

第32回火星勉強会 (2013/05/07)

Low-altitude acceleration of
ionospheric ions at Mars

Lundin et al., 2011, Geophys. Res. Lett., 38,
L08108

名古屋大学 太陽地球環境研究所 (STEL)

M2 松永 和成

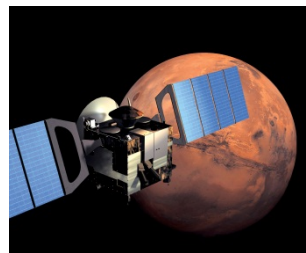


Abstract

- 火星からの電離圏イオンの流出と散逸を導く加速プロセスを理解することが本研究の目的である。
- 観測によって、昼側と側面の加速された電離圏イオンがマグネトシースの流れの向きに対して平行に、かつ反太陽方向に向かってゆっくり移動することが示された。
- 高高度で、かつテイルの中央部で、イオンはより一層加速され、keVまで上昇する。
 - The primary acceleration process・・・5－15km/sの範囲で加速される。
 - Mass-loaded ion pickup, wave acceleration・・・低エネルギーイオンをテイル方向へ移動させる
- Wave accelerationが、イオンの流出(ULF波(3-20mHz)の範囲で密度変化するもの)を生成する適切なプロセスであることを示した。
- マグネトシースで発生した波は、火星の磁気圏まで侵入し、低高度まで下がってくる。
- 太陽風動圧とULF波の動き、電離圏イオンのmass-loaded wave accelerationの間には密接な関係があるということがわかった。
- 流出速度のイオン種依存性は、mass-loaded ion accelerationプロセスの高度依存性と一致する。

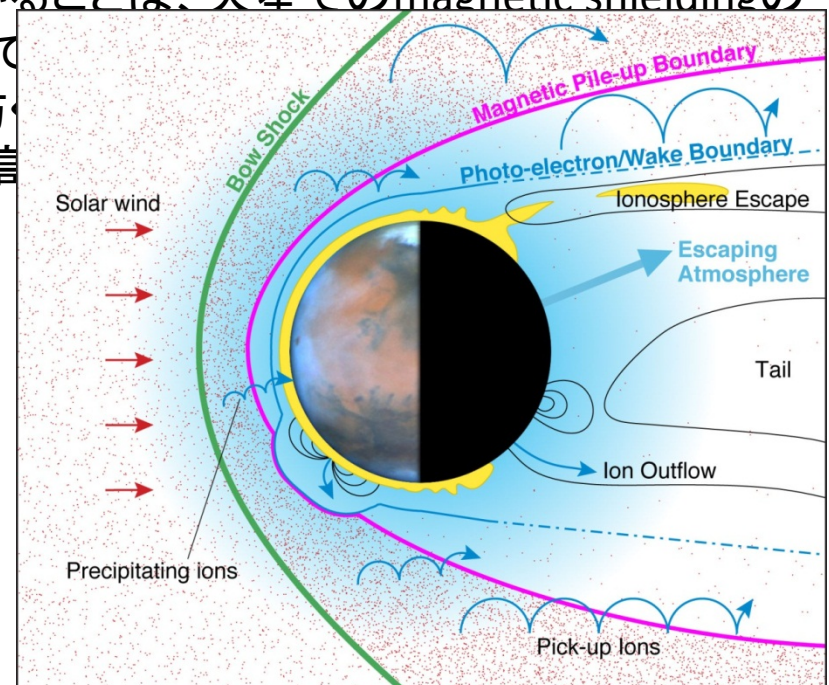
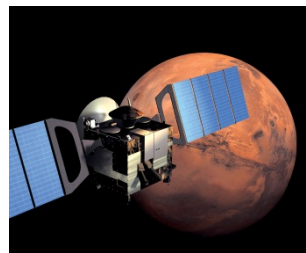
Introduction

- 太陽極紫外線と太陽風は、弱磁場の火星の電離圏と大気圏に強い影響を及ぼす。
 - フォボス2、MGS(Mars Global Surveyor)、MEX(Mars Express)から得られたデータより、太陽極紫外線と太陽風力が火星大気のイオン化、加速、火星由来のプラズマの散逸と関連していることがわかった。
- 固有磁気圏、または、誘導磁気圏は、惑星のプラズマ環境にとって重要な役割を果たしている。磁気圏は、プラズマを遮断するが、プラズマ加速を促す効果もある。
- 火星の昼側で大きく大気が浸食されていることは、火星でのmagnetic shieldingの効果が弱いことを示唆している。本研究では、magnetic shieldingでは電離圏に侵入してきた強いマグネトシースULF波を防ぐことができないことを明らかにした。ULF波は、電離圏イオンのエネルギーを高くして、脱出速度まで加速させることができるエネルギー源であると思われる。



