

火星勉強会

Espley et al., Observations of low frequency magnetic oscillations in the Martian magnetosheath, magnetic pileup region, and tail, J. Geophys.

Res., 109, A07213, doi: 10.1029/2003JA010193, 2004

&

Ergun et al., Role of plasma waves in Mars' atmospheric loss, Geophys.

Res. Lett., 33, L14103, doi: 10.1029/2006GL025785, 2006

東北大学

益永 圭

要旨

- 火星近傍では様々なプラズマ波動が観測されている。
- MGSデータを用い、magnetosheath, magnetic pileup region (MPR), tailのプラズマ波動特性を調べた[Espley et al.]
- また、プラズマ波動による火星電離圏イオンの加熱についても議論する[Ergun et al.]。

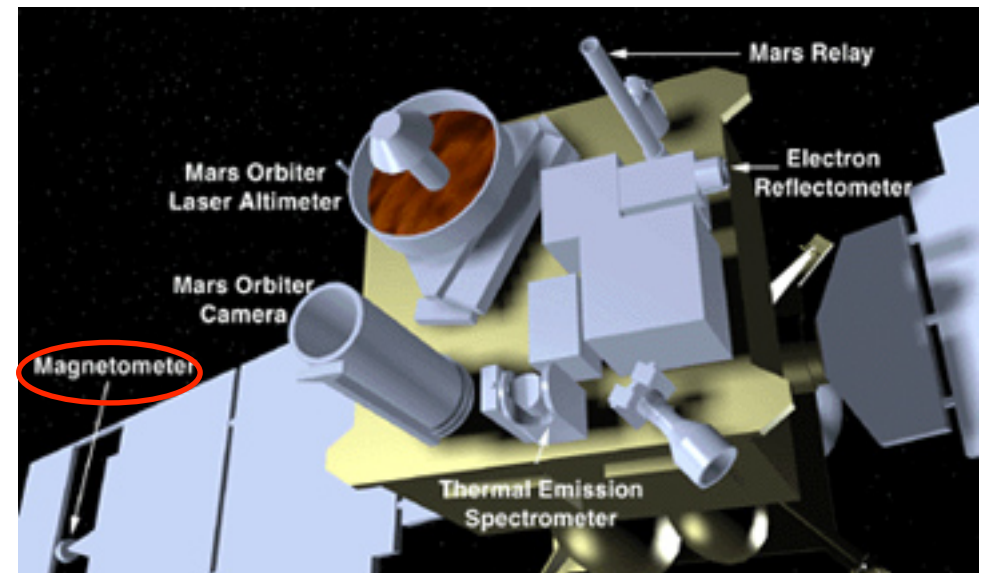
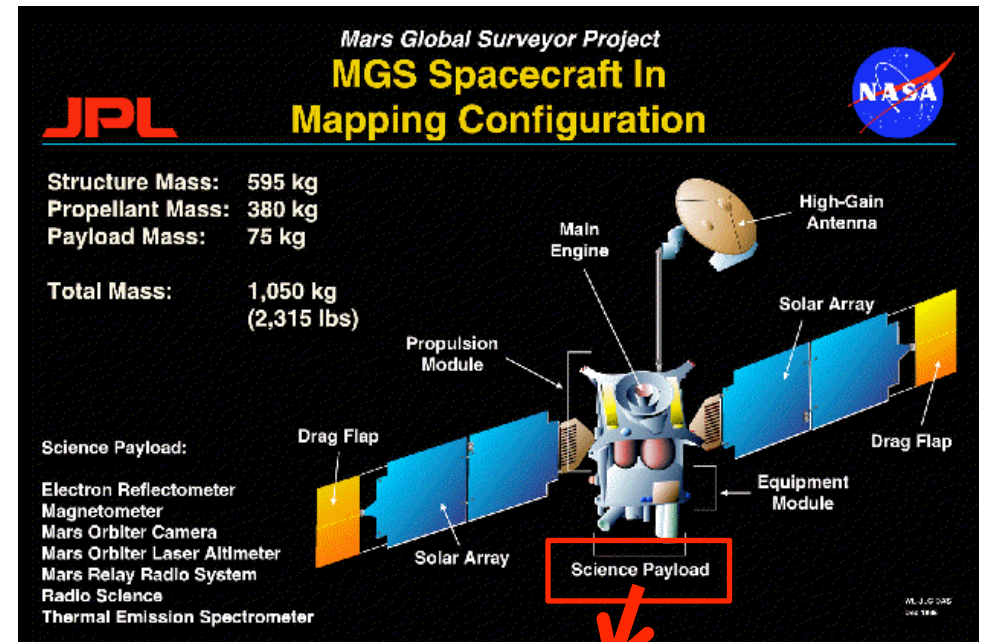
Plasma wave observations

