

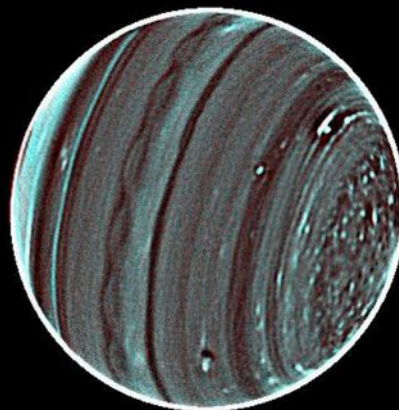
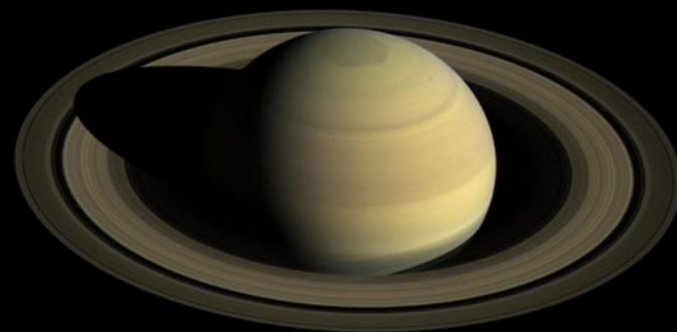
## 近年の成果の紹介

佐藤 毅彦  
(JAXA宇宙科学研究所)

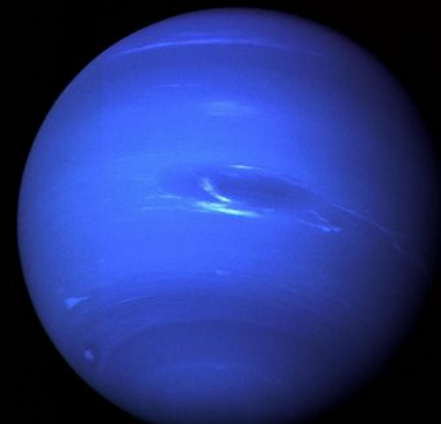
a) 木星(ハッブル宇宙望遠鏡)



b) 土星(カッシーニ探査機)

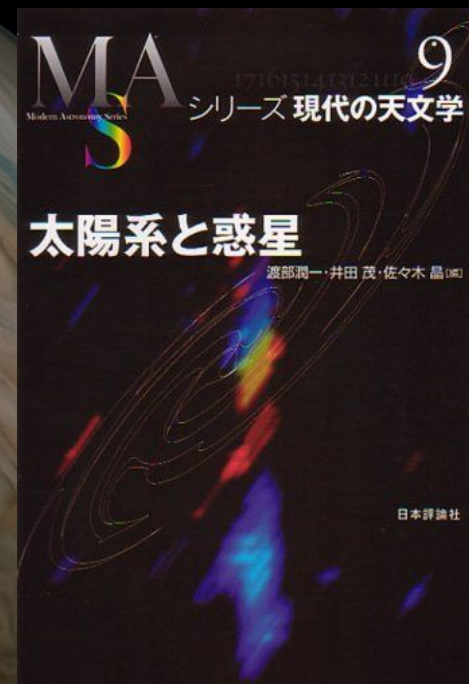


c) 天王星(W.M.ケック望遠鏡)



d) 海王星(ボイジャー2号探査機)

- シリーズ現代の天文学(現代評論社)は、日本天文学会創立100周年記念事業として企画された天文学の教科書で、2007年から全17巻が刊行されました。
  - 執筆から15年ほど経っているわけで、その間の科学の著しい進展を反映すべく、第2版化作業が進められています。
  - 「第9巻 太陽系と惑星」(渡部潤一他編、2008年2月刊行)は、近年に数多くの太陽系天体探査ミッションによる新たな知見があり、特に改版の必要性が高いといえます。
  - 佐藤は「第3章 木星型惑星」を担当しており、この改版過程で(愉しく)勉強したことのうちいくつかを、ご紹介します。

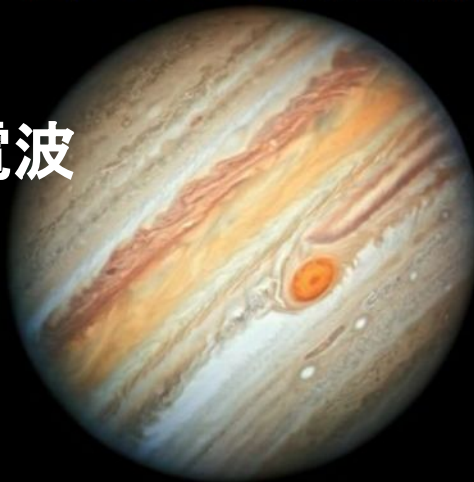




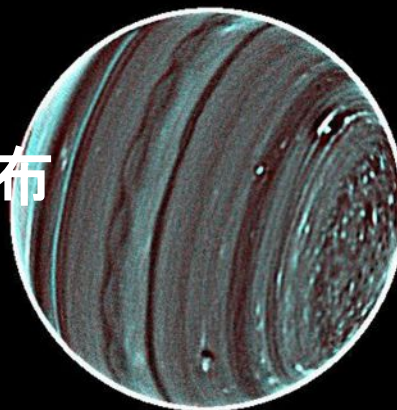
# 本日はご紹介するトピックス

- 土星の自転周期問題
- 土星のオーロラとSKR電波
- 東西風の達する深さ
- 土星の突発的大白斑
- 木星帯縞と雲
- 大粒の「雹」とアンモニア分布
- SL9彗星の木星衝突