Introduction

- 太陽極紫外線と太陽風は、弱磁場の火星の電離圏と大気圏に強い影響を及ぼす。
 - フォボス2、MGS(Mars Global Surveyor)、MEX(Mars Express)から得られたデータより、太陽極紫外線と太陽風力が火星大気イオン化、加速、火星由来のプラズマの散逸と関連していることがわかった。
- 固有磁気圏、または、誘導磁気圏は、惑星のプラズマ環境にとって重要な役割を果たしている。磁気圏は、プラズマを遮断するが、プラズマ加速を促す効果もある。
- 火星の昼側で大きく大気が浸食されていることは、火星でのmagnetic shieldingの効果が弱いことを示唆している。本研究で入ってきた強いマグネトシースULF波を防ぐ。ULF波は、電離圏イオンのエネルギーを高くできるエネルギー源であると思われる。



Importance of waves

- 火星付近でのplasma waveについては、多くの論文で述べられている。
Wang and Nielsen [2002]、Espley et al. [2005]、Brain et al. [2002]、Brain [2007]、Winningham et al. [2006]、Gunell et al. [2008]、Ergun et al. [2006] など
 - Wang and Nielsen [2002]・・・火星付近でのplasma waveの観測が火星の電離圏上層部のhydrodynamic wavesとして説明している。
 - Espley et al. [2005]・・・2003年10月28日に発生したXクラスフレアが火星に届いたときの磁場の強い振動について述べている。
 - Brain et al. [2002]・・・火星の衝撃波上流のプラズマの波の特徴をMGSのデータから解析している。
 - Winningham et al. [2006]、Gunell et al. [2008]・・・火星でのイオン・電子の波のような変調について述べている。
 - Ergun et al. [2006]・・・波は、火星におけるion energizationと電離圏プラズマの流出に対して重要であると考えている。
- 地球の磁気圏において、ULF/アルフベン波の伝播や影響などは、広範囲に渡って研究されてきた。
- Chaston et al. [2005] では、ClusterとFAST衛星の観測より、昼側/カスプの極域の磁力線上で、マグネトシースでできたアルフベン波によってプラズマ加速が導かれるということが述べられた。マグネトシースMHD波もまた、極域に伝わり、地球の磁気圏の夜側/テイル側に入り込むかもしれない。

ASPERA-3 on the Mars Express (MEX)

- 本論文では、電離圏イオンのwave accelerationに焦点を当てている。
- MEXに搭載されているプラズマ観測機器ASPERA-3によって得られたイオンと電子のデータを解析している。(イオン観測器(IMA)と電子観測器(ELS))
- 電子とイオンの時系列データのwavelet解析では、火星のプラズマ環境でのwave-activityの分布を描くことを可能にした。
- さらに、イオン加速とともにイオンの動きの特性を知ることができる。

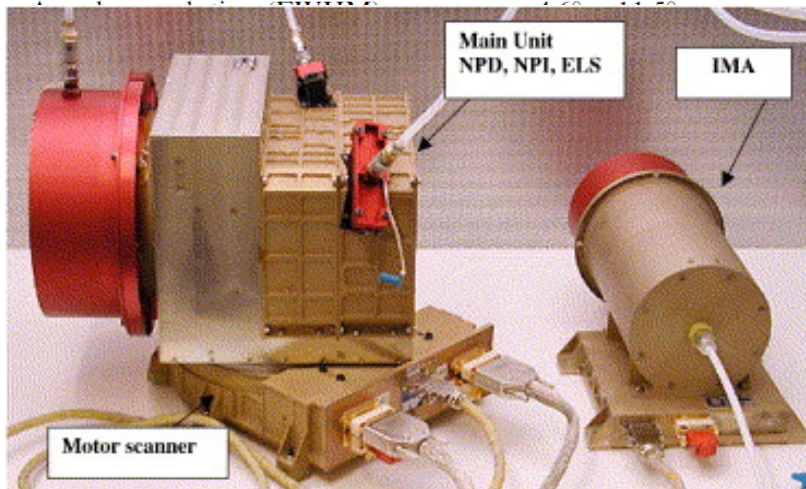
Parameter	NPI	NPD	ELS	IMA
Particles to be measured	ENA	ENA	Electrons	Ions
Energy range, keV per charge	$\approx 0.1\text{--}60$	0.1–10	0.01–20	0.01–40
Energy resolution, E/E	No	0.8	0.07	0.07
Mass resolution	No	H,O	N/A	H ⁺ , He ⁺⁺ , O ⁺ , Mol.
Intrinsic field of view	9° × 344°	9° × 180°	10° × 360°	90° × 360°
Angular resolution (FWHM)	4.6° × 11.5°	5° × 30°	10° × 22.5°	4.5° × 22.5°
G-factor/pixel, cm ² sr	1.6×10^{-3}	6.2×10^{-3}	7×10^{-5}	3.5×10^{-4}
Efficiency, ϵ , %	~ 1	1–50	Inc. in G	Inc. in G
Time resolution (full 3D), s	32	32	32	32
Mass, kg	0.7	1.3	0.3	2.2
Power, W	0.8	1.5	0.6	3.5

Lundin and Barabash [2004]

ASPERA-3 on the Mars Express (MEX)

