

**Gurnett et al., “Large density fluctuations in the martian ionosphere as observed by the Mars Express radar sounder”, *Icarus*, 2010**

の紹介 名大STEL 松本洋介

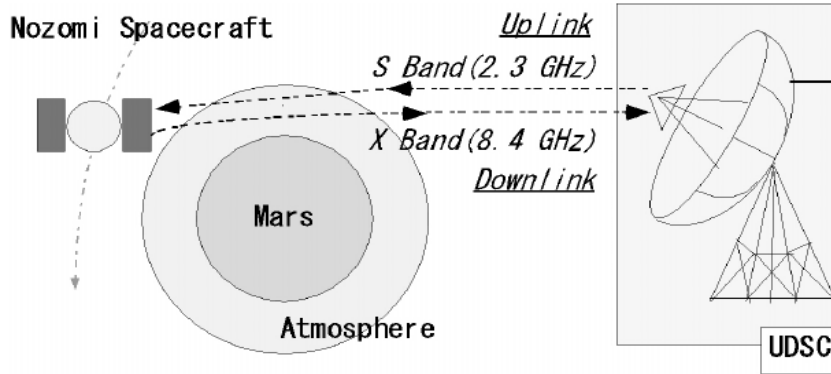
# 要旨

- MEX搭載のMARSISによる、火星電離圏上層部の密度 & 磁場変動のサウンディング観測
- 変動場スペクトルから、コルモゴロフの $5/3$ 乗則が得られており、太陽風と相互作用する高度  $400\text{ km}$  付近では強い乱流状態になっていることを示唆
- mirror-mode or Kelvin-Helmholtz 不安定がその原因では？

# 背景

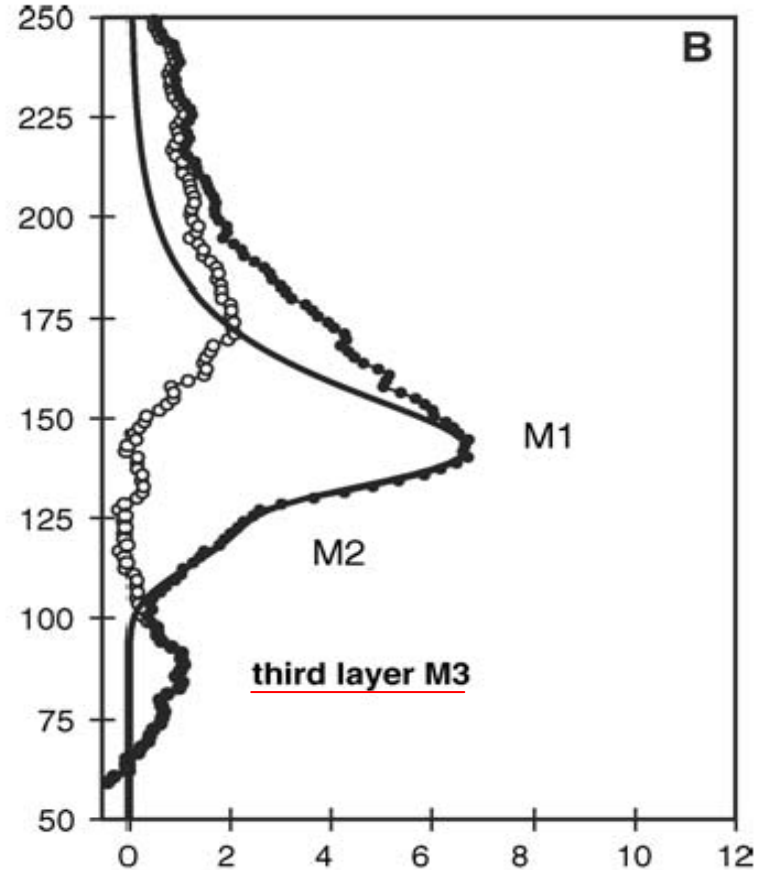
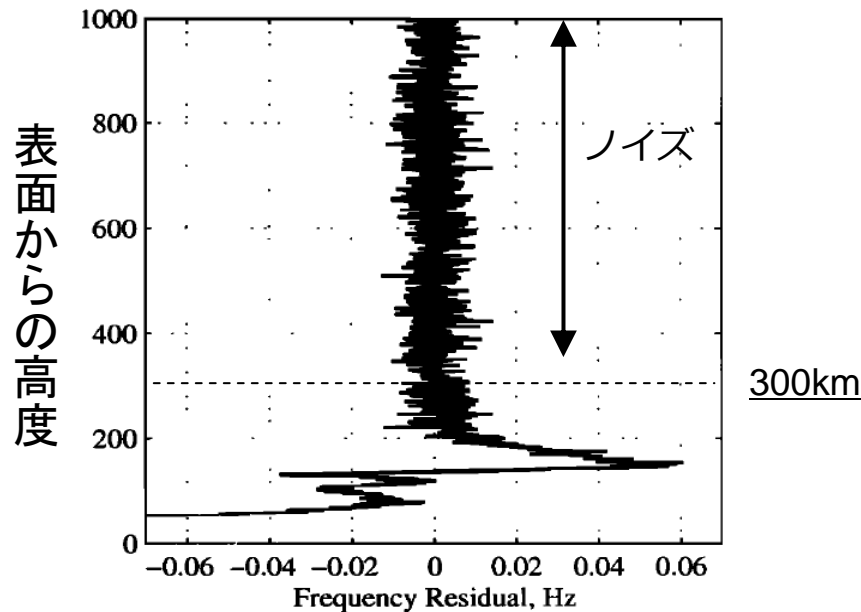
これまでの火星電離圏観測は、電波掩蔽（えんぺい）法による観測が主流