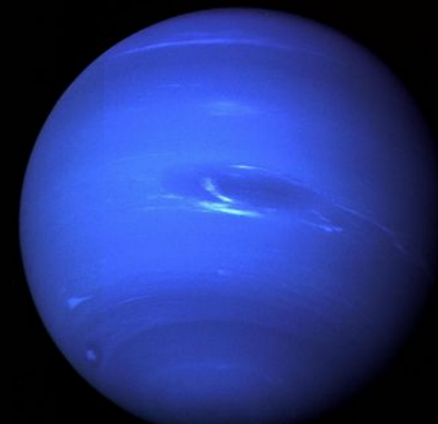
a) 木星(ハッブル宇宙望遠鏡)



b) 土星(カッシーニ探査機)



c) 天王星(W.M.ケック望遠鏡)

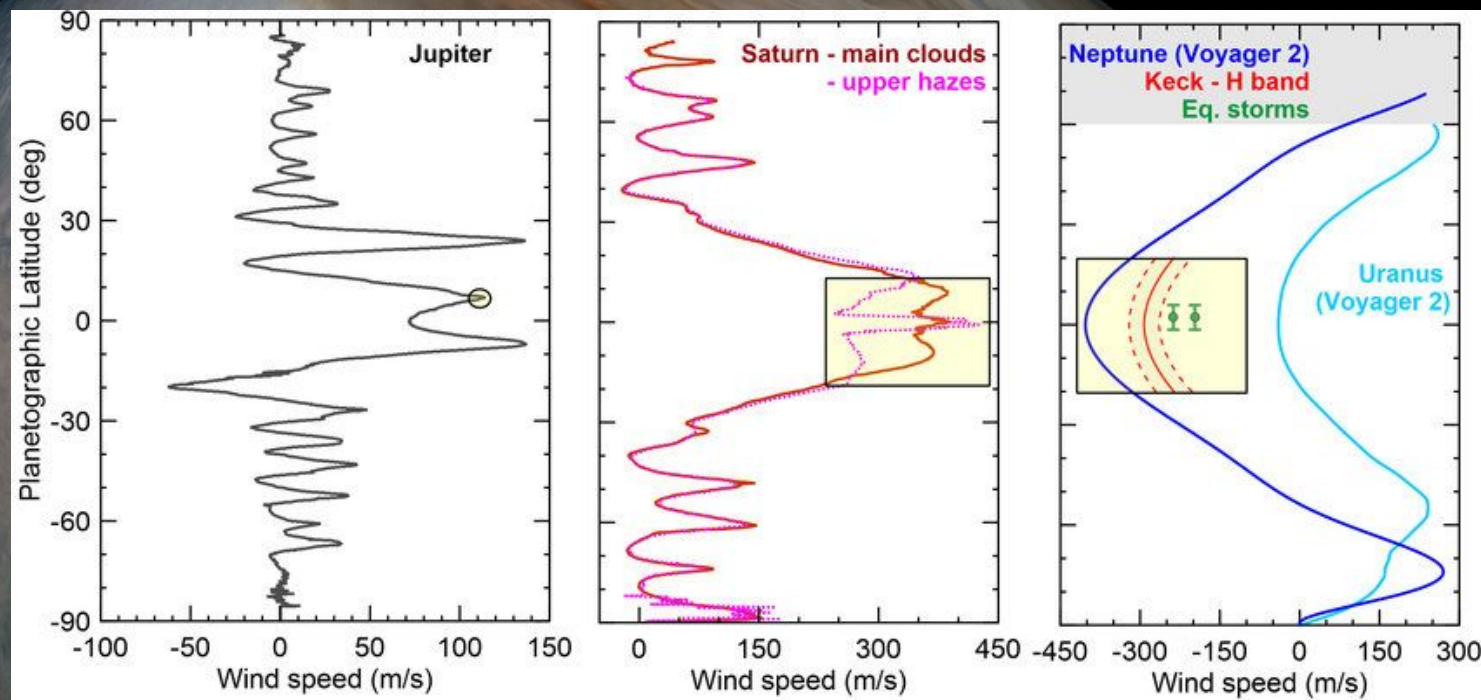


d) 海王星(ボイジャー2号探査機)

# 土星の自転周期問題 (1)

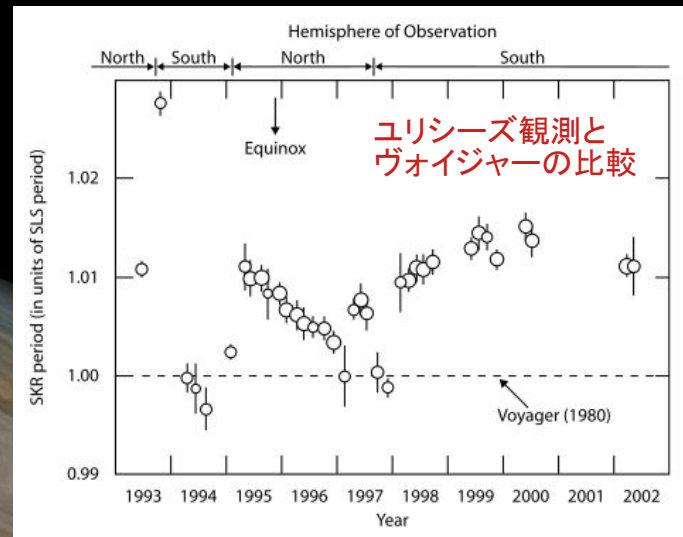
- 木星型惑星大気の風速は「その内部自転周期に対するプラスやマイナスで表す」とされています。
- しかし、土星の内部自転周期は実は木星ほどに正確には求まっていません。土星電波が弱いことに加え、自転軸と磁軸がほぼ一致していて、木星電波のような明瞭な周期性を示しにくいからです。