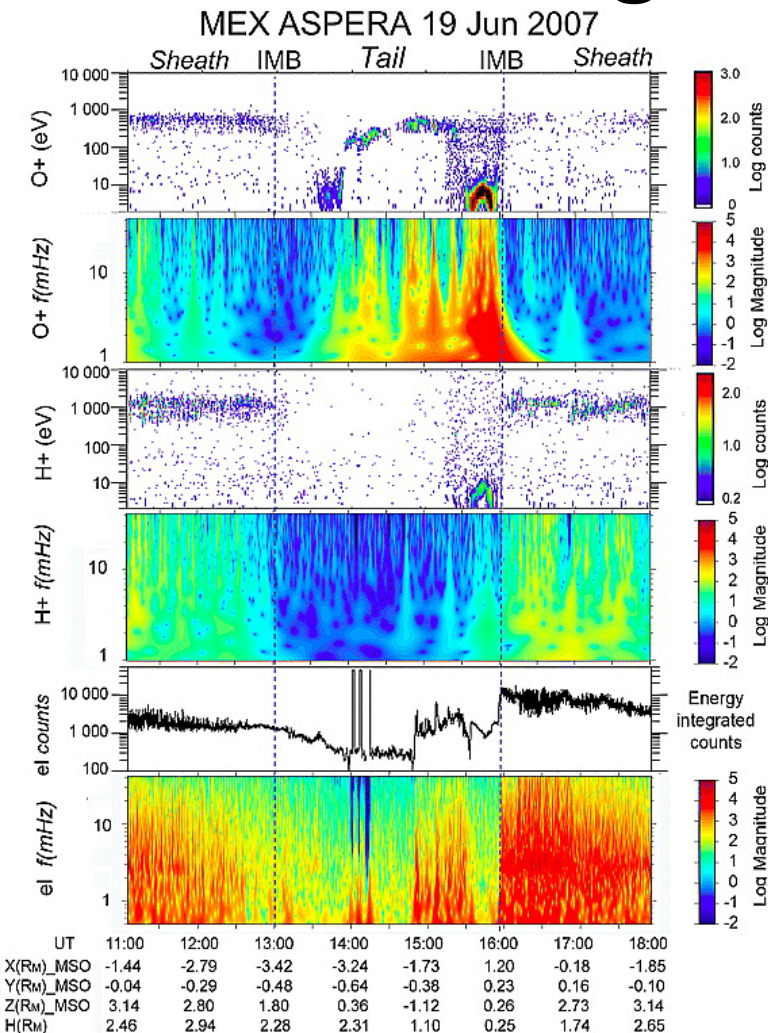
- 本論文では、電離圏イオンのwave accelerationに焦点を当てている。
- MEXに搭載されているプラズマ観測機器ASPERA-3によって得られたイオンと電子のデータを解析している。(イオン観測器(IMA)と電子観測器(ELS))
- 電子とイオンの時系列データのwavelet解析では、火星のプラズマ環境でのwave-activityの分布を描くことを可能にした。
- さらに、イオン加速とともにイオンの動きの特性を知ることができる。

Parameter	NPI	NPD	ELS	IMA
Particles to be measured	ENA	ENA	Electrons	Ions
Energy range, keV per charge	$\approx 0.1-60$	0.1-10	0.01-20	0.01-40
Energy resolution, E/E	No	0.8	0.07	0.07
Mass resolution	No	H,O	N/A	H ⁺ , He ⁺⁺ , O ⁺ , Mol.
Intrinsic field of view	9° × 344°	9° × 180° 5° × 30°	10° × 360° 10° × 22.5°	90° × 360° 4.5° × 22.5°
		6.2 × 10 ⁻³ 1-50 32 1.3 1.5	7 × 10 ⁻⁵ Inc. in G 32 0.3 0.6	3.5 × 10 ⁻⁴ Inc. in G 32 2.2 3.5



Lundin and Barabash [2004]

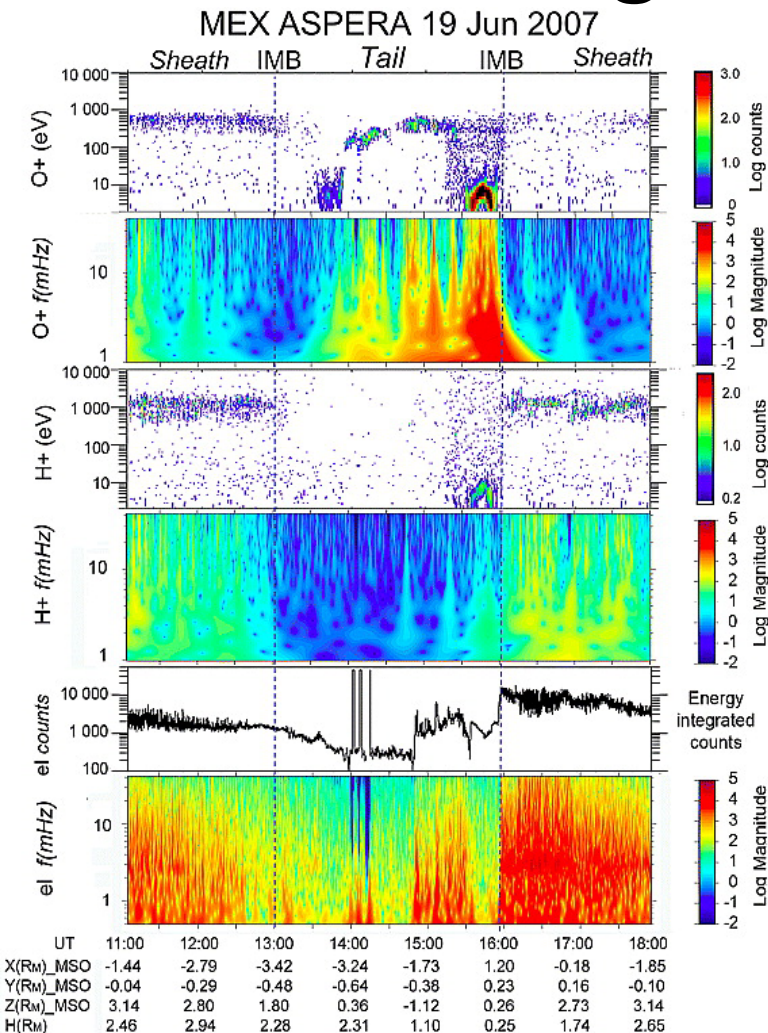
Observations of Planetary Ion Energization and Outflow



