Variability of Upstream Proton Cyclotron Wave Properties and Occurrence at Mars Observed by MAVEN

Romeo, O. M., Romanelli, N., Espley, J. R., Mazelle, C., DiBraccio, G. A., Gruesbeck, J. R., & Halekas, J. S. (2021). Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, e2020JA028616. https://doi.org/10.1029/2020JA028616

> 京都大学 加藤倫生 2021/04/06 火星勉強会

Abstract

The presence of plasma waves upstream from the Martian bow shock, with frequencies near the local proton cyclotron frequency in the spacecraft frame, constitutes, in principle, an indirect signature for the existence of planetary protons from the ionization of Martian exospheric hydrogen. In this study, we determine the "proton" cyclotron wave" (PCW) occurrence rate between October 2014 and February 2020, based on Magnetometer and Solar Wind Ion Analyzer measurements from the Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN mission. We characterize its dependence on several wave and solar wind (SW) properties, and solar longitude ranges. We confirm a previously reported long-term trend with more PCWs near perihelion, likely associated with changes in exospheric hydrogen density. Furthermore, we report for the first time a decrease in median PCW amplitude for each consecutive Martian perihelion. Such variability cannot be attributed to differences in the distribution of SW conditions. This trend could be associated with changes in solar inputs, foreshock effects, and asymmetries due to the SW convective electric field influencing newborn protons. In addition, we observe PCWs more frequently for low to intermediate interplanetary magnetic field (IMF) cone angles, slower SW speeds, and higher SW proton densities. The IMF cone angle preference likely results from the trade-off between associated linear wave growth rates, wave saturation energies, and pick-up proton densities. Moreover, the dependencies on SW speed and density indicate the importance of the characteristic SW transit timescale and the charge exchange process coupling SW protons with the hydrogen exosphere.



1. Introduction

2. Events

- 2.1. Instruments
- 2.2. Case Study : 2018/11/26
- 3. Selection Criteria
- 4. Results
 - 4.1. Temporal Variability of PCW Occurrence Rate
 - 4.2. Main Properties
 - 4.3. Solar Wind Conditions Favoring PCW Generation
- 5. Discussion
- 6. Conclusions

introduction

- 非磁化惑星では大気・電離層と太陽風(以下SW)が直接相互作用する(e.g., Acuña etal., 1998; Mazelle & Neubauer, 1993; Tsurutani, 1991; T. L. Zhang etal., 2008)
- 火星では電離層・外気圏が障害物として機能し、約1.6RMでBow Shock(以下BS)
 を形成(Mazelle etal., 2004)
- 水素外気圏がBSを超えて広がっていると中性粒子はイオン化され、生じた惑星起 源プロトンは磁化したSWに拾われ火星の大気損失に寄与する(Chaffin etal., 2015; Chaufray etal., 2008; Jakosky etal., 2015; Yamauchi etal., 2015)
- これらのイオンは電荷交換、光イオン化、火星水素外気圏への電子衝撃プロセスの結果である(M. H. G. Zhang etal., 1993)

- 初め新生プロトンは火星に関してほぼ静止(イオン平均速度はSW基準でほぼ-VSW)
- 粒子は平行速度成分で惑星間空間磁場Bに沿ってドリフト、垂直成分・ジャイロ周 波数でB周りを旋回
- SWイオンと新生イオンからなるプロトン速度分布は非常に不安定でいくつかの低 周波電磁プラズマ波を引き起こす可能性がある(Brinca, 1991; Lee, 1989; Wu & Davidson, 1972; Wu & Hartle, 1974)

○ 電磁イオン-イオン右手(RH)および左手(LH)共鳴不安定モードを励起

- LH共鳴不安定:大きなIMFコーン角に対してより大きな線形成長率
- RH共鳴不安定:低·中程度のコーン角で最も容易に励起

- 両不安定性について衛星(以下SC)とSW間の相対運動によりドップラーシフトされる $\omega_{SC} = \omega - \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_{\parallel}^{SC}$
- 新生イオン基準系で予想される波の周波数はRHモードLHモードの両方で

$$\omega_i = \omega - \boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{v}^i$$