“In-Situ Exploration of the  
 Giant Planets”  
 ホワイトペーパー(2019)から

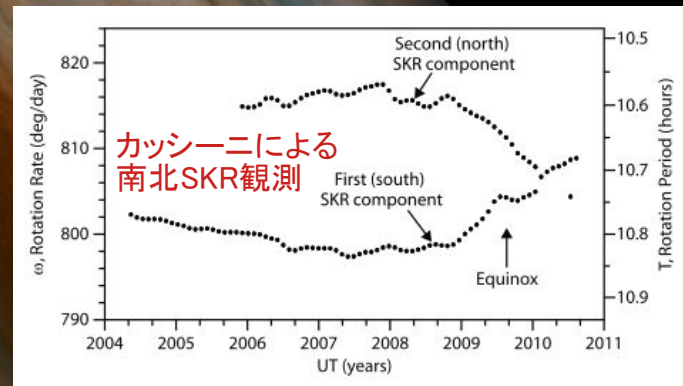


# 土星の自転周期問題 (2)

- 土星からやってくるキロメートル波長電波 (SKR) の変動周期は当初、土星の内部自転周期を示すと考えられました (IAU による経度系の定義)。
- ヴォイジャー2機のフライバイ (1980, 81 年) と、ユリシーズによる 1994 年以降の観測とでは、SKR 変動周期が異なったのです。カッシーニが周回を始めて以降も周期は変わり続けました。
- しかも、北半球・南半球を起源とする異なる SKR 変動周期が見出され (Gurnett et al., 2009)、これは土星内部自転周期を表してはいないと考えられるようになりました。



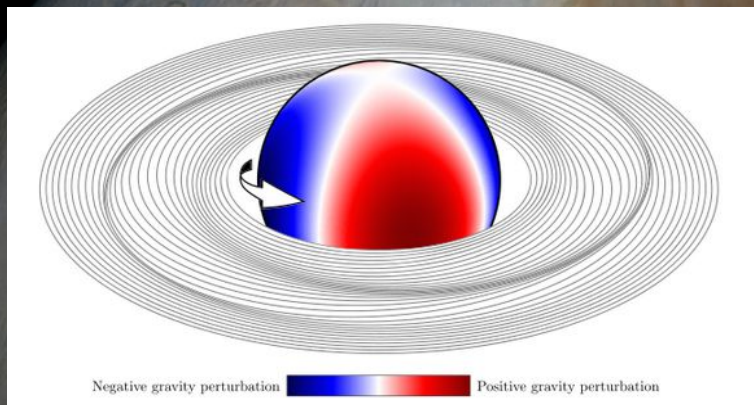
縦軸は Saturn Longitude System (SLS) = 10.6567h を単位



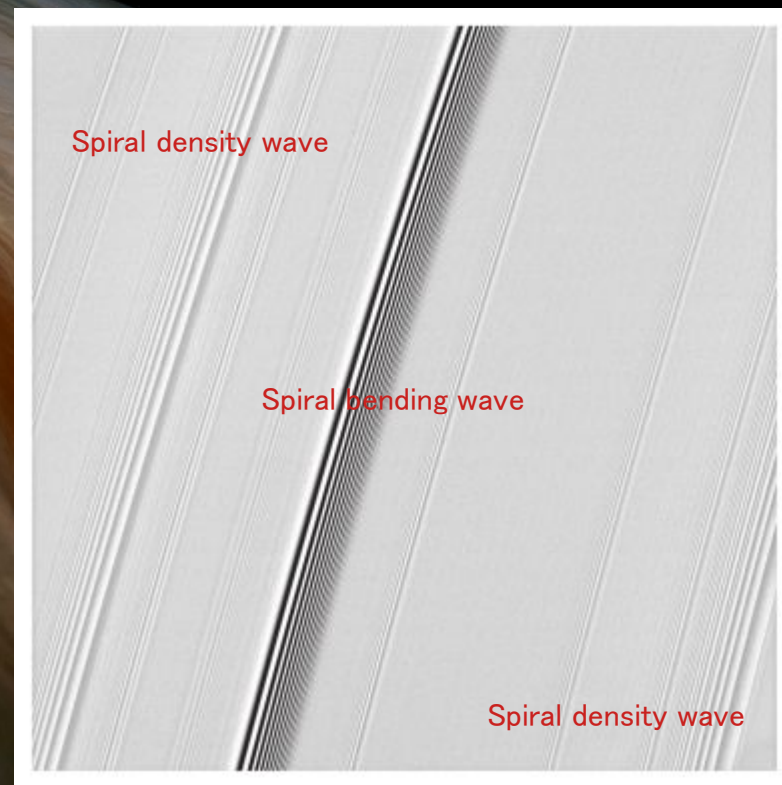
グラフはいずれも Gurnett et al. (2010) から



- 最新の内部自転周期推定値は…
  - パイオニアやヴォイジャーの電波掩蔽データ、風速データの再解析や、惑星波動の解析などから10h34m ( $10.57\text{h} = 0.440$ 地球日)が提唱されています。
  - リングに立つ波の最新解析 (ring seismologyと呼ばれます)からも10.56hが提唱されています。