## 電波掩蔽法



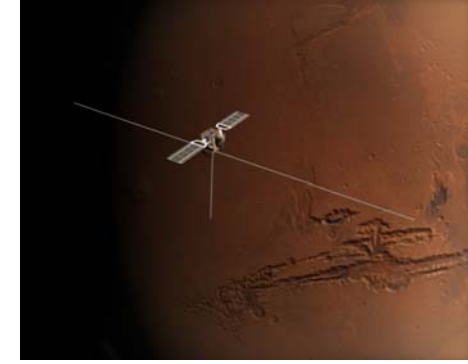
Noguchi et al., 2002

MGSによる観測 (Hinson et al., 2001)



MEX搭載のMaRSによる第3番目の電子密度ピークの発見 (Patzold et al., 2005)

# Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS)



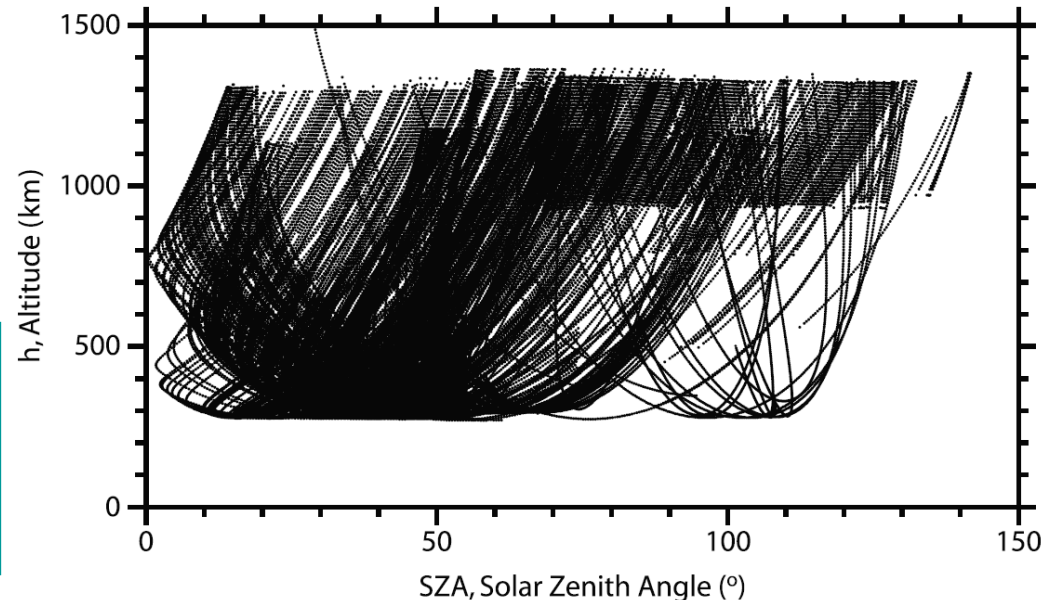
## MARSISの特徴&電波掩蔽法との差異

”MARSIS complements radar occultation measurements.”

