

火星空间磁场低频波动

金泰峰^{1,2}, 李磊¹, 张艺腾¹

(1. 中国科学院 国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049)

摘要: 波动是无碰撞等离子体中能量重新分配的重要途径。对波动的研究有助于更准确地认识太阳风与火星的相互作用, 认识火星空间环境的特征。介绍了火星空间中常见的几种磁场低频波动, 包括离子回旋波 (Ion-Cyclotron Wave, ICW)、磁流体动力学 (Magnetohydro Dynamic, MHD) 波、镜像模波、哨声波以及磁场锯齿状波动, 总结了这几类波动的特征和可能的形成机制, 说明不同种类的波动所反映的不同的物理过程。由于波粒相互作用在火星离子逃逸的过程中起到了重要作用, 波动可影响火星环境的演化。

关键词: 火星空间环境; 磁场波动; 火星离子逃逸

中图分类号: P353.8

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)02-0134-08

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.02.004

引用格式: 金泰峰, 李磊, 张艺腾. 火星空间磁场低频波动[J]. 深空探测学报, 2019, 6 (2): 134-141.

Reference format: JIN T F, LI L, ZHANG Y T. Low-frequency magnetic field fluctuations in the martian space[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (2): 134-141.

引言

火星没有内禀磁场, 没有了内源场的屏蔽, 太阳风可以直接与火星高层大气和电离层相互作用。作为良导体, 电离层可阻止太阳风及其携带的磁场穿入, 太阳风减速, 在上游会出现弓激波, 造成磁场堆积“披挂”在火星向阳面, 形成类似于地球磁层的结构, 称为磁堆积区。弓激波与磁堆积区上边界之间的区域被称为磁鞘。在日下点处, 弓激波的高度约为 $0.5R_M$, 磁堆积区上边界的高度约为 $0.2R_M$, R_M 为火星半径, $R_M \approx 3389$ km, 如图1所示^[1-2]。下边界为电离层顶, 高度大约为400 km。

火星的另一个特征是: 南半球的地壳磁场比较集中, 也被称为局部磁异常^[3]。目前, 学者认为这些磁异常可能是远古时曾存在的内禀磁场造成的岩石剩磁。磁异常在400 km高度处的强度可达 ~ 200 nT, 形成类似于微磁层的闭合结构, 将当地电离层顶抬高; 同时其开放磁力线还会与感应磁场发生重联, 形成复杂的拓扑结构^[4]。考虑到火星的自旋, 其磁场结构随时间的演化特征也呈现十分多样的变化。整体而言, 火星空间的等离子体环境既受到太阳风和行星际磁场 (Interplanetary Magnetic Field, IMF) 的调控,

又与磁异常有关。越靠近火星表面, 磁异常产生的影响越显著。

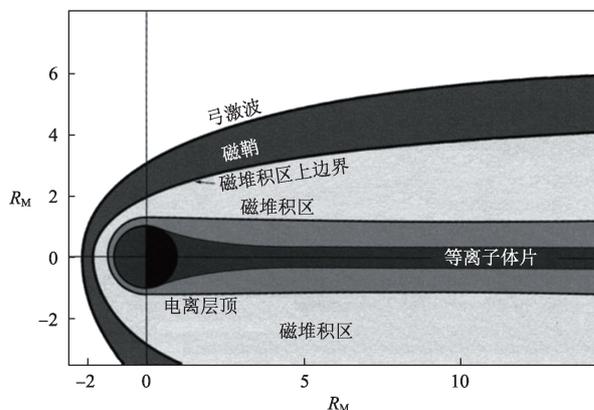


图1 火星空间结构示意图^[2]

Fig. 1 Structure of martian space^[2]

太阳风与火星的相互作用, 产生了磁场和等离子体各种波或扰动。波动可为传播路径上的离子提供能量, 使之加速, 逃离火星空间, 造成火星大气的显著流失, 从而在大的时间尺度上影响火星环境的演化。本文将简要介绍几种较为常见的波动在火星空间的观测特征, 包括离子回旋波 (Ion-Cyclotron Wave, ICW)、磁流体动力学 (Magnetohydro Dynamics, MHD) 波、哨声波等。

1 离子回旋波

1.1 概述

离子回旋波是磁化等离子体中的离子遇到多普勒频移过的频率是其回旋频率数倍的波动时，发生共振而产生，当波动频率 ω 满足条件为

$$\omega - \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} - n\Omega = 0 \quad (1)$$