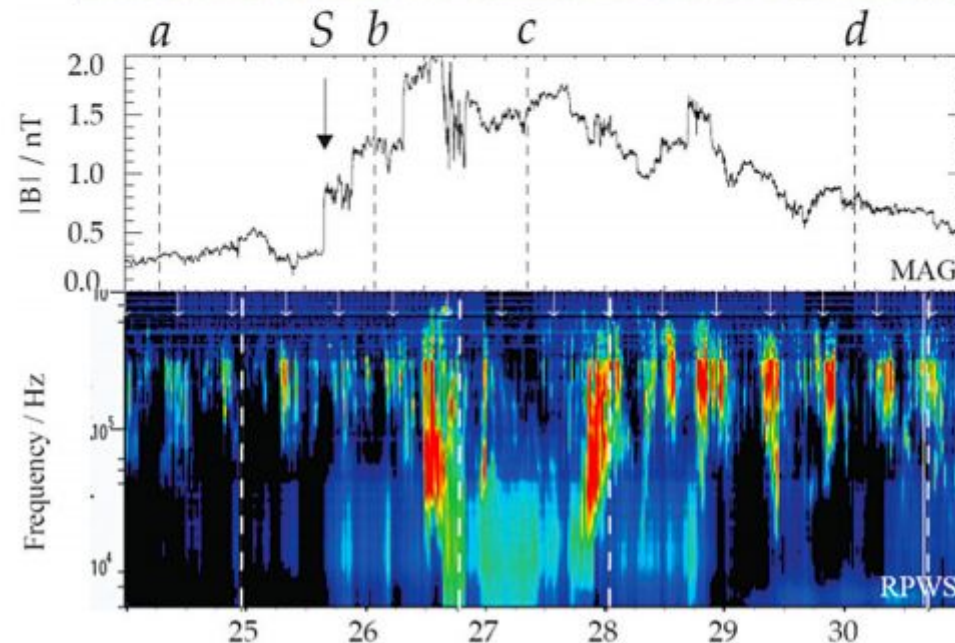
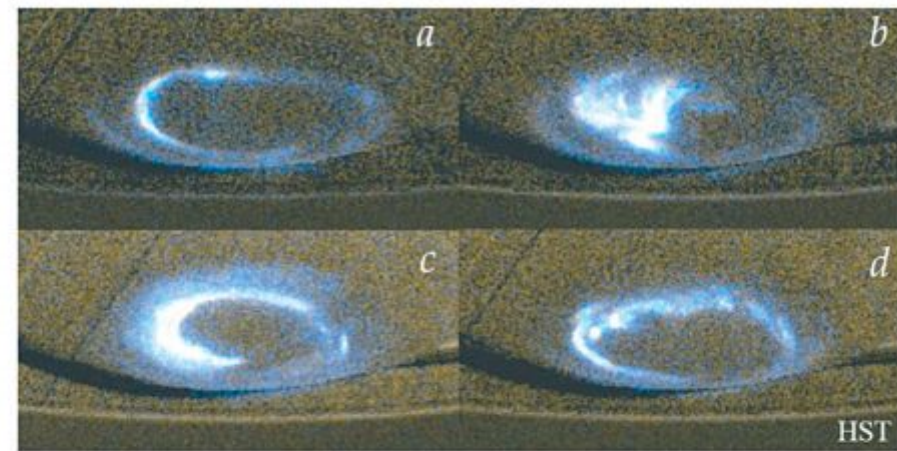


図はいずれもMankovitch (2020)から



- SKRは土星内部ではなく磁気圏に起因する電波放射
  - 近傍磁気圏のプラズマ(エンセラダス起源)と土星高層大気とのカップリング
  - そのため、オーロラとの相関が知られています。
  - HSTによる紫外オーロラの変化、カッシーニによる磁場(太陽風ショックの到来を示す)およびSKR強度変化の同時観測が記録されました。

