Ionospheric plasma transported into the Martian magnetosheath

Shuvalov, S., Andersson, L., Halekas, J. S., Fowler, C. M., Hanley, K. G., & DiBraccio, G. (2024). GRL, 51, e2023GL107953.

Presented by S. Sakai (Tohoku U.)

Abstract

- 夜側火星磁気シースに到達する、~1 keV と等価な速度まで加速される、20 eV 以下の冷たくて濃い (> 1 cm⁻³) O⁺/O₂⁺ イオンを観測
- これらのイオンは、磁場の太陽方向成分 (X_{MSO})の符号が変化する位置で見られる
- この磁場トポロジーから、尾部方向に対流しているドレープな磁力線に関係する局所的なイオン流出経路が存在していることを示唆
 - 磁気シース領域のフロー方向に伝搬
 - ほとんどが電離圏起源のイオン
- •磁場の湾曲に伴う電荷分離が作るホール電場によるイオン加速を議論

Introduction

- ・火星夜側での高密度なイオンは Phobos-2 で初めて観測された (Rosenbauer+, 1989; Dubinin+, 1993)
- このようなイオンは「プラズマシート」領域でよく見られる (Barabash+, 2007; Dubinin+, 2017; Dubinin & Fraenz, 2015; Fedorov+, 2006, 2008; Halekas+, 2006; Kallio+, 1995)



Introduction

- 本研究では、火星磁気圏尾部にあるプラズマシートではなくて、高度 4500 km 程度までの 夜側磁気シースがターゲット
- 今回観測されたイオン温度は約 20 eV 以下で、太陽風磁場の太陽方向成分の符号の反転が 起こる領域にあり、磁場の湾曲が重要な役割を果たしていることを示唆
- 磁気シース昼夜境界領域で同じようなイオン (高密度高速度) が観測されているが、これは 電離圏からピックアップされた遅い酸素イオンの周囲をシースプロトンが流れていると解釈 (Dubinin+, 2023)
- •本研究では、夜側の別の領域を取り上げている
- 1 ヶ月間の MAVEN データを解析し、イオン加速の駆動源について議論する

Instrumentation

- MAVEN データの解析
- •1周期 3.5 時間, 軌道傾斜角 ~75°, 近火点 ~200 km, 遠火点 ~4400 km
- 解析した機器
 - SWIA (Solar Wind Ion Analyzer; Halekas+, 2015)
 - FOV 360° × ±45°, 5 eV to 25 keV per ion charge with dE/E ~ 15% (48 energy steps)
 - STATIC (Supra-Thermal and Thermal Ion Composition; McFadden+, 2015)
 - FOV 360° × ±45°, 0.1 eV to 30 keV
 - D1 data: 32 energy steps, 4 polar and 16 azimuth angles for 8 mass bins
 - SWEA (Solar Wind Electron Analyzer; Mitchell+, 2016)
 - FOV 360° × 120°, 5 eV to 4.6 keV with dE/E ~ 17%
 - MAG (Magnetometer; Connerney+, 2015)
 - 0.05 nT resolution and 32 Hz measurement

An Example of a Single Event

2020年12月7日の Bx 反転イベント

- SZA~130 (最大) at 10:37 UT (~4230 km)
- 磁気シース内には 10:55 頃まで
- Ep ~ 250 eV
- Bx 反転: ~10:22
 - 同時に磁場強度も減少
 - 高電子密度
 - •>1 keV のイオンエネルギー
 - O⁺, O₂⁺ 密度が増加, H⁺ 密度は相対的に減少
 - O+, O₂+ 速度が増加, H+ 速度は減少
 - 太陽風速度の 30% 程度



Event selection

- ・最終的に 2020 年 12 月のデータから 28 Bx 反転イベントを解析
- 前提: x ~ -1.8 R_M, 尾部領域だが惑星の影部分を通過しない
- 1. Bx の 5 分間移動平均を取る (スムージング)
 - 磁場ノイズによる Bx = 0 通過を減らすため
- 2.5 分間で偶数回 Bx が反転する場合は使わない
 - Bx の正→負 or 負→正をより正確に扱うため
 - 奇数回の真ん中のイベントを解析対象候補とする
- 3. 対象候補の時刻を Bx 反転時から,同定されたイベントの 5 分間でO+とO₂+の数密度が 全イオン種に対して最大になる瞬間にシフトする
 - 重イオン流出経路の位置を調整するため
- → **476 Bx 反転イベント** (2020/12/1 31)