- これまで観測されていない電離圏上層部 (> 250km) の観測が可能
- その場&リモートセンシング (電波掩蔽法は視線積分)
- 広い空間分布を得ることが可能 (電波掩蔽法はSZA=44~136°)
- 観測高度は1200km~275km (近火点)
- 観測継続時間は約40分



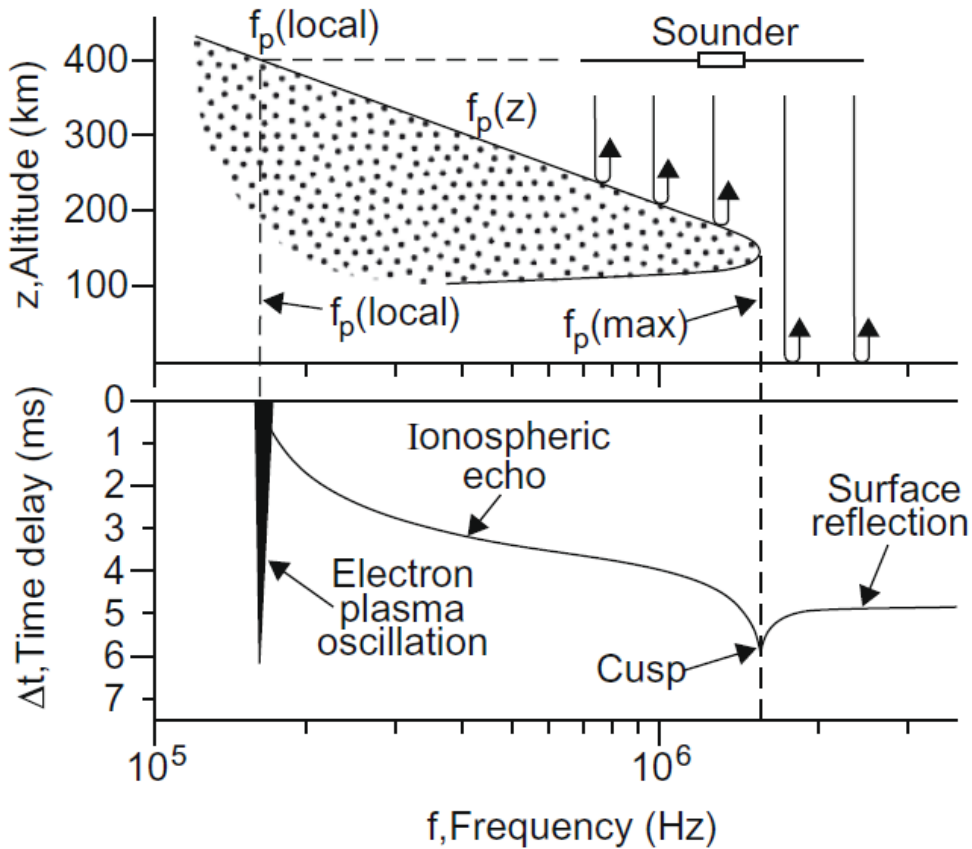
太陽風と直接相互作用する領域での電離圏電子密度、磁場変動の観測が可能に



# MARSISの観測原理

電磁場パルスを照射し、周波数、反射して戻ってくる時間より、その場での電子プラズマ振動数数（密度）と、その高度プロファイルを得る手法。

## ionogram



## 非磁化プラズマ中の自由空間モード

$$f^2 = f_{pe}^2 + c^2 k^2 \quad f_{pe} = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}} = 8980 \sqrt{n(\text{cm}^{-3})} \text{ Hz}$$

## 群速度

$$v_g = \frac{\partial f}{\partial k} = c \sqrt{1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2}}$$