図はKurth et al. (2009)から

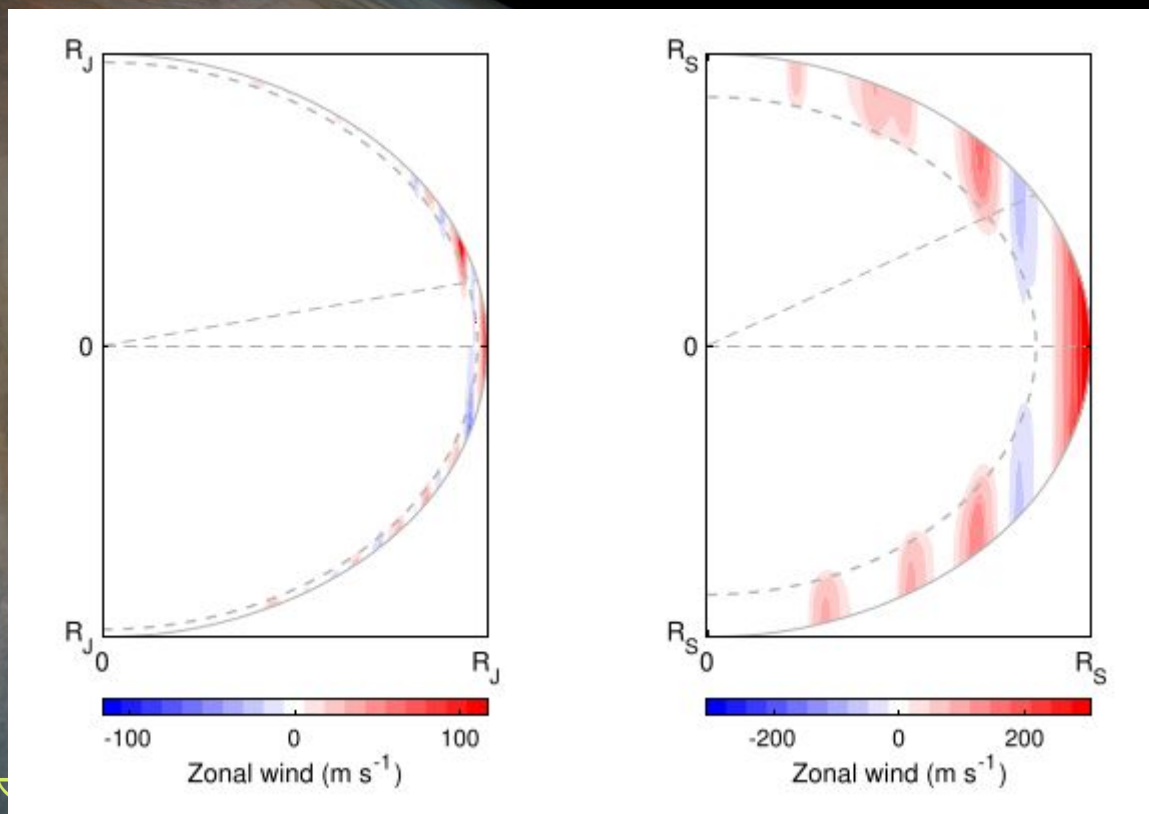




# 東西風の達する深さ (1)

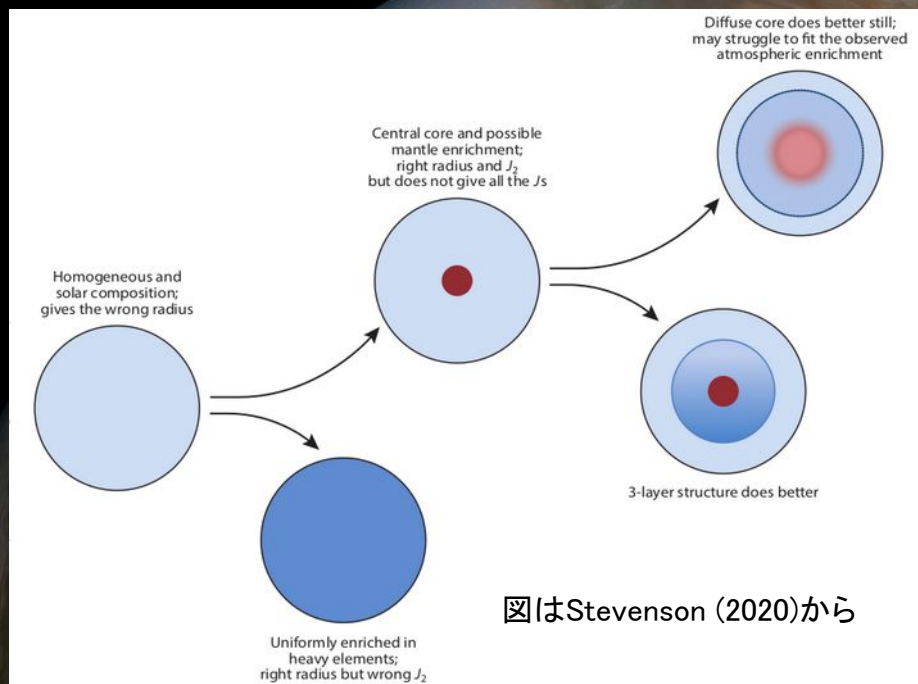
- 木星や土星の東西風が「浅いのか、深いのか」について、さまざまな議論がなされてきました。
  - 周回機による重力場の精密測定、それにもとづく内部構造モデルが提唱されています。
  - それによると、東西風の達する深さは木星で3000 km、土星で10000 km ほどだということです。
  - その範囲で、同軸円柱対流があるとされます。