Martian plasma waves

- 火星では、phobos-2によってプラズマ波動が観測されているが、それ以来波動観測は行われていない。
- 近年は、プラズマ波動によるイオンの加熱が電離圏起源のcoldなイオンの流出に効いてるのではないかと注目されている。

Instruments

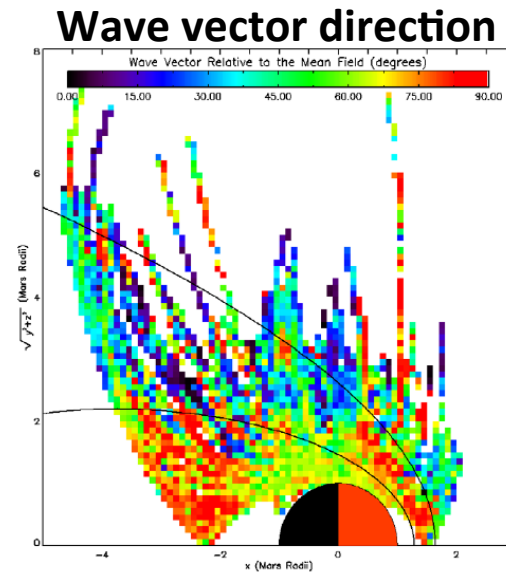
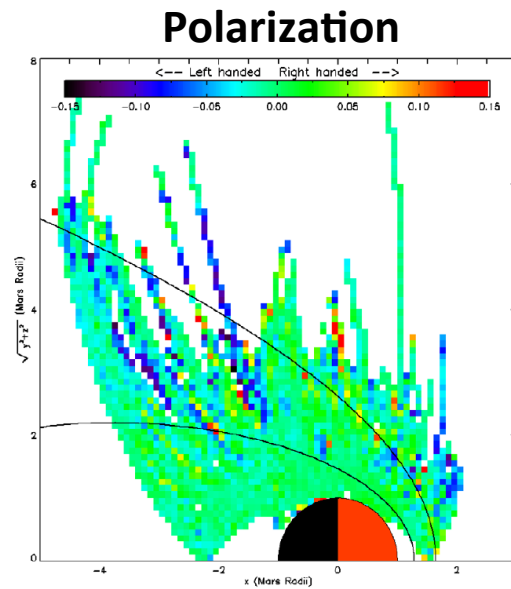
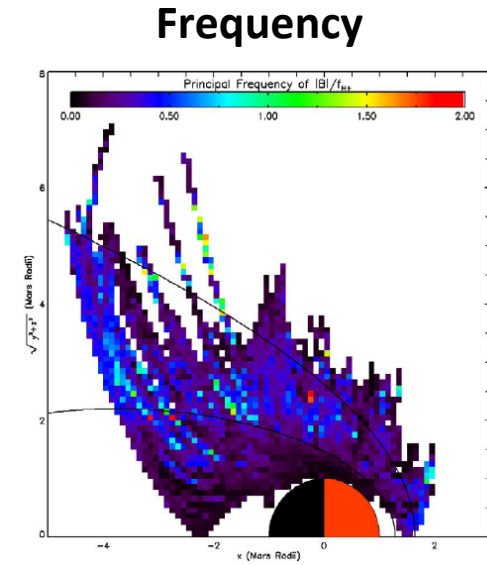
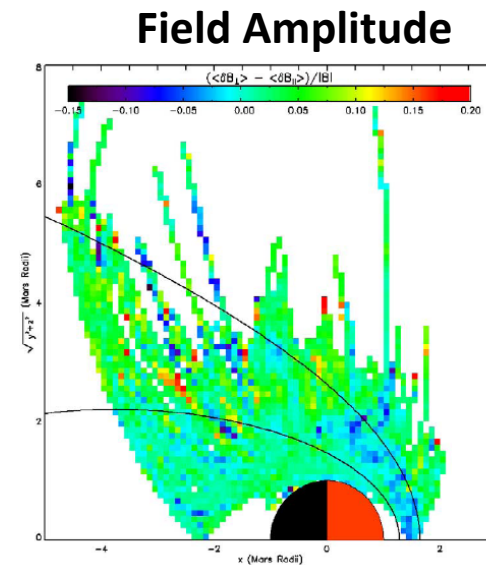
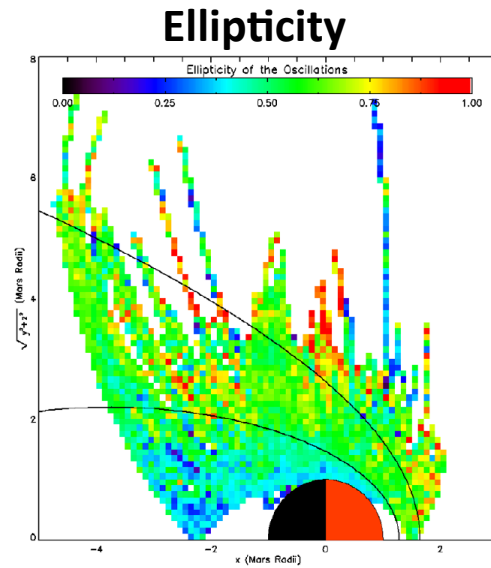
- Mars Global Surveyor (MGS)
- 近火点・・・約170km
- 遠火点・・・約17000km
- 軌道傾斜角・・・約92°
- 軌道周期・・・約11.6時間