其中： \mathbf{k} 为波矢； \mathbf{v} 为等离子体速度； Ω 为离子回旋频率。

当 n 为整数时，围绕磁力线回旋的离子持续经历波场而发生共振，获得能量而加速。 $n = 1$ 时为基频，波动最显著。

因火星引力弱，包裹行星的大气层将延伸至弓激波的上游。这意味着来自太阳的辐射和粒子流可在遇到弓激波之前便与源自行星的粒子相互作用。火星散逸层的主要成分是中性的氢原子，它们在太阳极紫外（Extreme Ultraviolet, EUV）辐射、与太阳风粒子交换电荷，或电子撞击的作用下电离生成质子，并被太阳风电场加速，这一过程被称为“拾取”（pick-up）。

在太阳风坐标系中，新形成的质子速度分布包括：平行于太阳风速度（ v_{sw} ）的单束（ $v_{\parallel} = v_{sw} \sin \alpha$ ）、以及垂直于太阳风速度的环（ $v_{\perp} = v_{sw} \cos \alpha$ ）， α 是太阳风速度与IMF的夹角。这种束、环分布可激发离子-离子共振不稳定性。根据质子被拾取时 α 大小不同，激发的共振不稳定性的类型发生变化。在 α 值中等偏小时，右旋（Right Hand, RH）不稳定性占据主导；而当 $\alpha > 75^\circ$ ，左旋（Left Hand, LH）不稳定性的增长率高于右旋不稳定性。考虑到多普勒效应，不论是RH共振还是LH共振，在飞船坐标系中观测到的波动都呈现为左旋偏振，探测器观测到的频率接近当地质子的回旋频率，故有时亦称质子回旋波。

激发波动的“拾取”离子源自火星，观测到ICW意味着该位置的存在源自行星（散逸层）的中性氢原子。因此，ICW可作为火星散逸层延伸区域的指示剂，并可用于推算散逸层氢原子的密度。新生质子的回旋半径与火星尺度相当，意味着它们可以轻易摆脱火星的束缚，逃逸至行星际，逃逸过程如图2所示，ICW被认为是火星大气逃逸中一个关键过程的标识。散逸层特性的变化可能会影响ICW出现的频率与位置。火星距离太阳的远近、太阳活动的强弱等都会影响到散逸层的高度和氢原子的密度，进而影响质子的逃逸。因此，可通过观测上游ICW，来监

测散逸层氢原子的变化。

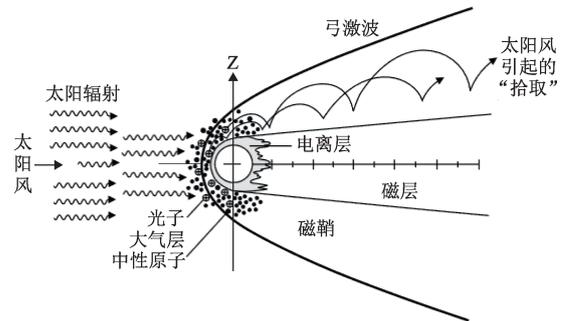


图2 新生质子的逃逸^[5]

Fig. 2 Escape of newborn proton^[5]

1.2 观测与特征

ICW通常出现在弓激波上游，偶见于下游磁鞘内，夜侧也会有少量观测事例。ICW波动频率在当地质子回旋频率附近，在飞船上观察为左旋偏振。波动基本沿磁场传播，夹角不超过 20° ；磁场波动的振幅可达到背景场的20%~56%，且与电子通量的波动高度相关。波动常见于IMF角度较大时（ $\alpha > 10^\circ$ ），可以作为与起源于太阳风的ICW区别的判据，后者主要形成于 α 接近 0° 时。当有强烈太阳活动事件时，磁尾区域ICW的发生频率会显著升高^[6]。

Phobos-2探测器首次在火星弓激波上游观测到ICW，波动的特征包括：左旋椭圆偏振、小振幅（ ~ 0.15 nT）、传播方向接近背景磁场方向^[7]。MGS（Mars Global Surveyor）在火星日侧弓激波上游和晨昏侧弓激波的下游也观测到了左旋偏振的ICW，只是振幅较Phobos-2的探测结果大2~3倍，探测结果如图3所示。对MGS观测的统计显示，波动持续的时间通常较长，出现的位置与激波前兆区没有明显关联；距离行星越远，波动能量越弱，衰减的快慢受太阳天顶角（Solar Zenith Angle, SZA）控制；IMF方向不影响振幅、偏振度和传播方向，太阳风运动电场不影响波动的空间分布^[8-9]。