- 12秒の分解能のIMAのデータを使用して、ULF周波数帯でのイオン変動を決定する。また、ELSは、fast sweepモード(1秒値)のデータを使って、高周波の波の解析を可能にする。
- イオンと電子のデータにwavelet解析を適用する。IMAとELSのwaveletスペクトルを共に考えることで、wave-activity(イオンと電子の振動)と電離圏イオンの加速について考える。
- MEXは、2-4km/sの速度で移動している。ナイキスト周波数を考慮すると、空間的な変動が1 mHz (≈ 6000 -12000km) 以下であると考えられる。しかしながら、局所的な共鳴や図2中の他の特徴は、 ≈ 3 mHz以上の主に時間的な影響を含んでいる。

図1: O^+ 、 H^+ 、電子のenergy-time spectraとfrequency-time wavelet spectra

Observations of Planetary Ion Energization and Outflow



- H^+ と電子の振動・・・マグネトシース内におけるwaveletスペクトルは同じような特徴を表している。その特徴とは、広帯域ノイズが重ね合わさった周波数範囲3-20mHzの狭帯域の振動である。
- 同じようなwaveletの特徴は、電離圏の O^+ (図1の15:40-16:00UT)、IMBの内側の電子、マグネトシースの内部の電子で見られる。マグネトシースと電離圏でのイオンと電子の激しい振動は、MEXの近火点である ~ 300 km高度まで下がってきていた。
- O^+ の振動はテイルの中心部でも見られる($\sim 14:10$ UT)これは、火星のプラズマ環境での偏在するULF波の動きを示唆している。

図1: O^+ 、 H^+ 、電子のenergy-time spectraと frequency-time wavelet spectra

Low-energy ion density altitude profiles

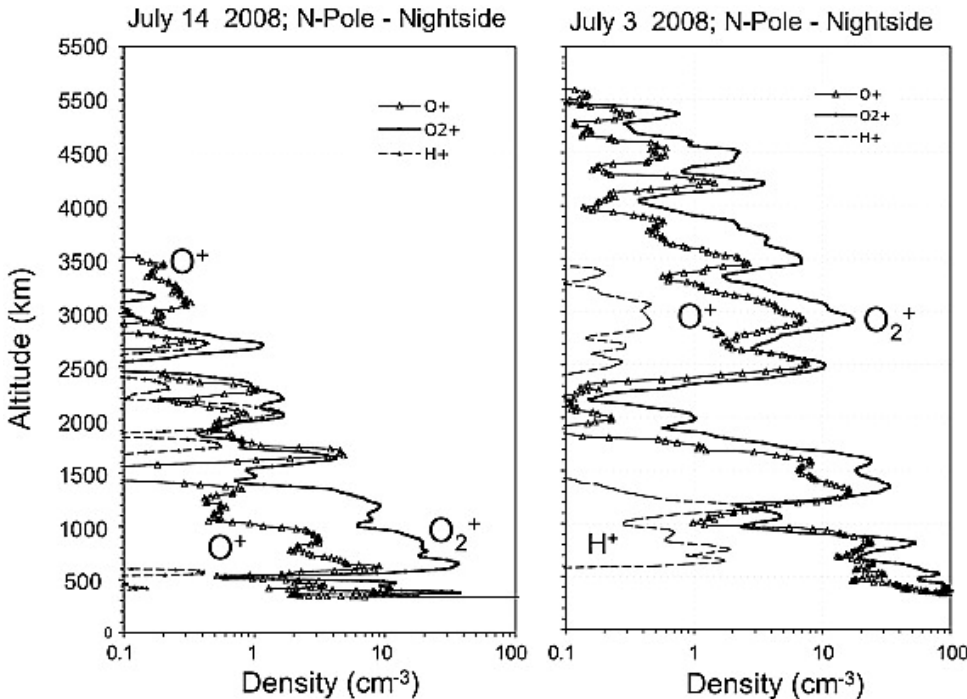


図2: 低エネルギー($\approx 1-10\text{eV}$)の H^+ 、 O^+ 、 O_2^+ のイオン密度の高度分布。

- 図2より、電離圏は概して、 H^+ 、 O^+ 、 O_2^+ のULF波のような振動の影響を受けている。その振動は北極の電離圏領域から夜側のテイル領域まで伸びている。
- 低高度の振動は、空間的なものであり、残留磁場の上空の密度異常のように見受けられる。しかし、図2の低高度のデータは北極域の上空であり、残留磁場の影響は弱い。
- 観測データと時間をプロットすることで、長期的で準周期的な振動を見ることができる。
- 図1からも明らかなように、マグネトシース中の波がテイルの電離圏イオンに作用するのと同じく、低高度の電離圏イオンにも影響することを示唆している。