Event selection

- 476 Bx 反転イベントを 4 群に区別 (tentative)
 - プラズマ環境や物理過程に基づく
- 左下: 低密度低速度群 (71 イベント)
 - 光化学反応により生成される外圏

大気

- •太陽風電場によりピックアップ
- 右下: 高密度低速度群 (134 イベント)

• 電離圏起源イオン



Event selection

- 476 Bx 反転イベントを 4 群に区別 (tentative)
 - ・プラズマ環境や物理過程に基づく。
- 左上: 低密度高速度群 (69 イベント)
 - 太陽風電場で加速された電離圏イ
 オン
 - +E 半球で観測されやすい
 (Dong+, 2015, 2017; Dubinin+, 2021; Vaisberg+, 2018)
- ・右上: 高密度高速度群 (202 イベント)
 - Bx 反転に伴う密度スパイク
 - 全イベントの約42%



Figure 2⁹

Event selection

- 476 Bx 反転イベントを 4 群に区別 (tentative)
 - ・プラズマ環境や物理過程に基づく。
- ・右上: 202 イベント → 28 イベント
- 1. Bx 符号の変化が1回
 - 不安定な磁場条件を取り除くため
- 2. 平穏な磁気シース領域で観測
 - 観測された重イオンが周囲のプラ ズマにどのような影響を与えるか を調べるため
- (→ 複雑なプロセスを含みたくない)



Figure 2¹⁰

Statistical features of tailward accelerated fluxes

- Figure 3
- (a) O₂+ 速度ベクトル

(b) O₂+ 速度ベクトルと磁場回転面のなす角度
(c) Bx 反転前後の磁場ベクトル間の角度
(d) Bx 反転前後のイオン密度比 (n_{inside}/n_{outside})
(e) Bx 反転領域でのプロトン密度に対する O₂+
及び O⁺ イオン密度の比
(f) Bx 反転前後でのイオン種別の速度比

(V_{inside}/V_{outside})



 $X_{MSO}^{}, R_{M}^{}$

O⁺

O₂⁺

X_{MSO}, R_M Figure

Statistical features of tailward accelerated fluxes

- O₂+の速度ベクトルはバルク方向 (a)
- 尾部で観測されるにつれてバルク速度と磁場回 転面との角度が減少(b)
- Bx 反転前後の磁場ベクトル間の角度も尾部にい^{……………} くほど 180° に近づく (c)
- Bx 反転点の内側ほど高密度で重イオンが多く、 尾部ほどその比も大きくなる (d, e)
- 内側の速度 (O+, O2+) は外側の速度 (太陽風バル ク) より小さく, 尾部では速度は全イオン上昇 (f)
- O₂+ の温度に変換すると 21.4 eV



-1.5

×_{MSO},

X_{MSO}, R_M Figure

10

Discussion of Acceleration Mechanism

惑星周辺でのイオン加速源は磁気張力

- Bx 反転前後の磁場ベクトル間の角度が 180°に近く (Fig. 3c),磁場回転面方向に O₂+ 速度が増加 (Fig. 3b)
- フラックスチューブの中心は端に追いつこうと加速される
 - イオンが加速される (Fig. 3f)

Bx 反転領域でのプロトン密度の減少 (Fig. 3e)

 太陽風プロトンが昼側にいる間に磁力線に沿って流 出するため



Discussion of Acceleration Mechanism

Hall 電場

- Bx 反転領域ではイオンが濃いので正の電場ポテン シャルが生成される
- ジャイロ半径の小さい電子 (magnetized) は電場ポ テンシャルを感じて磁力線に沿って反転領域まで到 達 (~100 eV まで加速),磁気張力で尾部方向にも加 速
- イオンはジャイロ半径が大きく磁化されていないた

め、反転領域で電荷分離が起こる

- → Hall 電場が発生
- <u>イオンの加速源となる</u>



Conclusion

- 2020年12月に火星夜側で観測された 476 回の太陽磁場成分符号変化イベントに関して、O+ 及び O₂+ イオンの温度が 20 eV 以下にも関わらず、約 1 keV まで加速される高密度イオン を伴うイベントが 42% あった。
- これらのイオンは太陽風電場によって電離圏からピックアップされ、その後 Hall 電場によって加速され、磁化されていないイオンと磁化された電子が、電子に働く j×B 力の磁気張力項によって電荷分離された結果である。
- 火星の夜側には、磁場の太陽方向成分の符号が変化する領域が常に存在し、磁場反転のほぼ半数で高エネルギー高密度酸素イオンが観測されていることから、加速された重イオンとして大気流出が起きていると考えられる。