## 遅延時間

$$\Delta t = 2 \int_{z(f_p)}^{z_{sc}} \frac{dz}{v_g} = \frac{2}{c} \int_{z(f_p)}^{z_{sc}} \frac{dz}{\sqrt{1 - f_p^2 / f^2}}$$

逆変換

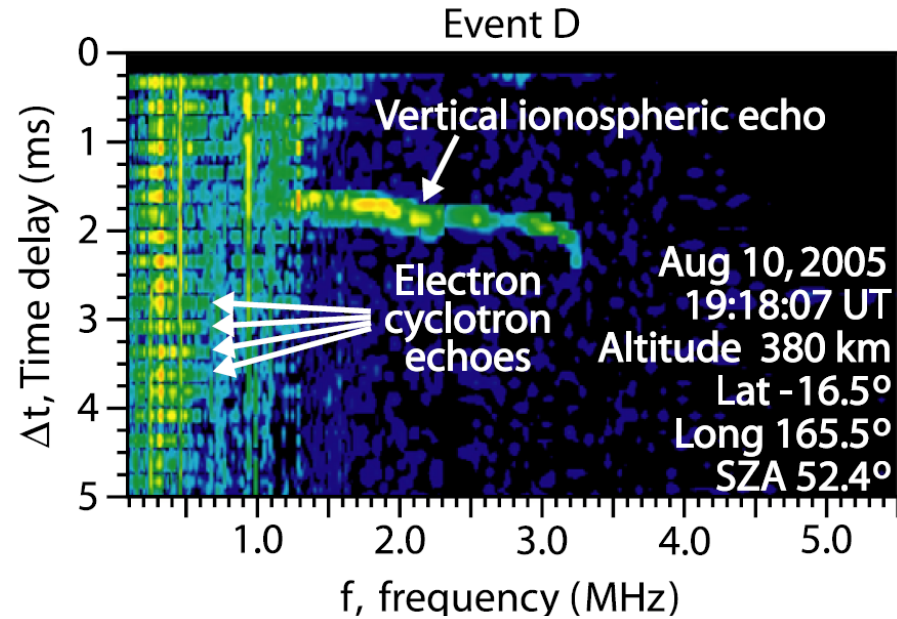
## 密度（プラズマ振動数）の高度プロファイル

$$z(f_p) = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_0}^{\pi/2} c \Delta t (f_p \sin \alpha) d\alpha$$

