Patchy Proton Aurora at Mars: A Global View of Solar Wind Precipitation Across the Martian Dayside From EMM/EMUS

Chaffin et al. (2022), *GRL*, 49, e2022GL099881. https://doi.org/10.1029/2022GL099881

火星勉強会 2023/5/16 東京大学 中村勇貴



- EMM/EMUSの観測により、パッチ状のプロトンオーロラ"patchy proton aurora"が火星で確認された
- いくつかのイベントでは、radial IMF条件の時にpatchy proton auroraが生成 されることを示唆
- (典型的な太陽風条件の)他のイベントでは、シースプラズマ乱流に関連した新しい 形成メカニズムが必要となる。

イントロ:火星のオーロラ

[Schneider et al., 2021]



Discrete aurora

 超熱的電子(>5eV)が火星夜 側大気に降り込み、局所的に 発光する(e.g., Bertaux et al., 2005; Schneider et al., 2021; Lillis et al., 2022)

Diffuse aurora

 太陽高エネルギー粒子(>100 keV)が火星大気全域に降り 込み、夜側全域にわたって発 光する(e.g., Schneider et al., 2015, 2018; Nakamura et al., 2022)

Proton aurora

 太陽風プロトンが水素コロナ と電荷交換して生成された
 H-ENAsが火星大気と電荷交 換をさらに繰り返す際に発光 (e.g., Deighan et al., 2018; Hughes et al., 2019)

イントロ:プロトンオーロラとは

- 電子オーロラの発光と異なり、大気分子が光るのではなく、降り込むプロトンの電荷交換によって生じる高速水素 原子(H-ENAs(energetic neutral atoms))からの発光 (降り込む粒子自体からの発光)
- 火星では固有磁場がない。太陽風プロトンはBow shock を通過できない。
- H coronaがBow shockよりも広がっていれば、太陽風プロトンはBow shock到達前にH coronaとの相互作用で電荷交換、energetic neutral atom (ENA) 生成 (高速の水素原子)。これはBow shockを通過(太陽風fluxの2%、 Wang et al., 2018)し、火星大気に深く侵入してさらに複数回大気分子と電荷交換を繰り返す過程でLyαを放出
 以下の衝突反応で生成される
 - 以下の衝失反応で主成される H⁺ + H_{corona} → H_f^(*) + H⁺_{pickup}
 - $\begin{array}{l} H_f + CO_2 \rightarrow H_f{}^* + CO_2 \\ H_f + CO_2 \rightarrow H^+ + e^- + CO_2 \\ H^+ + CO_2 \rightarrow H_f{}^* + CO_2{}^+ \end{array}$

 $H_f^* \rightarrow H_f + hv$



[Hughes et al., 2019]

s c sc c

イントロ: proton auroraによるLy α emission



 \Box Ly α emission

- ●H coronaと太陽光のresonant fluorescenceによってbackground で光っている。
- Proton auroraとH coronaの違い
- ➤H corona emissionは光学的にthick, Hの大きいscale height によって高度 方向にflat
- Proton auroraはdoppler shiftにより光学的にthin & energy deposition processによってpeaked なprofile

イントロ:プロトンオーロラのLT・季節依存性 (Hughes et al., 2019)

■ Daysideで主に発生する

□Ls~270(南半球夏)で発生頻度最大

● H coronaの季節変動

 ✓ Hの存在量、高度ともにLs270付近で 最大[Chaffin et al., 2014]

- CO2大気の季節変動
 ✓ Ls270ではCO2密度増加 [Bougher et al., 2017]
- ✓ => Ly α のpeak高度が上昇
- ✓ Dust storm による気温上昇、水の高 高度輸送はH corona 増大を促し、 proton auroraの高度・強度・頻度を 増加させる



イントロ:proton auroraの空間スケール

- ●上流の太陽風密度・速度空間変動スケールは火星より大きい (Marquette et al., 2018)
- ●Hコロナの空間的変動もgradual (Chaufray et al., 2015)
- → 典型的な太陽風条件だと、 H-ENAsの降り込みfluxはdaysideで一様となる(Wang et al., 2018)。



 MAVEN/IUVSの観測で、proton auroraの高度profileの変動が確認されたが、MAVENはlimb scanごとに数百km移動するので、空間変動か時間変動か切り分けることはできなかった(Hughes, 2021)。

観測装置:EMM/EMUS

- The Emirates Mars Mission (EMM) "Hope (Al Amal, in Arabic)" (Amiri et al., 2022)
- ●アラブ首長国連邦の火星探査機
- ●2020年7月に種子島宇宙センターからH-IIAで打ち上げ
- ●高高度軌道(20,000km-43,000km, 1 orbit = 55 hours)
 - ➡ 火星の全球remote観測に特化
- 3つの観測器を搭載
- 1. EMIRS (赤外分光器)
- 2. EXI (UV-Visの6band: 220, 260, 320, 437, 546, 635 nm)
- **3.** EMUS (The Emirates Mars Ultraviolet Spectrometer) (Holsclaw et al., 2021)
- ・波長範囲は100-160 nm
- Observation StrategyのOS1(OI 130.4, 135.6 nm), OS2(Lyα, β)を使用