Data Analysis

- Ellipticity, Polarization, Field Amplitude, Wave vector direction, Frequencyの空間分布を統計的に調べた
- 磁場方向 (Mean Field)は60秒で平均して決定。
- Minimum variance analysisを用い、磁場変動が最小の方向を決定した。→磁場の伝播方向の決定

Statistical Study



Statistical Study

- **Dayside sheath**
- ellipticity · · · moderately polarized
- Polarization · · · Mixed
- Field Amplitude · · ·
 $\delta B_{//} > \delta B_{\perp} \rightarrow$ compressional
- wave vector · · · perpendicular to MF
- Frequency · · · $< f_{H+}$
- $\rightarrow$ **mirror mode instability**

Statistical Study

- **Nightside sheath**
- ellipticity ▪ ▪ ▪ significantly polarized
- Polarization ▪ ▪ ▪ left-hand
- Field Amplitude ▪ ▪ ▪ $\delta B_{//} < \delta B_{\perp} \rightarrow$ transverse
- wave vector ▪ ▪ ▪ parallel to MF
- Frequency ▪ ▪ ▪ $\sim f_p$
- **$\rightarrow$ ion cyclotron instability**

Statistical Study

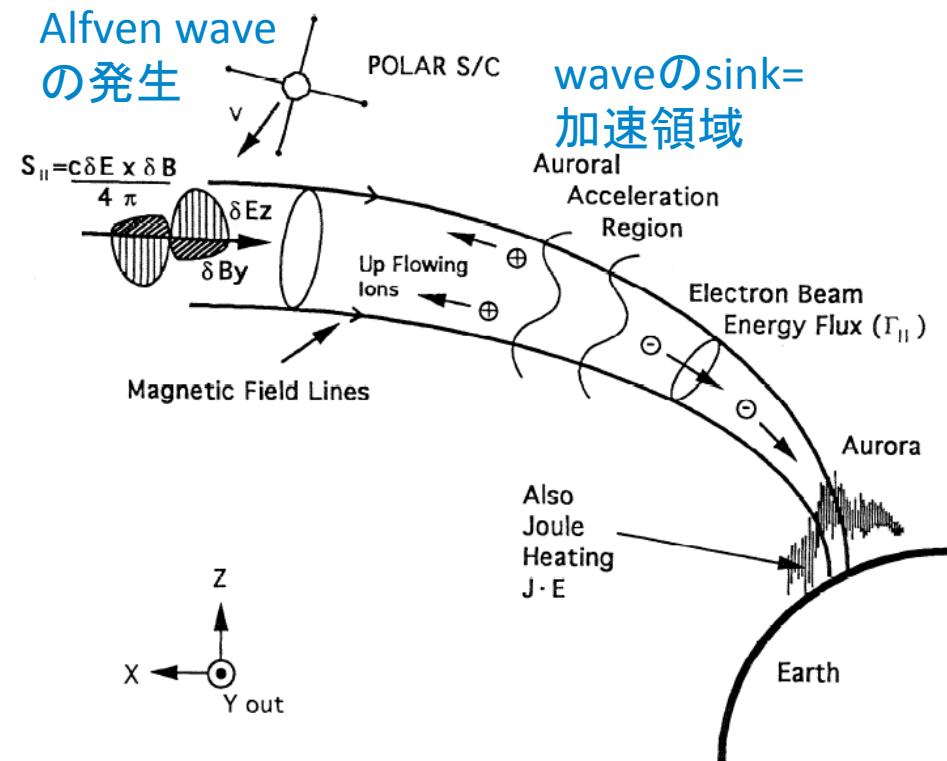
- **MPR, tail**
- ellipticity ▪ ▪ ▪ linearly
- Polarization ▪ ▪ ▪ linearly polarized
- Field Amplitude ▪ ▪ ▪ $\delta B_{//} \sim \delta B_{\perp} \rightarrow$ mixed
- wave vector ▪ ▪ ▪ perpendicular to MF
- Frequency ▪ ▪ ▪ $< f_p$
- **→様々な波のモードが混在**