Wei等对MGS的数据进一步校正后，对弓激波上游的ICW事件进行了统计。结果显示，波动可以出现在距离火星很远的空间（ $\sim 14R_M$ ）；IMF会影响波动的发生率（ $\sim 45^\circ$ 时最容易发生）；波动的空间分布沿太阳风运动电场呈现不对称^[10]。

借助于MGS和MAVEN（Mars Atmosphere and Volatile Evolution）探测器的长期观测数据，人们对ICW波动特性变化的长期规律进行了统计分析。Ro-

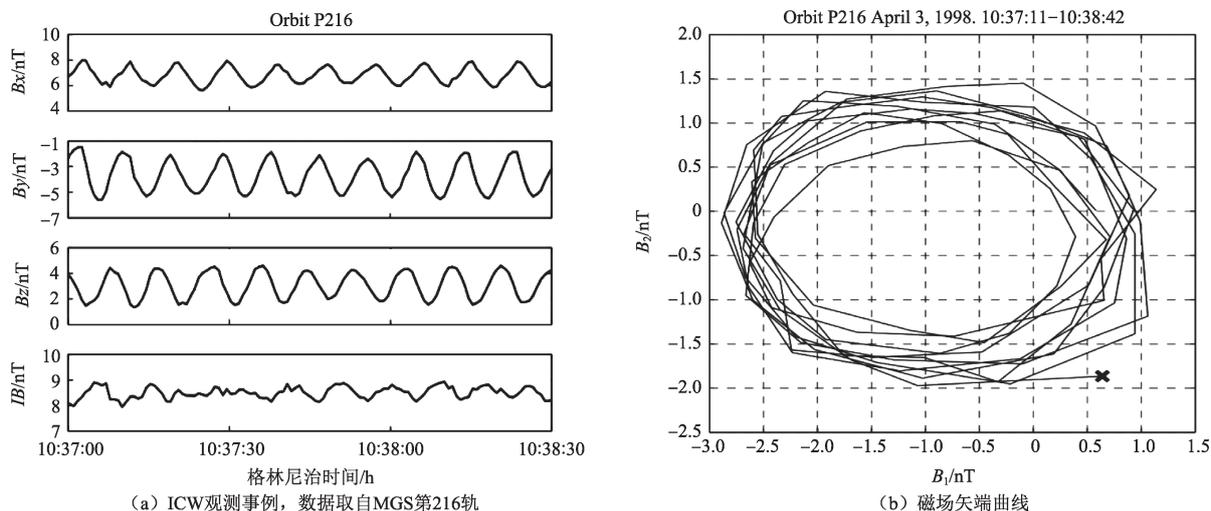


图3 MGS探测结果

Fig. 3 The results of MGS

注: x 为时间序列起始点, 背景场垂直纸面向外.

manelli 等通过分析 MGS 不同任务阶段的探测数据, 发现波动发生率存在显著的差异^[9]. Bertucci 等对 MGS 在南半球高纬度区域上空的观测进行统计, 数据覆盖了太阳活动从低年到中间期的时间段, 结果表明: 波动出现率在火星靠近近日点 (南半球夏季) 时显著升高, 而在春、秋季降低, 这种长期变化与模型预测的散逸层氢原子密度变化一致^[11]. Romanelli 等使用 MAVEN 从 2014 年 10 月—2016 年 3 月的数据, 空间覆盖更加完整, 发现 ICW 发生率明显与其上游的散逸层氢密度 (根据模型算出) 变化相关, 这可通过热层对不同的紫外辐射通量响应的差异得到部分解释^[12].

2 磁流体动力学波

2.1 概述

磁流体动力学波包括阿尔文波和快/慢磁声波。阿尔文波由磁力线的张力驱动, 磁声波由磁压力和热压力共同驱动。阿尔文波的一般特征为: 磁场总强度和粒子密度不变, 呈现圆偏振或线偏振特性; 粒子速度和磁场在各方向上的变化同相位。磁声波的一般特征为: 磁场波动具有压缩成分, 磁场强度与粒子密度的变化同相位。磁鞘中产生的阿尔文波可传播至电离层, 加速当地的离子, 使之沿开放磁力线逃逸, 从而会对大气的流失产生影响。