結果1: 2021/8/11, EMUSイメージ

- 2021/8/11に、LyβとLyα両方で patchy emissionが確認された
- ●このorbitの観測で、唯一この観測でのみ、patch発光が捉えられた
- H原子が生成するLyβとLyαで増光し、0130.4と135.6nmでは対応する増光がない
- ➡ ENAに関連する外来起源が強く示唆 される。Hコロナ起源ではない

(理由)

●局所的な加熱源によって光学的に厚い Hコロナからより多くの太陽光が散乱 されたとすると、O発光にも影響を与 えたはずだから



結果1:2021/8/11, MAVENプラズマ観測データ

- ●誘導磁気圏は不安定
- ●高度500km以下の近火点付近で、太陽風起源のH+, He++を観測
- ●MAGデータは、変動が激しく、弱い磁場を観 測。Parker spiral IMF条件で予想される典型 的なdrape磁場ではない
- ●この時、宇宙天気イベントは発生していない
- IMFがbow shockの法線と垂直。Radial IMF 条件であることを示唆
- ●MAVEN/SWIAとSTATICは、太陽風起源 plasmaと電離圏起源のcold plasmaを近火点 通過期間に同時に観測。太陽風が電離圏と直接 相互作用している様子を捉えている。



結果2:2021/8/30, EMUSイメージ



火星勉強会

結果2: 2021/8/30, MAVENプラズマ観測データ

- ●このイベントでは、IMFは典型的なParker spiral
- SWIA, STATICは太陽風H+/He++を近火点で観 測していない
- MAVEN近火点直後の磁場ベクトルの向きから patchy auroraの位置で磁場がdrapeしている
- ●準平行プラズマ乱流がH+またはH-ENAのlocal な降り込みに繋がっていることを示唆
- MAVENは直接オーロラ領域を計測していない ので、proton, Hどちらがオーロラを引き起こ したかはわからない。
- Protonが降り込むためには、シースや衝撃波前 面と繋がった熱圏磁力線が必要
- ●もしくはシースや衝撃波前面で鉛直下向きENA が生成された可能性



結果3:2021/12/17,EMUSイメージ

- EMUS Hydrogen Ly β 102.6 nm ●2021/12/17、残留磁場領域で patchy proton auroraが観測され た (10S, 170E付近) 80 ●8/11、radial IMF条件でdayside全 60 体にオーロラが発生したのとは異な 40 り、このイベントでは、「南半球の 最も強い残留磁場の領域」の北側の - 20 弱い残留磁場領域に限定してオーロ ラが発生した ●このイベントでは、O 135.6 nmで EMUS Oxygen 130.4 nm もLyaと同じ領域で増光が見られた (初めての中性大気のdaysideオー ロラ) - 600 ● O135.6 nmオーロラを光らせるため -400 _R には、dayglowを光らせる太陽EUV
 - による電離フラックスと同等の proton energy fluxが振り込んでい なければならない



結果3:2021/12/17, MAVENプラズマ観測データ

●このイベント時、MAVENは太陽風上流にいて、太陽風H+ flux, near radial IMFを観測した





- ●EMUSの火星ディスク観測のうち、2%(17/967)でpatchy proton auroraを観測した。
- ●2021/8/11,30, 12/3,17の特に明るいpatchy proton auroraは、dawn-noonにかけて強い残 留磁場領域で確認された(duskで見られないのはサンプリングのせいである可能性もある)
- ●残留磁場がterminator付近に位置するとき、シースのプロトンの流れが複雑な障害を受け、プラズ マ乱流が増大し、プロトンがより降り込み、オーロラが明るくなる可能性がある
- Patchy proton aurora検出の多くは、北半球秋の遠日点後の2021年8月から2022年1月の Ls80-160の間に発生し、この期間の発生率は4%で、2021年12月に顕著なスパイクを示した。
- 北半球の夏はHコロナが膨らみにくく、uniformなプロトンオーロラの発光強度が小さいため、異常なプロトンオーロラを観測しやすいと考えられるが(Hughes et al.、2021)、この場合、観測されるような歪んだ分布ではなく、北半球の夏頃に対称的な効果をもたらす可能性がある。

まとめと展望

- ●EMM/EMUSの火星昼側全球観測から、patchy proton auroraが発見された
- いくつかのイベントでは、radial IMF条件の時にpatchy proton auroraが生成されることを示唆
- (典型的な太陽風条件の)他のイベントでは、シースプラズマ乱流に関連した新しい形成メカニズム が必要となる。

●太陽風と磁気圏の典型的な定常相互作用がdaysideに広がる乱流プラズマダイナミクスに置き換わった時に、電離圏・熱圏ダイナミクスへの影響や、sputteringによるescapeへの影響は不明である。これらの条件が火星の大気進化に与える影響を明らかにするためには、今後多くのデータとモデリング研究が必要である。