磁場のデータからはどのような波動が存在しているのかうまく決定できていない。

Ion loss by plasma waves

Aurora acceleration at Earth

- 地球では、電子が加速領域で加速され、オーロラを発生させる。
- 加速領域では外向きの強い電場が生まれており、イオン流出も同時に起こっている (Polar wind)。
- **Alfven wave**が粒子加速のエネルギー源であると考えられている [Wygant et al., 2000]。



Ion heating by plasma waves

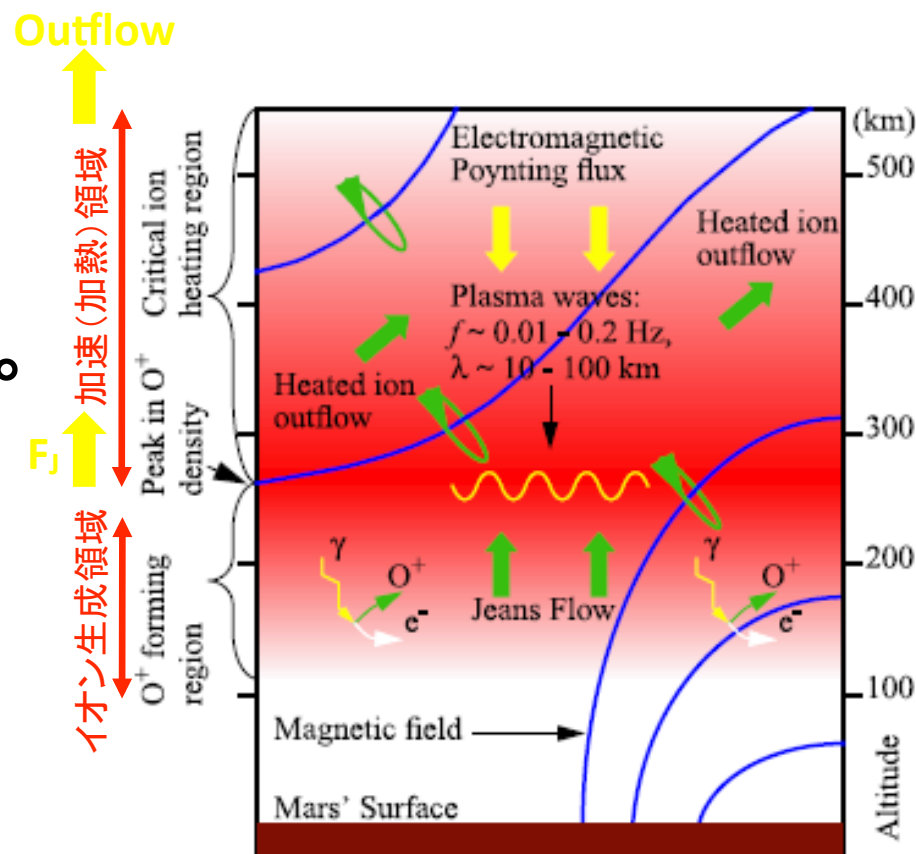
Motivation:

火星でも、プラズマ波動が
粒子へエネルギーを与え
うるのでは？

→簡単に見積もってみよう。

①Source Flux (加速領域
へ入ってくる O^+ イオンのフ
ラックス)