→波は火星の磁気圏の全プラズマの領域に侵入するであろう。

しかしながら・・・

磁場と波の観測データが十分ではない。

マグネトシースのイオンの振動(波)と電離圏のイオンの振動(波)の間の関係、波のエネルギー源など、詳しくはわからない。

Wavelet magnitude vs Magnetosheath dynamic pressure

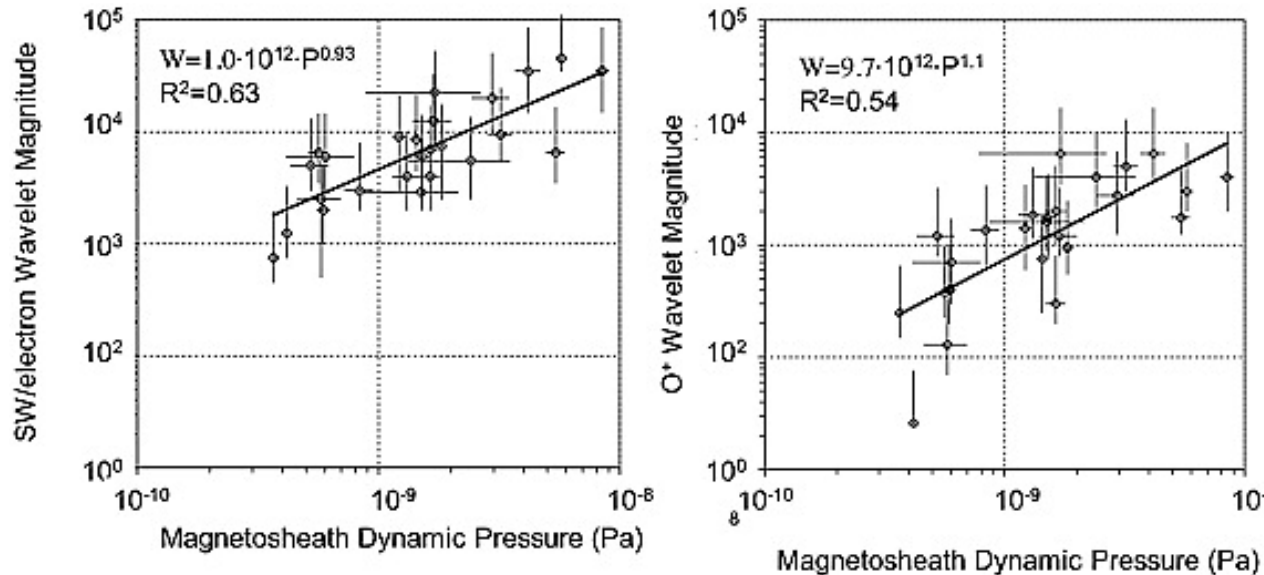


図3: マグネトシース(e^-)と電離圏の O^+ の10-20mHzでの wavelet強度($W(f,t)$)対マグネトシース内の動圧(Pa) (マグネトシース内の電子密度と He^{++} の流出によるもの)

- 動圧のエラーバー・・・マグネトシース動圧がinboundかoutboundかの違い
Wavelet強度のエラーバー・・・マグネトシース(e^-)の中、または惑星起源の O^+ の流出流中における最大wavelet強度の時間間隔中での変動

- 最小二乗法を使うと、
マグネトシース(e^-)対動圧では、

$$W = 1.0 \cdot 10^{12} \cdot P^{0.93}$$

電離圏の O^+ 対動圧では、

$$W = 9.7 \cdot 10^{12} \cdot P^{1.1}$$

→パワーローのカーブは、ULF波の強度と太陽風動圧の間で正の相関があることを示している。

※マグネトシースのwavelet強度の平均は、 O^+ のwavelet強度よりも10倍高い。

Scatter plot of ion velocity peaks

- ULF波がどの程度までenergizationと電離圏イオンの散逸に寄与できるのか？
- イオン加速のより詳細な解析...