2.2 特征

MHD 波动为超低频波, 频率远低于质子回旋频率。Ruhunusiri 等利用 MAVEN 从 2014 年 10 月—2015 年 3 月间的数据, 对 MHD 波以及镜像模 (mirror-

mode) 波的空间分布进行了统计分析^[13] (如图 4 所示)。结果表明: 阿尔文波主要出现在弓激波上游, 即太阳风主导的区域内, 通常源于太阳表面附近, 随着太阳风传播至火星空间。快磁声波出现在磁堆积区内, 在磁堆积区边界的下游和上游经常与镜像模波成对出现, 但前者的起源似乎并非在磁堆积区内, 而更有可能是双离子流耦合产生的驻波^[14-15]。

Ruhunusiri 等还使用 MAVEN 的探测数据估计太阳风动压, 并比较了各类波动的分布情况对太阳风动压变化的响应。结果表明: 当动压增大时, 弓激波附近阿尔文波的出现变得更加频繁, 而磁鞘内快磁声波出现的位置则更加远离激波^[13]。然而, 由于缺乏对上游太阳风直接的持续监测, 这一结果的不确定性很大。

Fowler 等在 MAVEN 的观测数据中发现了火星日下点处电离层顶附近的一例磁声波事件^[16]。磁场波动的频率 (~ 0.035 Hz) 远低于当地质子回旋频率, 波动中压缩成份占据主导, 相位与离子密度波动的相位相同, 符合磁声波的特征。波动可能是由太阳风驱动产生, 穿过磁鞘区域进入电离层顶部。波动与离子加热还有出流有明显的相关性, 意味着它对大气逃逸和长期演化具有潜在影响。

利用 MAVEN 和 Mars Express 的联合观测, Col-linson 等发现太阳风中的超低频压缩波作用于火星的感应磁层, 可在电离层中激发线偏振的低频磁声波^[17], 以及频率落在当地质子回旋频率上的电磁波。该类事件的发生不需要特殊的上游太阳风条件, 集中于发生于火星靠近近日点时, 它意味着太阳风和激波前

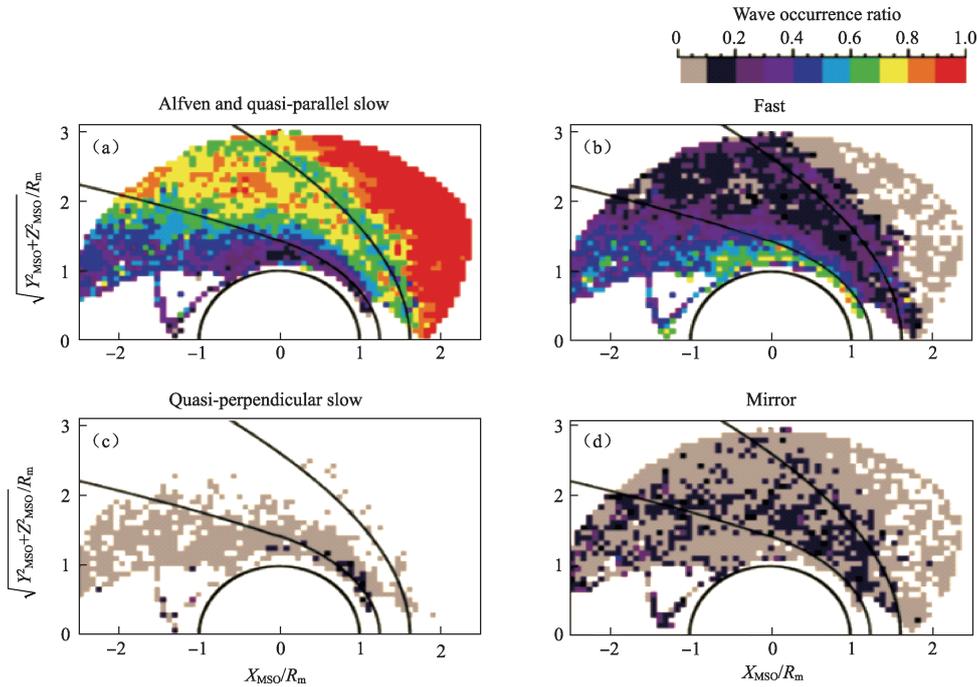


图4 火星空间MHD波动分布^[13]
 Fig. 4 MHD wave distribution in Martian space^[13]