②Heating rate(加速領域
に入ってきた O^+ イオンへ与
えるエネルギー)
を計算する。



Ion heating by plasma waves

①Source Flux:

$$F_j = n_0 v_{th} \text{Exp}(-\Phi_g(z)/k_B T_0)$$

k_B : ボルツマン定数

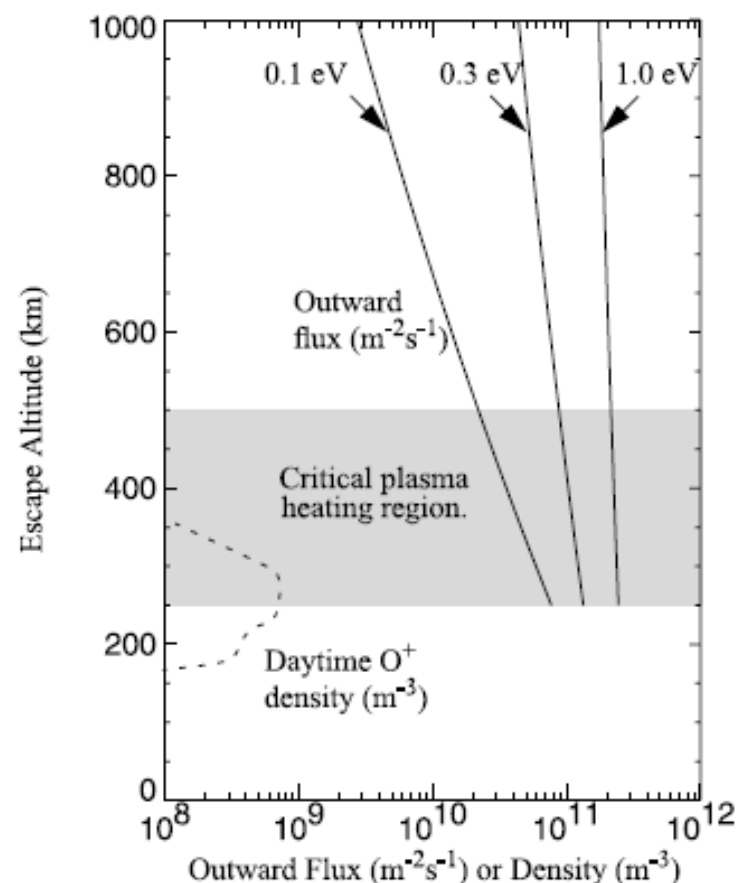
n_0 : プラズマ密度

v_{th} : 熱速度

$\Phi_g(z)$: 高度 z における重力ポテンシャル

T_0 : O^+ の温度

1 eVまで加熱されるフラックスは、 $F_j \sim 2 \times 10^{11}$
[$m^{-2}s^{-1}$] ... (i)



Ion heating by plasma waves

② Heating rate

How O⁺ can gain energy to escape

電場の計測がないため、 $\Delta E/\Delta B = V_A$
(V_A :Alfven速度)
から ΔE を求める。

$$\Delta B = 10 \sim 1000 [\text{nT}^2/\text{Hz}]$$

$$V_A = 2 \times 10^{-4} c$$

と置くと、

$$\Delta E = 4 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-6} [\text{V}^2/\text{m}^2\text{Hz}]$$