 特に、RH共鳴モードは中程度の cone angle について以下のサイクロトロン共鳴 条件を満たす

$$\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{v}_{\parallel}^{\boldsymbol{i}} + n\boldsymbol{\Omega}_{\boldsymbol{i}} = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

新生イオンが火星についてほぼ静止しているとすると、RHモードのSC基準系で観測された波の周波数は以下のようになる

$$\omega_{\rm SC} = -n\Omega_i$$

- したがって観測された周波数 ωSC は新生イオンサイクロトロン周波数に近く、SW 基準系とは反対の偏波であると予想される
- この観測された周波数は局所プロトンサイクロトロン周波数に非常に近い為、「プロトンサイクロトロン波」(PCW)として知られている
- PCWの検出は新生プロトンの存在の間接的な兆候とされている(Brinca, 1991)
- 第1式のドップラーシフトに関する項はLH不安定モードでは小さいことに注意
 - したがってLH不安定性から生じた波も、局所プロトンジャイロ周波数に近い周波数で観測され、 SW・SC両方の基準系で左偏波になると予想される
- 本研究ではMAVENに搭載された磁力計MAGと太陽風イオン分析器SWIAの 2014/10~2020/02の測定値を分析した
- 厳密な基準でPCWイベントを特定し、発生率の変動、波の特性、発生に有利なSW 条件を分析する

Instruments (MAVEN)

- MAVEN: the Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN mission
 - 2013年11月打ち上げ、2014年9月に火星到着
 - 近火点高度150km、遠火点高度6220km、軌道周期4.5時間
- MAG:磁力計
 - 精度0.25nT、サンプリング周波数32Hz
 - PCWはSC基準周波数がMAGサンプリング周波数と比べて低い (IMF強度約4nTで約0.06Hz)ので、32Hzデータから4Hzの磁場平均を計算している
- SWIA:イオン分光計
 - 視野360°×90°、エネルギー範囲25eV/q 25keV/q
 - 波が存在するSW条件を調べるために使用

Case Study : PCW Event on 2018/11/26

- 図1:2018/11/26 16:12:18UT -16:20:50UTで観測されたPCWイ ベント
- 磁場とSW速度のMSO成分と大き さ、イオン密度
- 波の振幅は約0.3nT、平均IMFは B0=[2.6,-2.4,0.9]
- このイベントの場合、平均SW速度はvSW=[-344.0,54.7,3.6]コーン角は36.0°
- SW速度の変動は磁場変動と同じ
 周波数を持っている
- σ/s=0.04でわずかな圧縮率



- 図2(a)図1と同じ時間間隔512秒での B0に関する平行成分と垂直成分のパ ワースペクトルダイナミクス
- 破線は局所プロトンサイクロトロン周波 数fc=0.056Hz
- PSD[Bperp]の値はfc近く
 0.051Hz(0.91fc)で最大になり、同周
 波数でのPSD[Bpara]の約28倍
- (b)16:14:50~16:15:44のホドグラム
- 伝播角θkBは16.0°で平均磁場に準平 行
- ほぼ円形(λ1/λ2=1.07)、平面波 (λ2/λ3=82.52)であり、振幅は δB=0.5nT
- 波は衛星基準で左偏波で、以前に報告されたPCWの特性と一致



PSD and MVA of MAVEN MAG Observations: 26 Nov 2018, 16:12:18 - 16:20:50 UT

PCW Selection Criteria

- 火星の上流領域を特定するために、 Gruesbeck et al.(2018)のBS model の semilatus rectum を25%拡大させたものを 境界とする
- 上流データを512秒に分割し隣接するセグメント間で90%重ねる
 - この間隔はPCWの少なくとも約10周期 をカバーできる
- それぞれのセグメントで次の3条件を満たす か識別



https://mathworld.wolfram.com/SemilatusRectum.html

1) 垂直磁場成分のパワースペクトルダイナミクスが局所プロトンサイクロトロン周波数 fc付近でピーク

$$PSD[B_{\perp}]_{0.8f_{c}-\Delta f}^{1.2f_{c}+\Delta f} > \xi_{\perp}PSD[B_{\perp}]_{1.2f_{c}+\Delta f}^{1.4f_{c}+\Delta f}$$