兆区域的波动可直接影响电离层，为离子逃逸创造一个全新的途径。

3 镜像模波

3.1 概述

镜像模波是镜像模不稳定性发展的结果。当等离子体的垂直温度与平行温度满足条件 $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel} > 1 + 1/\beta_{\perp}$ 时，就会触发不稳定性。被加热的粒子沿着垂直于磁力线的方向注入等离子体中，磁力线在粒子的抗磁作用下发生弯曲，形成磁镜结构。在磁镜力的作用下，粒子的回旋中心沿磁力线运动。投掷角接近 90° 的粒子不沿磁力线运动，被束缚在磁镜结构内，与磁场变化发生共振而交换能量；投掷角接近 0° 的粒子可越过磁镜点，磁矩守恒，不与磁场交换能量。在共振粒子的作用下，磁力线进一步弯曲，磁镜力增大，反射粒子的投掷角减小，更多的粒子被束缚在磁镜结构内，导致粒子堆积，热压升高，磁压降低。在空间上观察，粒子密度高的区域磁场强度低，粒子密度低的区域磁场强度高，即粒子密度和磁场强度呈现反相关的波动。

3.2 特征

火星空间镜像模波的波动频率远低于质子回旋频率。波动中压缩成分为主导，呈线偏振，波动的磁场和电子密度的波动反相位，空间尺度约为数个（弓激波上游）质子回旋半径。镜像模波主要发生于磁鞘

内，集中在磁堆积区边界的上游，如图5所示。导致粒子温度各向异性的原因可能有准垂直激波下游热离子的注入，以及行星重离子的“拾取”。然而镜像模波的分布并不显著依赖于激波的几何结构，而是更贴

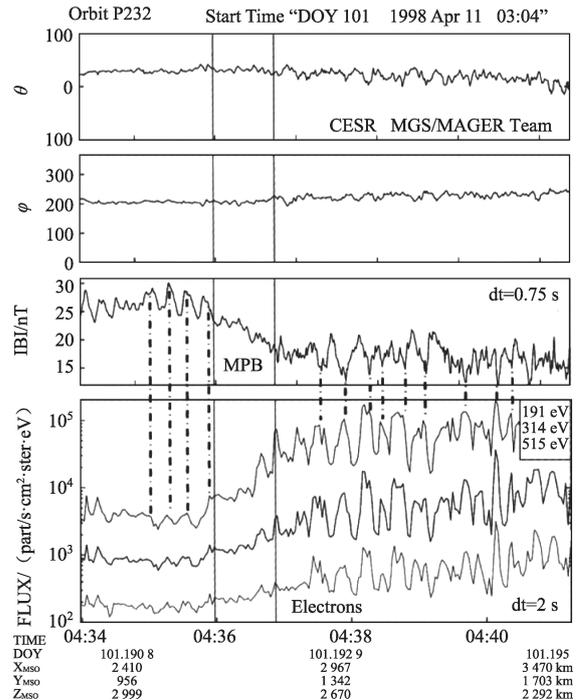


图5 MGS在穿越MPB时观测到的镜像模波，从04:37:30左右开始^[2]
 Fig. 5 Observed mirror-mode wave while crossing MPB, event start from ~04:37:30^[2]

近磁堆积区边界,可能是产生于边界上游并被等离子体流携带至边界附近^[2]。

4 哨声波

4.1 概述

哨声波通常是由温度各向异性 ($T_{\perp} > T_{\parallel}$) 的电子激发,频率在低混杂频率和电子回旋频率之间。当磁化等离子体中有热粒子流注入,形成电子各向异性时,会引起电子的回旋共振,产生哨声波。波的频率小于电子回旋频率,共振电子和波动必须向相反方向传播,这个波才能通过多普勒频移达到电子回旋频率。波动发展到非线性阶段时,其群速度发生色散,同一地点产生的宽频哨声波中高频的波传播较快,先到达另一地点,听起来像音调下降的口哨一样,故得名。

火星弓激波上游区域内 1 Hz 哨声波的具体产生机制尚无定论。根据地球和其它行星空间内的观测和数值模拟结果,目前有上游质子/电子束、激波面运动电场和各向异性驱动不稳定性、激波非线性过程等说法。温度各向异性的质子或电子被激波面反射,形成的束流具有特定的能量和角度分布,在前兆激波区发生共振而激发的不稳定性可以导致波动的发生。进入激波面斜波电子在跨激波电场、运动电场中获得自由能而出现温度各向异性,该区域内的压缩磁场可令更多电子与波动发生回旋共振和朗道共振,从而产生哨声波^[17]。