References

- Barabash, S., Fedorov, A., Lundin, R., & Sauvaud, J. A. (2007). Martian atmospheric erosion rates. *Science*, *315*(5811), 501–503.
- Connerney, J. E. P., Espley, J. R., Lawton, P., Murphy, S., Odom, J., Oliversen, R., & Sheppard, D. (2015). The MAVEN magnetic field investigation. Space Science Reviews, 195(1–4), 257–291.
- Dong, Y., Fang, X., Brain, D. A., McFadden, J. P., Halekas, J. S., Connerney, J. E., et al. (2015). Strong plume fluxes at Mars observed by MAVEN: An important planetary ion escape channel. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 8942–8950.
- Dong, Y., Fang, X., Brain, D. A., McFadden, J. P., Halekas, J. S., Connerney, J. E. P., et al. (2017). Seasonal variability of Martian ion escape through the plume and tail from MAVEN observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *122*(4), 4009–4022.
- Dubinin, E., & Fraenz, M. (2015). Magnetotails of Mars and Venus. *Geophysical Monograph Series*, 207, 43–59.
- Dubinin, E., Lundin, R., Norberg, O., & Pissarenko, N. (1993). Ion acceleration in the Martian tail: Phobos observations. *Journal of Geophysical Research*, 98(A3), 3991–3997.
- Dubinin, E., Fraenz, M., P.tzold, M., McFadden, J., Halekas, J. S., DiBraccio, G. A., et al. (2017). The effect of solar wind variations on the escape of oxygen ions from Mars through different channels: MAVEN observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(11).
- Dubinin, E., Fraenz, M., Modolo, R., P.tzold, M., Tellmann, S., Vaisberg, O., et al. (2021). Induced magnetic fields and plasma motions in the inner part of the Martian magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *126*(12), e2021JA029542.
- Dubinin, E., Fraenz, M., Pätzold, M., Tellmann, S., DiBraccio, G., & McFadden, J. (2023). The mini-induced magnetospheres at Mars. *Geophysical Research Letters*, 50(3), e2022GL102324.
- Fedorov, A., Budnik, E., Sauvaud, J.-A., Mazelle, C., Barabash, S., Lundin, R., et al. (2006). Structure of the Martian wake. *Icarus*, 182(2), 329–336.
- Fedorov, A., Ferrier, C., Sauvaud, J. A., Barabash, S., Zhang, T. L., Mazelle, C., et al. (2008). Comparative analysis of Venus and Mars mag- netotails. *Planetary and Space Science*, *56*(6), 812–817.
- Halekas, J. S., Brain, D. A., Lillis, R. J., Fillingim, M. O., Mitchell, D. L., & Lin, R. P. (2006). Current sheets at low altitudes in the Martian magnetotail. Geophysical Research Letters, 33(13), L13101.
- Halekas, J. S., Taylor, E. R., Dalton, G., Johnson, G., Curtis, D. W., McFadden, J. P., et al. (2015). The solar wind ion analyzer for MAVEN. *Space Science Reviews*, *195*(1–4), 125–151.
- Kallio, E., Koskinen, H., Barabash, S., Nairn, C., & Schwingenschuh, K. (1995). Oxygen outflow in the Martian magnetotail. *Geophysical Research Letters*, 22(18), 2449–2452.
- McFadden, J. P., Kortmann, O., Curtis, D., Dalton, G., Johnson, G., Abiad, R., et al. (2015). MAVEN SupraThermal and thermal ion composition (STATIC) instrument. Space Science Reviews, 195(1–4), 199–256.
- Mitchell, D. L., Mazelle, C., Sauvaud, J. A., Thocaven, J. J., Rouzaud, J., Fedorov, A., et al. (2016). The MAVEN solar wind electron analyzer. Space Science Reviews, 200(1–4), 495–528.
- Rosenbauer, H., Shutte, N., Galeev, A., Gringauz, K., Aptáhy, I., Grünwaldt, H., et al. (1989). Ions of Martian origin and plasma sheet in the Martian magnetosphere—Initial results of the TAUS experiment. *Nature*, *341*(6243), 612–614.
- Vaisberg, O. L., Ermakov, V. N., Shuvalov, S. D., Zelenyi, L. M., Halekas, J., DiBraccio, G. A., et al. (2018). The structure of Martian magnetosphere at the dayside terminator region as observed on MAVEN spacecraft. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(4), 2679–2695.