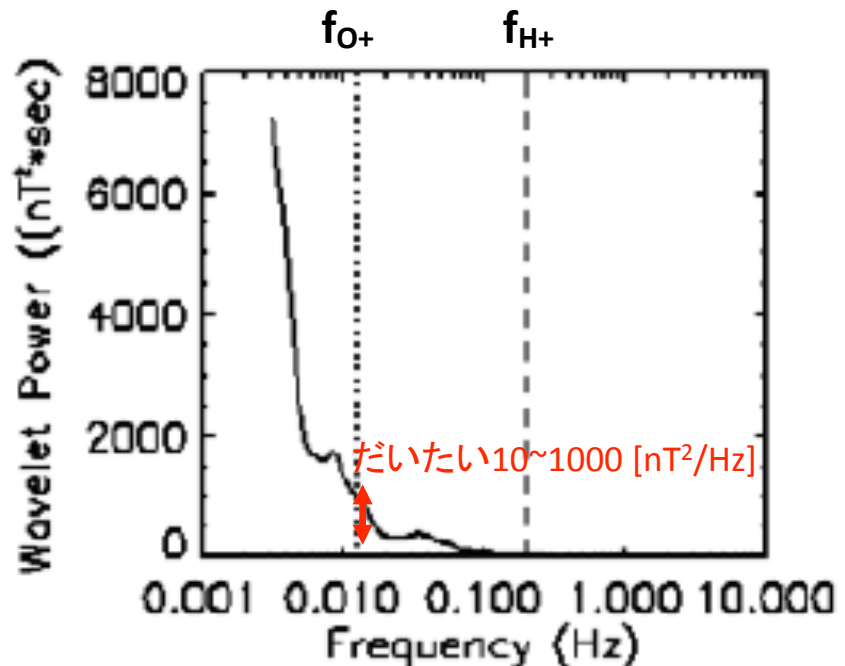
$\Delta E/\Delta B = 10 V_A$ と考えると、

$$\Delta E = 4 \times 10^{-4} [\text{V}^2/\text{m}^2\text{Hz}]$$

Chang et al., [1986]によると、Ion resonant heating は、以下のように表される。

$$W = e^2 \eta_L S(f_{O+}) / 2m_O = 5 \times 10^{-2} \sim 500 [\text{eV/s}] \quad \text{Heating rate}$$

(e : $1.6 \times 10^{-19} [\text{C}]$, m_O : $1.67 \times 10^{-27} \times 16 [\text{kg}]$, η_L : 0.5, S : $\Delta E [\text{V}^2/\text{m}^2]$)



Wavelet power spectrum [Espley et al., 2004]

Ion heating by plasma waves

- (i)が流出するのに必要なエネルギー
は、 $2 \times 10^{11} [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}] \times 1.6 \times 10^{-19} [\text{J}] = 3.2 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2]$
- 火星半球（昼側）において考えると、
- $2 \times 10^{11} [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}] \times 4\pi \times (3300 \times 10^3)^2 [\text{m}^2] \sim 2.7 \times 10^{25} [\#/s]$

Ion heating by plasma waves

O⁺ loss from plasma waves generated by electron beams and field-aligned currents

- ① 太陽風電場の電離圏へのマッピング
- ② 沿磁力線電流の発生 (電子の加速)
- ③ 沿磁力線電流がプラズマ波動を生む
- ④ プラズマ波動がイオンを加熱
- ⑤ イオン流出

降り込む電子は、下層を加熱し、地球カスプで起こるような ambipolar diffusion によってイオンが加速される。

大まかに計算すると、 $10^{14} \times 4\pi \times (3300\text{km})^2 \times 0.005 \sim 6.8 \times 10^{25} \text{ [#/s]}$

カスプで観測される
イオンフラックス

電子ビームの
見られる確率

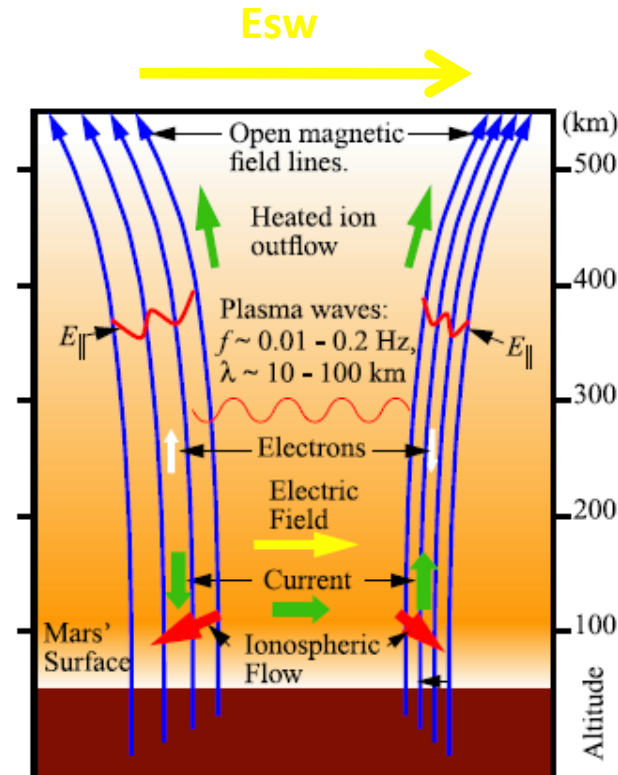


Figure 3. A cartoon of the “auroral region” at Mars. The orange shading represents the electron density. Currents are driven from the solar wind electric fields penetrating to Mars’ ionosphere. Auroral currents often result in electron acceleration and plasma waves which heat ions.

まとめ

- プラズマ波動による火星電離圏 O^+ の加熱の効果について調べた。
- 上流から直接侵入したプラズマ波動や電子ビーム、沿磁力線電流から生まれたプラズマ波動がcoldなイオン流出を引き起こすことを示した。
- 流出レートは $\sim 10^{25} [\#/s]$ となり、過去の観測と矛盾しない。