MEXの60軌道中において、 H^+ 、 O^+ 、 O_2^+ が同時に測定された時の加速されたイオンのエネルギーベクトルを解析(3分平均で417スキャン)
→イオンのエネルギーピークを速度ピークに変換して、図4の散布図

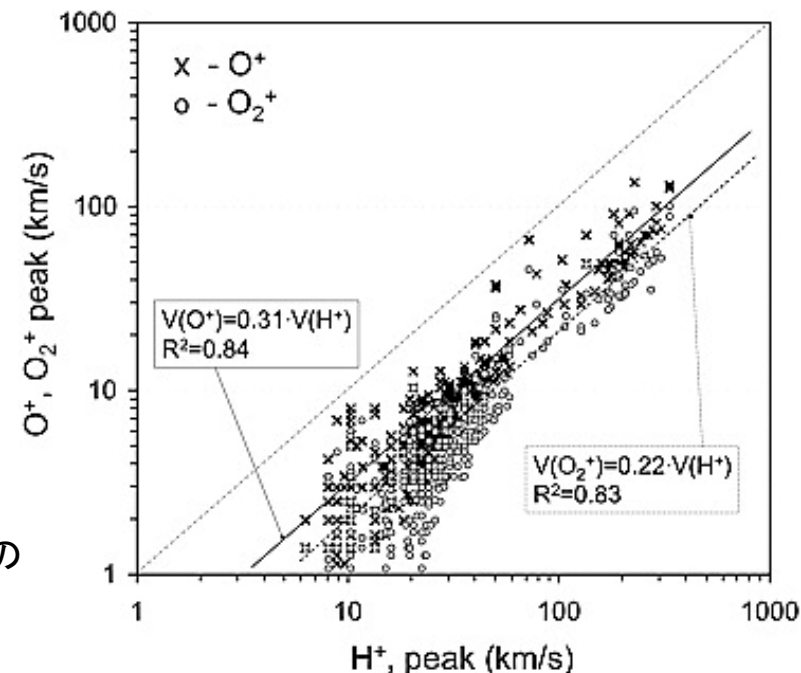
- 図4の散布図に対して、最小二乗法を使うと...

H^+ に対して、重いイオン(O^+ と O_2^+)の速度が直線的に増加している。これは、イオンの種と加速の間における部分的な運動量のバランスであることを示唆している。

- イオン速度は、(直接的には比例しないが、)イオン質量の関数として増加する。
- 図4の直線が平均的な速度の加速率を与える。

$$\frac{V(O^+)}{V(H^+)} = 0.31, \quad \frac{V(O_2^+)}{V(H^+)} = 0.22$$

図4: O^+ と O_2^+ の速度ピーク対
 H^+ の速度ピークの散布図。(イオンの
エネルギーピークを速度ピークに変換)



Scatter plot of ion velocity peaks

- ULF波がどの程度までenergizationと電離圏イオンの散逸に寄与できるのか？
- イオン加速のより詳細な解析...

MEXの60軌道中において、 H^+ 、 O^+ 、 O_2^+ が同時に測定された時の加速されたイオンのエネルギーベクトルを解析(3分平均で417スキャン)
→イオンのエネルギーピークを速度ピークに変換して、図4の散布図

- 図4の散布図に対して、最小二乗法を使うと...

H^+ に対して、重いイオン(O^+ と O_2^+)の速度が直線的に増加している。これは、イオンの種と加速の間における部分的な運動量のバランスであることを示唆している。

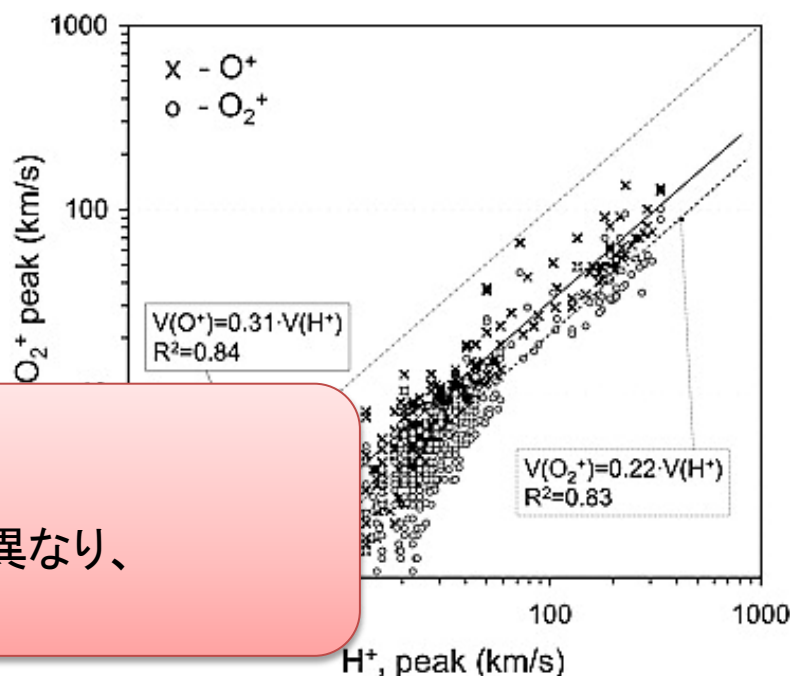
- イオン速度は、(直接的には比例しないが、)イオン質量の関数として増加する。
- 図4の直線が平均的な速度の加速率を与える。