$$PSD[B_{\perp}]_{0.8f_{c}-\Delta f}^{1.2\xi+\Delta f} > \xi_{\perp}PSD[B_{\perp}]_{0.6f_{c}-\Delta f}^{0.8\xi-\Delta f} \qquad \xi_{\perp} = 1.5$$

fc の不確かさΔf=0.004Hz はMAG機器の不確かさΔB=0.25nT に関連 圧縮性条件

$$PSD[B_{\perp}]_{f} > \xi_{\parallel} PSD[B_{\parallel}]_{f} \qquad \xi_{\parallel} = 3$$

3) 平面波条件

2)

 $\lambda_2 / \lambda_3 > \lambda_{23} = 5$

Temporal Variability of PCW Occurrence Rate Upstream from Mars

- 2014/10~2020/02
- 上流地域で529,659のセグメント
- 図3(a)ビンサイズ15日でのヒストグラム
 - データのないビンはMAVENが上流にい (なかったか、機器がアクティブでなかった
- ビンごとに少なくとも1,000セグメント、平均約
 8,000イベントがあり、最大13,184(01/19)、最小
 1,160(11/14)、総数50,730
 - 11/19 12/19は上流データが少ない(78)
 ため、考慮しない
- (b)PCW発生率
 - 黒破線は上流データの不足を強調
- 火星近火点(PH)と北冬至(NWS)付近のPCW発 生率は最大30~35%、遠火点(AH)付近で平均 約2%、3%未満



- 3つのピークはそれぞれ太陽系度(Ls)の範 囲 280°~302°内で発生
 - PH(Ls=251°)、NWS(Ls=270°)の少し後に発生
- 毎年のPCW発生率の増加は火星の砂嵐 シーズン(180~360)の一部の間で発生
 - 図中の灰色領域
- (c) 火星年3年間のLsの関数としてのPCW
 発生率
- LsとPCW発生率の関係を考慮するために PH付近とAH付近にグループ分け
 - 各火星年のLs=215~315の範囲で 観測されたデータをハイレートグ ループ(HR1,HR2,HR3)、 Ls=35~135をローレートグループ (LR1,LR2,LR3)
 - 各年はLs=175で開始・終了
- PCW発生率が3%を超える期間をHR範囲 として、その範囲から180°を引いた範囲を LRと定義
 - PCW発生率はそれぞれ
 - HR1: 25%, HR2: 14%, HR3: 16%, LR1: 2%, LR2: 1%, LR3: 2%



- 図4:各MSO空間座標の関数としての正 規化した発生数のヒストグラム
- XMSO分布は対応するHRグループ、LR グループの間で全体的に類似
 - ただULR1はHR1に比べてより火星近くに偏っている
- YMSOはLR1を除いたほとんどのグルー プで-3.0~3.0間で同様の範囲をカバー
- ZMSOのカバレッジが最も変動大
 - HR1は主に南半球、LR1は両半球をカバー
 - 2年目はどちらも主に北半球を網羅
 - HR3は主に南半球をカバーし、LR3は北半球を カバー
- 高度はLR3分布が主に低い高度をサンプ リングしていて、他は非常に似ている
- 以上から、近火点・遠火点間の PCW発生
 率変化は衛星位置のサンプリングバイア
 スに起因する可能性が低いと言える
 - これらの空間座標の火星毎年間での変動が小 さいため



PCW Main Properties

- 波動特性の関数としての PCWイベント数を PCW 確率分布関数 P(x)として定義
- 図5:は各波動特性についての 2014/10~2020/02の上流PCW確率分布P
- ビンサイズはそれぞれ 0.05nT、3°、0.05、0.50
- (a)振幅中央値は0.46nT。δB = 0.20~0.55nT付近で最大。
- (b)中央値が13.3°、最頻値が10.5°
- (c)中央値が1.56、最頻値が1.35°
- (d)中央値は8.28。減少傾向が見られる



PCW Probability Distribution P(x) Upstream from the Martian Bow Shock (Oct 2014 - Feb 2020)