図はKaspi et al. (2020)から

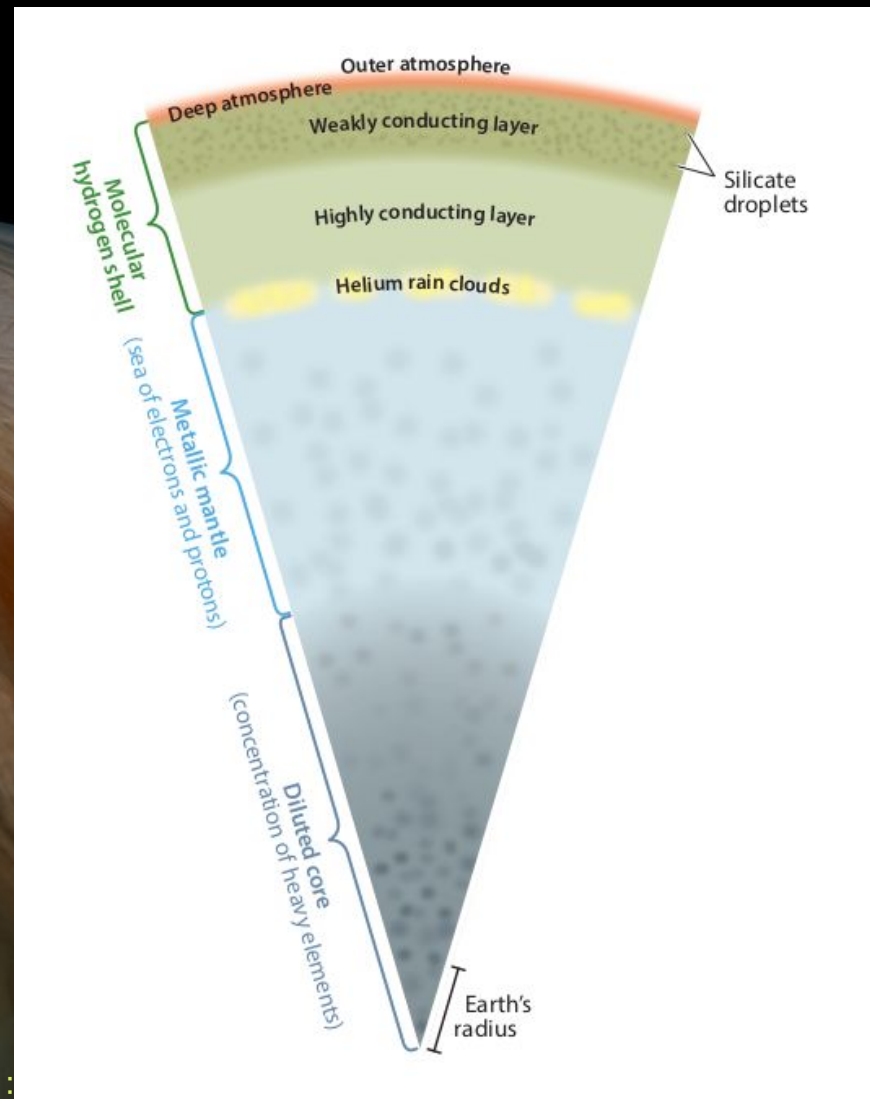




- 木星内部構造モデルの発達
  - 金属水素より上層でも、電気伝導度がある一定値に達すると、流れは磁場に束縛されるようになります。



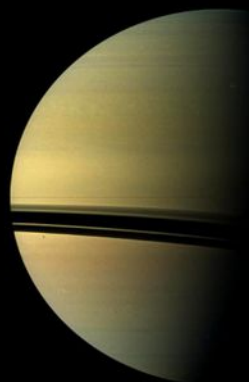
図はStevenson (2020)から



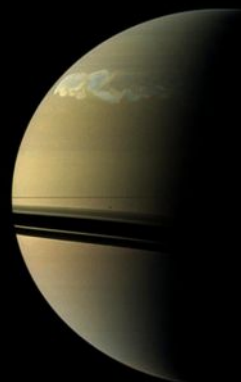
# 土星の突発的大白斑 (1)