$V(O^+)$

$V(O_2^+)$

- 加速プロセスをまとめると、

1. 質量依存しており、低い質量で速い速度になる
2. 質量の違いによって、与えられるエネルギーは異なり、速度も異なる。





Discussions

- 火星からの電離圏イオンの加速と流出は、
ion pickup [e.g., Luhmann and Schwingenschuh, 1990]
mass-loaded ion pickup [Lundin and Dubinin, 1992]
waves [Ergun et al., 2006]
ambipolar electric fields [Frahm et al., 2010]
などが関係している。
- イオンの加速と流出は電離圏の昼側で始まり、その後に脱出速度より少し速いぐらいでテイル方向に移動する。[Lundin et al., 2008a]
- 電離圏の数密度が高いような低高度では、加速プロセスはmass loadingの影響を受ける。Mass loadingは、動いているプラズマと静止している濃いプラズマとの相互作用でもある。火星近くでのcollision-less mass loaded ion pick up は理論からも発見されている。[Lundin and Dubinin, 1992]
- イオンと電子のULF波の振動は火星の電離圏に広がっている。振動のwavelet 強度はマグネトシースで最大に達する。しかし、テイル、電離圏の中心部には高エネルギーの加速されたイオンが残っている。
- プラズマ振動は、波によるプラズマ振動という意味だけではなく、プラズマ加速という意味でもある。Wavelet強度はマグネトシースの動圧に対して正の相関がある(図3)という事実から、プラズマ圧は波から起こされるということである。
- 火星では、波がイオンの加速や流出において重要な目を果たしているということは疑いのないことである。問題は、どの程度、波が電離圏のプラズマ加速と流出に対して寄与しているかということである。
- マグネトシースの動圧は火星でのイオンの流出に対して比例している。[Lundin et al., 2008b]

Discussions

- 火星からの電離圏イオンの加速と流出は、
ion pickup [e.g., Luhmann and Schwingenschuh, 1990]
mass-loaded ion pickup [Lundin and Dubinin, 1992]
waves [Ergun et al., 2006]
ambipolar electric fields [Frahm et al., 2010]
などが関係している。
- イオンの加速と流出は電離圏の昼側で始まり、その後に脱出速度より少し速いぐらいでテイル方向に移動する。[Lundin et al., 2008a]
- 電離圏の数密度が高いような低高度では、加速プロセスはmass loadingの影響を受ける。Mass loadingは、動いているプラズマと静止している濃いプラズマとの相互作用でもある。火星近くでのcollision-less mass loaded ion pick up は理論からも発見されている。[Lundin and Dubinin, 1992]
- イオンと電子のULF波の振動は火星の電離圏に広がっている。振動のwavelet 強度はマグネト

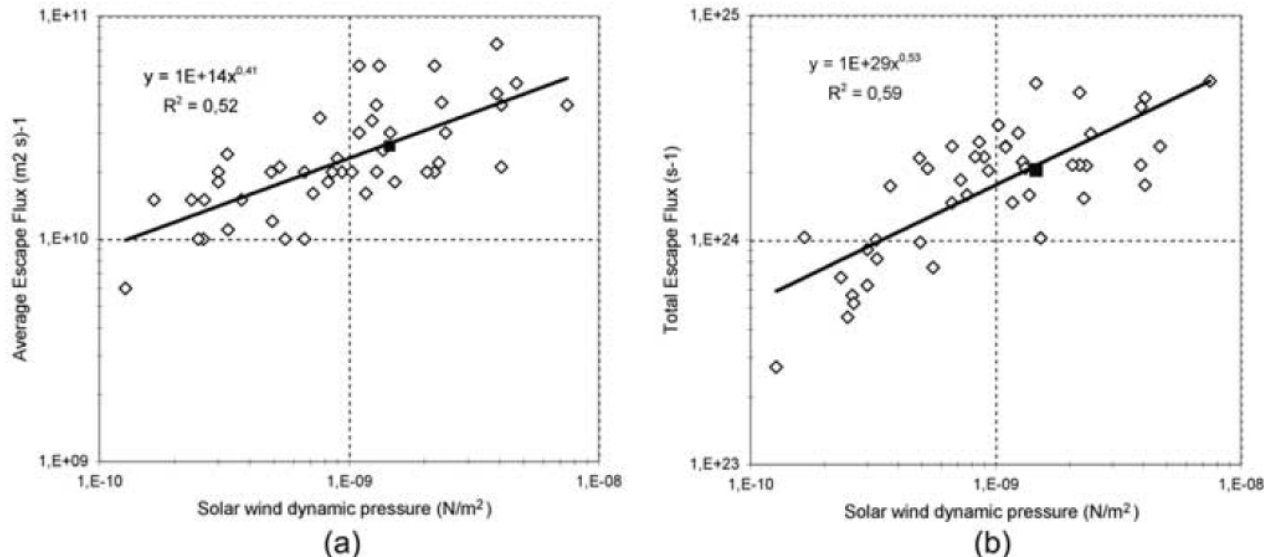


図5: (a) Average escape flux と (b) 惑星由来イオンの散逸率対 太陽風動圧 [Lundin et al., 2008b]

でもある。
プラズマ圧

いらない
かという

8b]

Ponderomotive force

- Ponderomotive wave forcing の理論を使って、波によるイオン加速の理論的解析を行ってみる。
- Ponderomotive forceは、振動する場において時間平均力として記述される。その力は、荷電粒子と波とのエネルギー・運動量の交換によるものである。