4.2 观测与特征

火星空间中,哨声波通常可见于弓激波上游贴近激波面(激波前兆区)的区域。在飞船坐标系下观测,波动的频率为 ~ 1 Hz,所以又被叫做“1 Hz 波”或“1 s 波”。偏振特性为圆偏振或椭圆偏振;形成时为右旋偏振,但其中部分波动朝向太阳以较小的夹角传播时,因与太阳风来流的相对速度产生的多普勒效应,在飞船坐标系下观测即呈现为左旋偏振。波的振幅随着到弓激波距离的增大而降低,表明波动产生于激波或上游的区域。波的群速度高于太阳风速度 (> 400 km/s),它可以传播至相当远的地方^[1,8]。

Brain 等使用 MGS 的数据发现^[8],这一类波动的频率为 0.4~2.3 Hz,磁场波动中横波的成分占据主导,椭圆偏振。波的传播方向 \mathbf{k} 与背景磁场的夹角集中在 $19^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 的范围内;当 \mathbf{k} 与太阳风来流的相反方向(即从火星指向太阳的方向)之间的夹角小于 66° 时,波动呈现左旋偏振,大于时呈现右旋偏振。在距

离激波面相当远的位置 ($\sim 10R_M$), MGS 仍观测到哨声波,只是波动的强度较激波面附近弱了许多,这暗示着波动可能起源于弓激波或前兆区。使用 MAVEN 在一个火星年内的数据, Ruhunusiri 等对上游哨声波对 EUV 辐射通量、马赫数及等离子体 β 值的响应,以及激波前兆区不同位置波动的发生频率进行了统计分析。结果表明: EUV 通量的改变并不影响波动的发生频率;马赫数、 β 值低时波动更容易产生,频率更低,这或许表明波动受到了朗道阻尼的影响;波动在准垂直激波前和准平行激波前发生的频率几乎相同,但准垂直激波前波动的频谱宽一些^[18]。

Harada 等在 MAVEN 的观测数据中发现了一例磁堆积区内的哨声波事件,如图 6 所示。磁场和电场的波动符合哨声波的特征,根据电子速度分布计算得到的线性增长率意味着波动由各向异性电子的回旋共振引发。波动与电子各向异性在空间上的分布与磁异常区域具有相关性,表明火星表面磁异常影响着哨声波的产生^[19]。

5 磁场锯齿状波动

Halekas 等在 MGS 的数据中发现了磁场的一种波动结构,形似锯齿波 (Sawtooth Oscillation),呈线偏振,伴随热电子通量的同步变化和电子投掷角分布的各向异性^[20-21],如图 7 所示。这些波动集中出现在火星向阳面磁堆积区内,避开了磁异常区域的上空。对于此类锯齿状波动产生的机制,作者提出了 IMF 与磁异常发生重联、电离层等离子体不稳定性、磁异常区上空堆积的磁力线触发磁声波等猜测,但目前尚无定论。

6 结束语

本文对火星空间内存在的主要的磁场低频波动进行了总结,概述了波动的观测特征、发生区域和可能的形成机制。在弓激波上游,激波面反射的粒子进入太阳风发生回旋共振,可以产生 ICW 与哨声波;在磁鞘内,热等离子体注入等造成的温度各向异性可触发镜像模不稳定性,产生镜像模波;磁堆积区内则存在快磁声波和哨声波。不同种类的波动现象对应着各个空间区域内存在的不同物理过程。对这些现象和过程的深入研究,有助于完善我们对火星空间环境的认识,并在一定程度上预测火星环境未来的演化过程。