- 土星にはときどき、突発的に巨大な白斑が現れて、その活動がしばらく続きます。

Dec 5, 2010



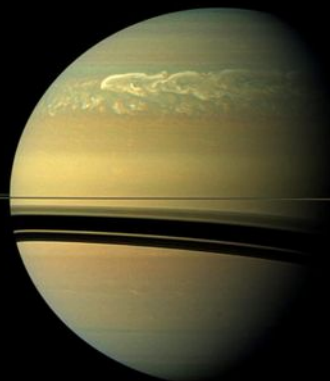
Jan 2, 2011



Feb 25, 2011



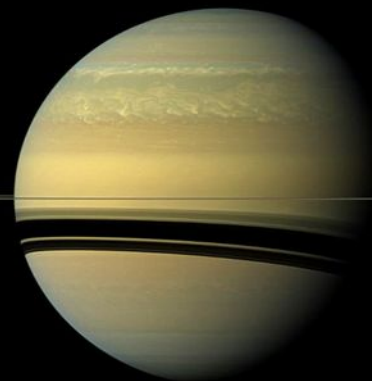
Apr 22, 2011



May 18, 2011



Aug 12, 2011



2021年3月7日



## 土星の突発的大白斑 (2)

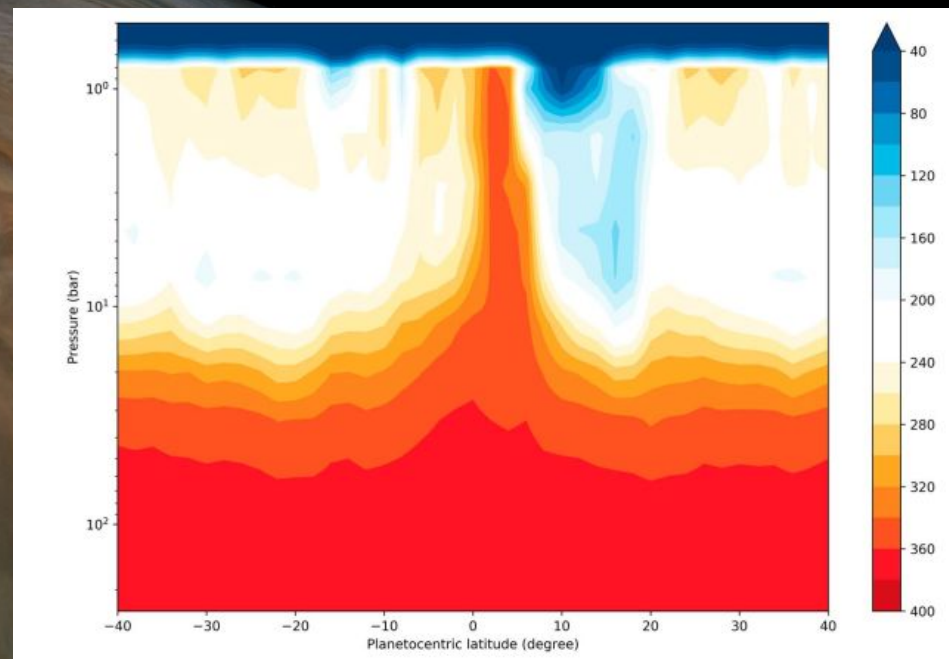
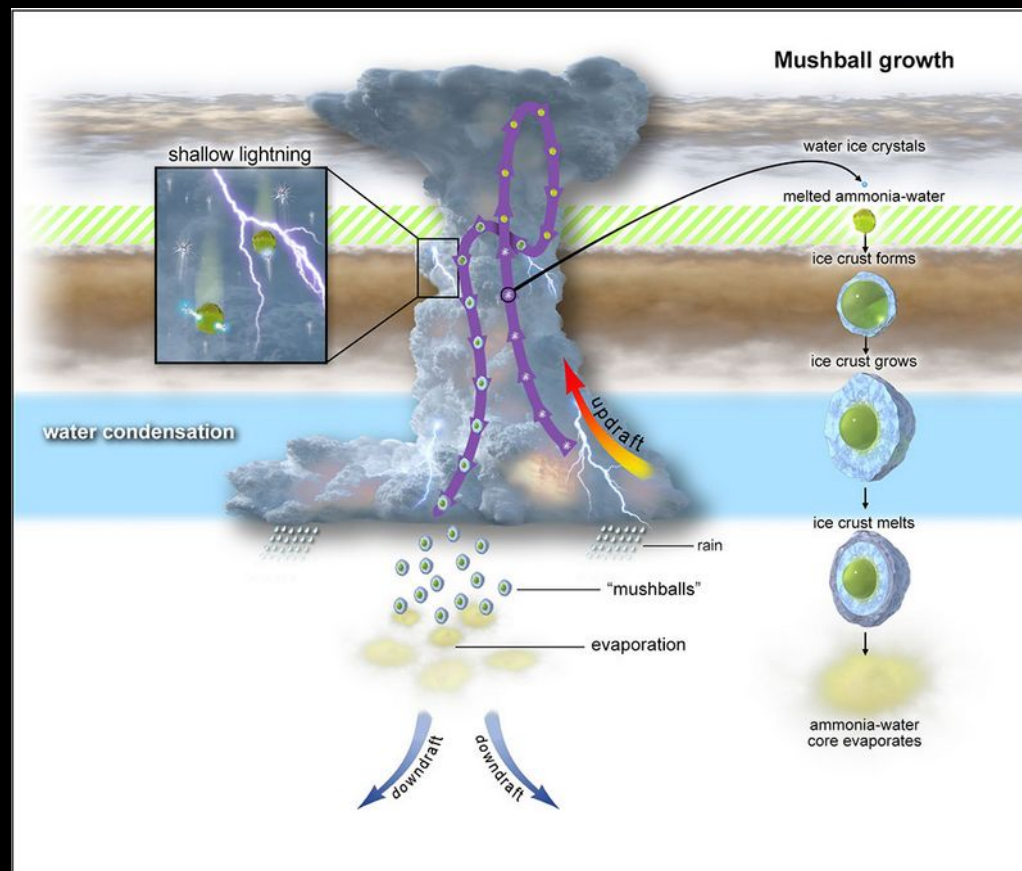
- 大白斑は、北半球にその春分～夏にかけて発生しやすいという準周期的な現れ方をします。Li and Ingersoll (2015)はこの現象を次のように説明しています。
  - いったん白斑活動が発生すると、上層大気に多くの水蒸気が供給され、それが雨滴となり下へ落ちてゆきます。すると上層は乾いて軽く、下層は湿って重くなり、対流は抑制されてしまいます。
    - 水素やヘリウムに比べ、水蒸気の方が分子量が大きいからです。
    - また、土星は内部熱源が十分強くないので、湿った下層大気を対流するまで温めることができません。
  - そのため上層大気が放射冷却で密度が徐々に高まるのを(冬の間)待ち続けます。そして上層大気が十分に冷たく重くなると、ついに次の白斑活動(対流)が発生するのです。

- JUNO画像を見ると、帯領域には小さな粒粒が見えます。
  - 縞領域にはそれらが見られません。
  - よく見ると、粒は盛り上がっています(同じ方向に影ができています)。
  - 白雲はこうした小さな対流単位で供給されているように見えます。
  - 着色物質 (Carlson, et al., 2016)





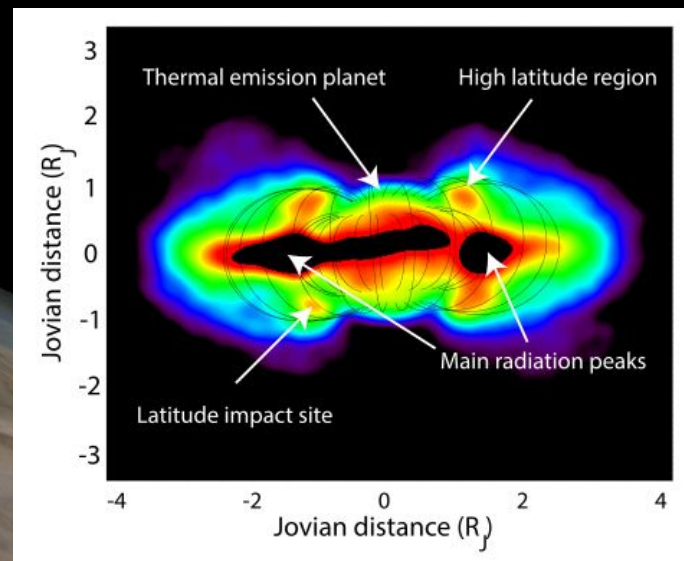
- 木星の水蒸気対流は大粒の「雹」を形成し、それがアンモニアの緯度分布を作っているとする説が提唱されています。