- 図6:各特性についての、HR・LRグ ループごとのPCW確率分布
 - ビンサイズは図5と同様
- (a)最頻値はHR1:0.53nT, HR2:
 0.38nT, HR3:0.23nT、中央値は HR1:0.65nT, HR2:0.52nT, HR3:
 0.37nT
 - ピークは各年ごとに低いδB値
 にシフトしている
- (e)LRグループでは中央値は約
 0.35nT付近
- (b)全てのHRグループでほぼ同じで、
 中央値と最頻値はそれぞれ約13.0°
 と10.5°
- (f)LRグループ間ではより多くの変動 が見られ、中央値は21.0°近くになっ ている
- (c)(g)どちらも1.35付近でピークに達 する傾向があり、中央値はHRグルー プで1.55、LRグループは1付近
- (d)(h)HRグループの中央値は対応 するLRグループのものより常に高い



図7:HRグループのPCWの振幅の中央 値をXMSOと高度の関数として示したもの

- (a)全ての年で減少傾向を示していて、
 年を経るごとに中央値も減少
 - 火星-太陽線に沿って火星からの
 距離が増加するにつれて振幅が
 減少していることから、火星がこの波の発生源であると示唆される
- (b)HR3で振幅中央値最小
 - XMSOと異なり、振幅中央値と高 度の間に同様の減少傾向は見ら れない



Spatial Distribution of PCW Amplitude Upstream from the Martian Bow Shock (HR Groups)

- 図8:各HRグループのPCW振幅中央値
 とIMFコーン角の関係
- ビンサイズは10°
- 図7aと同様、全てのコーン角でHR1が 最大、HR3が最小の振幅中央値をとる
- HR1での減少傾向は見て取れるが、その傾斜の度合いは平均して年を経るごとに緩やかになっている



PCW Amplitude Upstream from the Martian Bow Shock (HR Groups)

Solar Wind Conditions Favoring PCW Generation

- 図9(a)~(e):上流太陽風条件ごとの上流セグ メント数のヒストグラム
 - ビンサイズはそれぞれ、5°、50km/s、 10km/s、4.0/cm^3、2.0×10^8cm^2/s
- 上流セグメントのほとんどはα > 45°、vSW ~ 350km/s、vA ~ 35km/s、 nSW < 4/cm^3、nSWvSW ~ 10^8cm^2/sで観測される
- 図9(f)~(j):各パラメータごとのPCW発生率
- (f)22.5°に明確なピークあり、低・中程度(20°
 < α < 45°)のコーン角でより多くの発生率
 - パーカースパイラル(~55°)に近い小さ なピークも見られる
- (g)SW速度増加に伴い、PCW発生率が約 14%減少
- (h)約75km/s まではAlfvén速度が大きくなる と発生率が増加
- (i)(j)SWプロトン密度とフラックスの両方の関数として、PCW発生率の同様の増加傾向が見られる



- 図10(a)~(e)各パラメータにおける上流セ グメントの正規化した数
 - コーン角、プロトン密度、フラックス については全グループで同様の分 布
- (b)HR2が他のHRグループに比べてわず かに速い(vSW)
- (c)HR3が他のHRグループに比べてわず かに遅い(vA)
- 図10(f)~(j): 各HRグループについての SWパラメータに関するPCW発生率
 - LRグループは各ビンのPCW発生
 率が低すぎて傾向が判断できない
 ため、表示しない
- (f)HR1において20° < α < 45°でより多く の発生率を示し、約22.5°に大きなピーク を持つ。HR2では20°~60°の場合に最大 隣、HR3では60°付近から低下するまで はほぼ一定
- (g)全グループでvSWが速くなると発生率 が減少
- (h)HR2、HR3ではvA=75km/sまでは速いほど発生率は増加。ただしHR1のvA>25km/sではその傾向は見られない
- (i)(j)SWプロトン密度とフラックスの両方の関数として、PCW発生率の同様の増加傾向が見られる