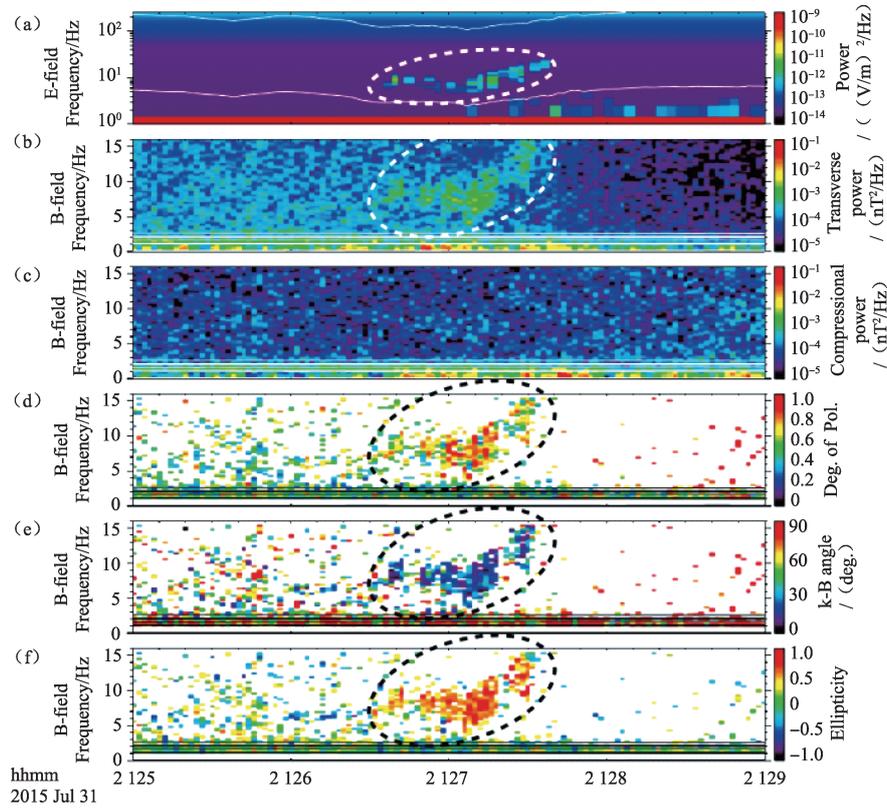


图6 MAVEN在磁堆积区内观测到的哨声波事例^[18]
 Fig. 6 Observed whistler wave event by MAVEN in MPR^[18]

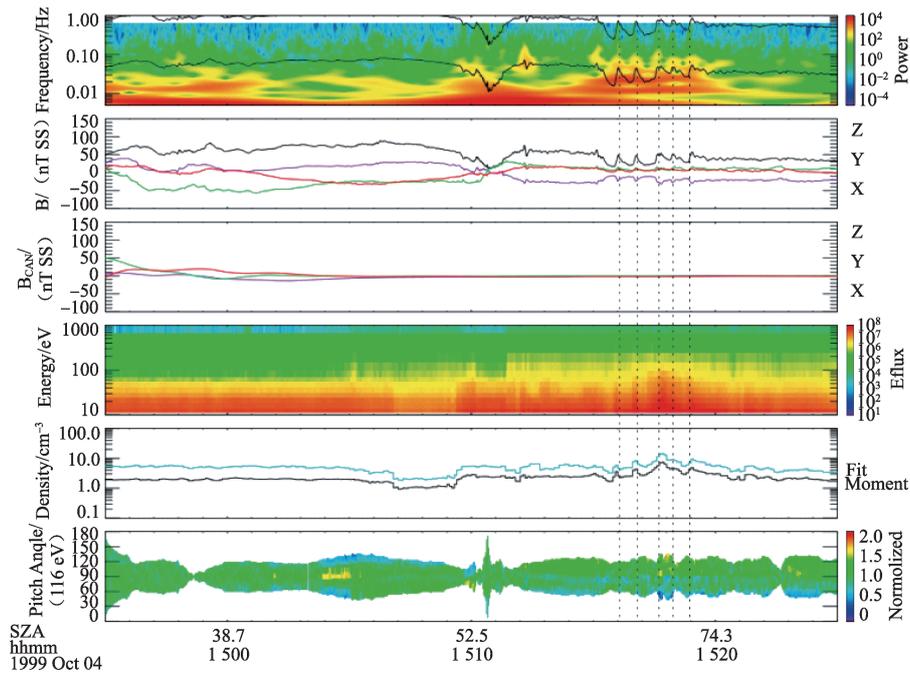


图7 磁场锯齿状波动的观测事^[19]
 Fig. 7 Observed event of sawtooth oscillation of magnetic field^[19]

参 考 文 献

- [1] MAZELLE C, WINTERHALTER D, SAUER K, et al. Bow shock and upstream phenomena at Mars[J]. Space Science Reviews, 2004, 111(1-2):115-181.
- [2] NAGY A F, WINTERHALTER D, SAUER K, et al. The plasma environment of Mars[J]. Space Science Reviews, 2004, 111(1-2): 33-114.