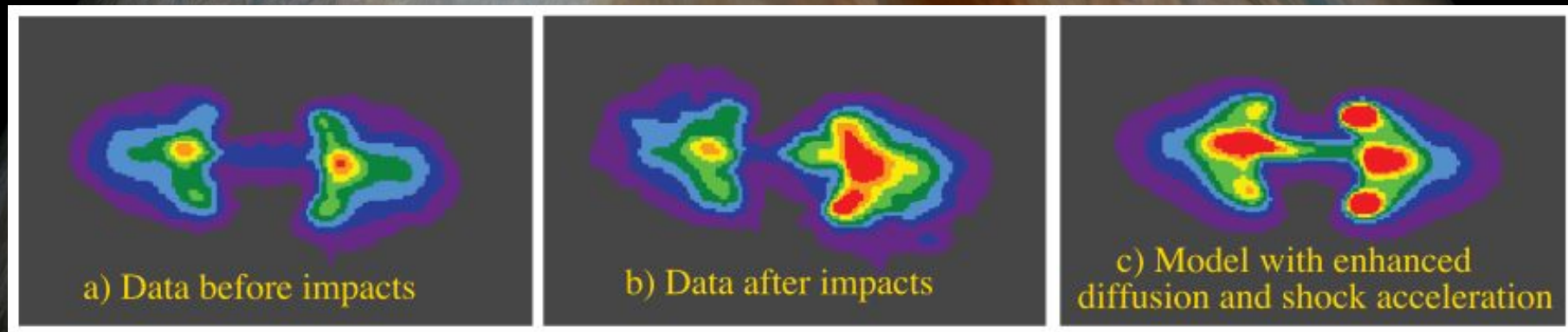
図はLi et al. (2017)から

# SL9彗星(連続した破片)の木星衝突(1)

- ここでは、木星放射線帯から発せられるシンクロトロン電波の構造に見られた変化に注目します(de Pater and Brecht, 2020)。
  - 衝突の週、電波強度は徐々に増し、スペクトルは高エネルギーへとシフトしました。
  - 衝突の終了後、電波強度は元のレベルへ指数関数的に戻りましたが、短波長(高エネルギー電子)ほど長い時間を要しました。



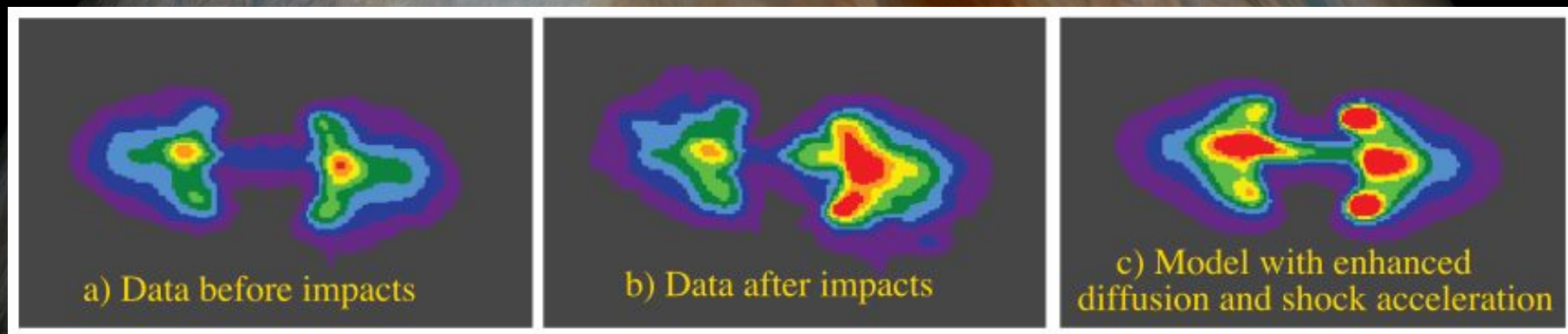
図はいずれもde Pater & Brecht (2020)から





## SL9彗星(連続した破片)の木星衝突(2)

- SL9彗星の衝突は「連続した破片の衝突」であったことから、新たなリスクの存在を教えてくださいました(de Pater & Brecht, 2020)。
  - 大気の衝撃波が電離層に達したとき、アルヴェーン速度を上回ると電磁衝撃波となって磁気圏に伝わり、放射線帯電子を加速します。
  - 先行する破片がダストを大量に電離層に供給すると、アルヴェーン速度が小さくなるので、たやすく電磁衝撃波が発生します。
  - こうして放射線帯電子が高エネルギー化すると、それが地球で起きた場合は衛星通信網などに甚大な影響を及ぼす可能性があるのです。



- 毎年の「10. 惑星に関するデータ」を見比べてみると…
  - 木星の赤道重力  
2.535(2019年まで) → 2.37(2020年から)
  - 土星の赤道重力  
1.067(2019年まで) → 0.93(2020年から)
  - 木星の質量  
317.753(2019年まで) → 317.83(2020年から)
  - 土星の質量  
95.138(2019年まで) → 95.16(2020年から)
  - 土星の自転周期は+0.4440(=10.66時間)のまま更新なし
  - 2020年版からは有効数字に留意した表示となっている上、「反射能」がそれまでの幾何アルベドから球アルベドへと変更されています。

