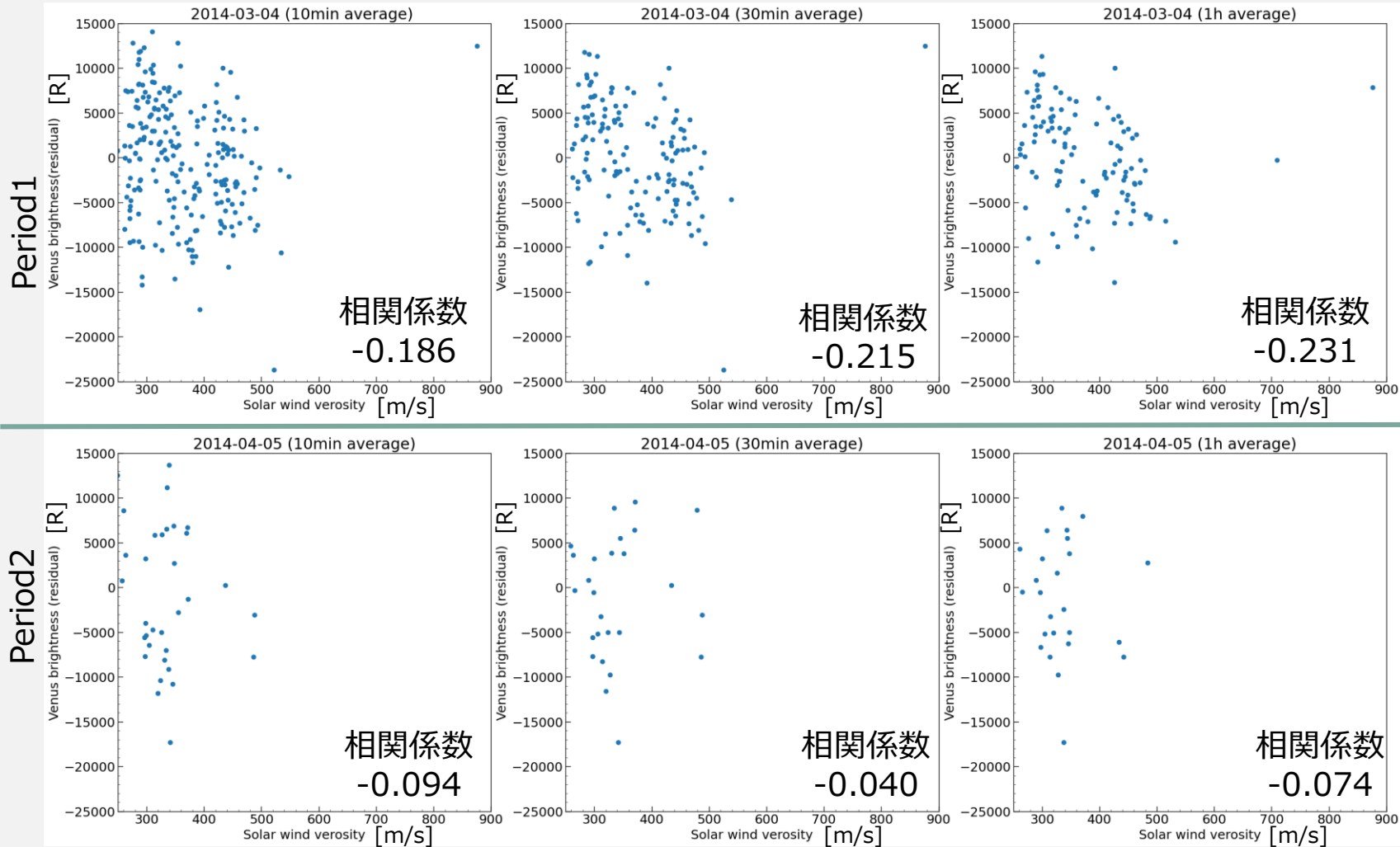
IMB altitude



VEX SZA



金星の明るさと太陽風速度の相関関係



t検定から
 Period1では統計的有意な相関が見られ（95%有意水準）、
 Period2では相関がなかった。