Discussion

- PCW発生率について、近火点と 北冬至付近で約30~35%の漸増 が見られる
- 対照的に遠火点付近では約3%
 未満
- 外気圏水素密度はLs=263~288
 の間にピークに達することが報告されている
- このLsからわずかにずれて Ls=280~302で発生率がピーク
- 平均遅延は25日で、原因は (a),(c)に見られる近火点とNWS 付近の季節的なサンプリングバ イアスに部分的に関連している 可能性

- ダスト活動と大気湧昇は水素外 気圏の変動に影響を与える可能 性がある
- 惑星を取り巻く砂嵐は、下層大 気の不透明度が高くなるため、 気温を30~40K上昇させる可能 性がある
- この効果は大気の大規模循環を 増幅し、火星表面近くの水蒸気 が熱圏高度まで自由に混ざり合うことを可能にする
- つまり低気圧での初期の高濃度 水蒸気は、水素外気圏に影響を 与える可能性がある
- (b)の灰色領域から、砂嵐シーズ
 ンの一部で発生率が増加

- 図9fのα= 22.5°付近のピークは、
 図10fからわかるように、主に HR1
 に起因しする
 - この違いは、ペリヘリオンとNWSの近くの季節的なサンプリングバイアスに部分的に起因している可能性がある
- ただしこの変動性にもかかわらず、 45°未満のIMFコーン角ではPCW の発生率が一貫して高い
 - これは関連する飽和波エネルギー、成長時間、および新生プロトン密度の間のトレードオフの結果である可能性がある。
 - 例えば、α<75°で最も容易に励起され るイオン-イオンRH不安定性は飽和波 の振幅が比較的大きく、成長時間が長 いという特徴があるが、大きなコーン角 で存在する共鳴プラズマ不安定性と比 較して高密度のピックアップイオンを必 要としない
 - つまり低・中程度のコーン角で観測された発生率のピークは特定のコーン角での主要プラズマ不安定性における様々な成長速度と惑星イオン密度による正味の結果である可能性がある

- PCWは低速SWで発生率 が高い傾向がある
 - この傾向は線形波成長理論
 とは一致しない
- これは新生惑星プロトンが SWと相互作用する際の通 過時間がより長いためだと 考えられる
- SWプロトン密度が大きいほどPCWの発生率が高くなる

 これも線形理論と一致しない
- SW密度の増加は火星水素
 外気圏の電荷交換頻度を
 増加させる
- これにより新生プロトン密度 が高くなり、観測結果を説 明できる

Conclusions

- 約3火星年のPCW発生の時間変動を分析する為に、2014/10~2020/02の期間のMAVEN観 測による統計的研究を示した
- PCWは各近日点と北冬至の近くでより頻繁に発生する傾向がある
 - この長期的傾向が火星の太陽周回距離の変化に関連していることを示唆
 - これは水素外気圏密度の変動によるもので、ダスト活動の影響を受けた下層・上層大気の水蒸気濃度の変化にも 関連している可能性がある
 - 特に、この変動性は、MAVENの空間カバレッジ、時間的ビニングの長さ、PCW選択基準のバイアスには関連していないようである
- 観測されたPCWは磁場方向にほぼ平行に伝播し、振幅は0.1~1.0nT、衛星基準では平面楕円左偏波である
- 各年の振幅中央値の減少は空間的範囲やSW条件の分布の違い起因するものではない
 - この減少は火星foreshockで起こる物理プロセス、新生プロトンに対するSW対流電場の影響、およびこれらのタイムスケールによる上流太陽風の時間的変化に関連している可能性
- PCWは低・中IMFコーン角(20~45°)、低SW速度(<400km/s)、高SWプロトン密度(>5cm^3)で より頻繁に観測される
 - IMFコーン角条件は、関連する線形波成長率、波動飽和エネルギー、ピックアッププロトン密度の間のトレードオフの 結果である可能性
 - SW速度へのPCW発生率依存性は線形理論と一致しないように見えるが、ピックアッププロトンがWと相互作用した結果のより長い通過時間に関連している可能性がある
 - SW密度依存性は、電荷交換による水素のイオン化頻度の増加が新生プロトン密度の増加を生み、線形波の成長 速度の増加の原因になっていることを示唆している