□ 二つのponderomotive force

- Magnetic Moment Pumping force (MMP)・・・荷電粒子の発散する磁場中の波の力
The gradient/Miller force・・・Wave electric fieldの空間的勾配から決まる力
- 磁化したプラズマ中で、アルフベン波で移動し、ジャイロ周波数よりも低い周波数のMMPとMiller forceは、

$$F = -\frac{mc^2}{B^2} \left(\frac{E^2}{B} \frac{\partial B}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial E^2}{\partial z} \right)$$

(Eはwave electric fieldで、Bはプラズマ中の ambient magnetic field)

と書ける。

- MMP力は、z(磁力線に沿った向き)に沿った磁場の傾きに影響される。一方で、Miller forceは、wave electric fieldのz方向の傾き(減衰)によって決められる。磁力線に沿った二つの力は、MMPがBの空間勾配、miller forceがEの空間勾配と関連しているという意味では相補的である。
- Eがzに対してゆっくりと変わるという前提の下では、上の式の第一項(MMPの部分)に注目したほうがよい。
しかしながら、特にサブソーラー領域(wave E-field dampingが強い)やdivergence Bが小さい時は、gradient E(Miller) forceはイオン加速と流出にも重要になってくる。

Ponderomotive force

- 運動方程式とponderomotive potential($U(z) = \left[\frac{cE}{2B_0}\right]^2 \left\{1 - \left[\frac{B_0}{B(z)}\right]^2\right\}$)からアルフベン波によるMMP力による速度増加は以下のように導かれる。

$$V(z) = \frac{cE}{\sqrt{2}B_0} \left\{ \left[\frac{B_0}{B(z)} \right]^2 - 1 \right\}^{1/2}$$

[Lundin and Guglielmi, 2007, equation 2.40]

速度の増加は、convective term (E/B_0)によって記述され(E はアルフベン波の電場、 B_0 は初期の周囲の磁場)、磁場の傾き($\frac{B_0}{B(z)}$)に比例する。

- 磁場の傾き($\frac{B_0}{B(z)}$)は、火星近くのMMP ponderomotive加速を増幅させ、 E の強さは主にイオン加速へ寄与する。これらのことは図3のwavelet強度プロットからわかる。
- イオン加速は、昼側のマグネティックパイルアップリージョンで始まる。マグネティックパイルアップリージョンはテイル方向に行くに従い弱くなり、wakeと火星の側面から遠い場所で最小になる。
- Subsolar/pileupからwake/flankまでで規格化された $|B|$ の平均の値をとると、 $B_0/B(\text{tail}) \approx 3$ である。
- これは、 E/B_0 がファクター3で増大することを意味していて、イオンの速度 V も同様である。
- 図3の左では、 $W(f,t)$ はファクター100で変化するので、 E はファクター10で変化する。
($W(f,t) \propto E^2$)
- 火星のテイルの上では、コールドな電離圏イオンの速度はファクターで最大30まで増加する。
- MMP速度加速は、質量に依存しないので、イオンは質量に関わらず同じ速度まで加速される。
→イオン加速ははっきりと質量依存しているので、さらなる解析が必要である。

Mass loading

- Mass loading 自体はイオン質量による速度の違いを示唆してはいない。しかし、電離圏高度が上昇するにつれてプラズマ密度が減少することによって、mass loadingは低高度で目立つようになる。
- 火星の典型的な電離圏イオン密度のプロファイルでは、 O_2^+ が低高度で最も豊富であり、 O^+ が中高度で支配的で、 H^+ が高高度で支配的であるということを表している。[e.g., Hanson et al., 1977; Fox, 2003; Terada et al., 2009]
- Mass loadingは、 O_2^+ の加速に大きな関わりを持っているが、一方で、より希薄なプラズマ環境で加速される H^+ の加速には関わりが小さい。
- Mass loadingの高度依存は、観測された O^+ / H^+ 、 O_2^+ / H^+ の速度比から定性的な同意が得られている。(図4)

Summary and Conclusions

- 電離圏イオンの流出と散逸を導く加速機構を知るために、火星上空での加速されたイオンのエネルギーと質量分布を解析した。
- ASPERA-3のイオンと電子のデータは、誘導磁気圏のULF波が火星の磁気圏(MEXの近火点より下)まで到達していることを示した。
- 本研究では、マグネトシース・電離圏ULF波のactivityと太陽風動圧に対して良い相関を見つけた。 O^+ の流出と太陽風動圧、マグネトシースULF波のパワー $W(f,t)$ の相互関係は、火星からの O^+ の流出率と関係があると思われる。
- Ponderomotive wave forcingは、イオン加速と流出の実現可能なメカニズムである。本研究では、非共鳴の場合でも、火星の誘導磁気圏の中で時間的なMMP波の力が、火星の側面とテイルに沿って電離圏のイオンの速度をファクター30で加速させることを示した。テイルのプラズマシートでのより一層の加速は、集中的なULF波の合体によるものとカレントシートでの加速と推測される。
- 電離圏イオンの加速プロセスは、部分的に質量依存している。異なる質量のイオンの加速では同じエネルギーは得られず、同じ速度も得られない。 O^+ / H^+ 、 O_2^+ / H^+ の速度比の観測結果、mass loadingは高度依存していると考えられる。低高度では、 O_2^+ が支配的であり、高高度の H^+ と比較しても大きくmass loadingする。