- [3] ACUÑA M, CONNERNEY J E P, WASILEWSKI P, et al. Magnetic field of Mars: summary of results from the aerobraking and magnetic mapping orbits[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (E10): 23403-23417.
- [4] 张艺腾, 李磊. 火星空间磁场结构特征[J]. *空间科学学报*, 2009, 29 (3): 257-261.
ZHANG Y T, LI L. Feature of the martian magnetic field structure [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2009, 29(3): 257-261.
- [5] WEI H Y, RUSSELL C T, ZHANG T L, et al. Comparative study of ion cyclotron waves at Mars, Venus and Earth[J]. *Planetary and Space Science*, 2011(59): 1039-1047.
- [6] ESPLEY J R, CLOUTIER P A, CRIDER D H, et al. Low-frequency plasma oscillations at Mars during the October 2003 solar storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005 (A9): 1-10.
- [7] RUSSELL C T, LUHMANN J G, SCHWINGENSCHUH K, et al. Upstream waves at Mars - PHOBOS observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1990(17): 897-900.
- [8] BRAIN D A, BAGENAL F, ACUÑA M H, et al. Observations of low-frequency electromagnetic plasma waves upstream from the Martian shock[J]. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2002, 107(A6): 1-17.
- [9] ROMANELLI N, BERTUCCI C, GOMEZ D, et al. Proton cyclotron waves upstream from Mars: observations from mars global surveyor [J]. *Planetary and Space Science*, 2013(76): 1-9.
- [10] WEI H Y, COWEE M M, RUSSELL C T, et al. Ion cyclotron waves at Mars: occurrence and wave properties[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(7): 5244-5258.
- [11] BERTUCCI C, ROMANELLI N, CHAUFRAY J, et al. A temporal variability of waves at the proton cyclotron frequency upstream from Mars: implications for Mars distant hydrogen exosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(15): 3809-3813.
- [12] ROMANELLI N, MAZELLE C, CHAUFRAY J Y, et al. Proton cyclotron waves occurrence rate upstream from Mars observed by MAVEN: associated variability of the Martian upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121 (11): 11113-11128.
- [13] SAUER K, BAUMGILRTEL K, AXNIIS I, et al. Fluid simulation of the AMPTE Solar wind lithium release[J]. *Advance in Space Research*, 1990, 10(7): 95-98.
- [14] RUHUNUSIRI S, HALEKAS J S, CONNERNEY J E P, et al. Low-frequency waves in the martian magnetosphere and their response to upstream solar wind driving conditions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(21): 8917-8924.
- [15] LUI A T Y, GOODRICH C C, MANKOFFSKY A, Papadopoulos K early time interaction of lithium ions with the Solar wind in the AMPTE mission[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986 (91): 1333-1338.
- [16] FOWLER C M, ANDERSSON L, ERGUN R E, et al. MAVEN observations of Solar wind-driven magnetosonic waves heating the martian dayside ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018(123): 4129-4149.
- [17] COLLINSON G, WILSON L B III, OMIDI N, et al. Solar wind induced waves in the skies of Mars: ionospheric compression, energization, and escape resulting from the impact of ultralow frequency magnetosonic waves generated upstream of the Martian bow shock[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(9): 7241-7256.
- [18] RUHUNUSIRI S, HALEKAS J S, ESPLEY J R, et al. One-Hertz waves at Mars: MAVEN observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018(123): 3460-3476.
- [19] HARADA Y, ANDERSSON L, FLOWER C M, et al. MAVEN observations of electron-induced whistler mode waves in the Martian magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(10): 9717-9731.
- [20] HALEKAS J S, BRAIN D A, EASTWOOD J P. Large amplitude compressive "sawtooth" magnetic field oscillations in the Martian magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011(116): 1-13.
- [21] DUBININ E, FRAENZ M. Ultra-low-frequency waves at Venus and Mars, low-frequency waves in space plasmas[M]. Washington, DC: American Geophysical Union, 2016.

作者简介:

金泰峰(1993-),男,博士研究生,主要研究方向:火星空间等离子体环境。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条一号(100190)

电话:(010)62576921

E-mail:jintai Feng15@mails.ucas.ac.cn

Low-Frequency Magnetic Field Fluctuations in the Martian Space

JIN Taifeng^{1,2}, LI Lei¹, ZHANG Yiteng¹

(1. State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Waves, an essential way of energy redistribution in a collisionless plasma, can be good indicators for the interaction between the Solar wind with Mars. Features of several different kinds of waves observed in Martian space, together with possible mechanisms of their generation, are given. Waves reflect certain physical processes, which might play important roles in the atmospheric loss, hence have significant influences in the evolution of Martian environment.

Key words: Martian space environment; magnetic field fluctuation; ion escape from Mars

High lights:

- Main features of low-frequency magnetic fluctuations in Martian space, including their temporal and spatial distributions, are systematically reviewed.
- Possible generation mechanisms of each wave are introduced.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：朱恬]