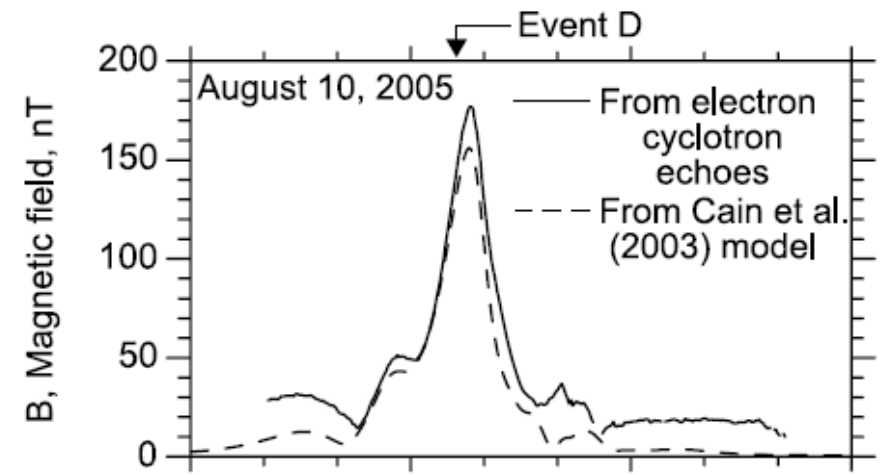
$\alpha_0 = f_p(z_{sc}) / f_p$

# MARSISによる磁場計測

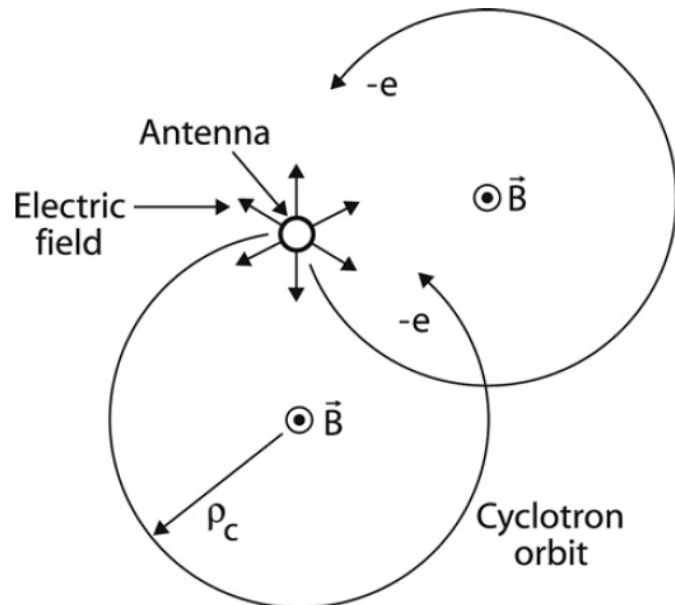
## Electron cyclotron echoes (Gurnett et al., 2005, 2008)



$c\Delta t/2$ , Apparent range (km)



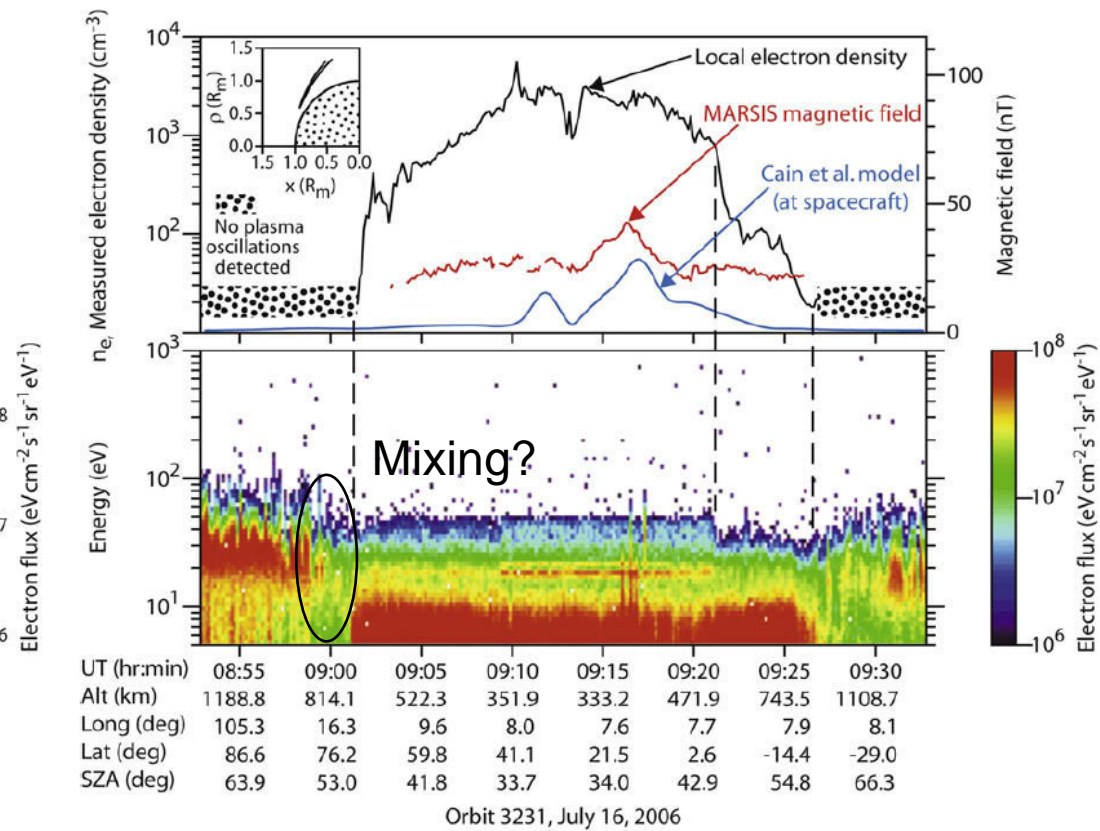
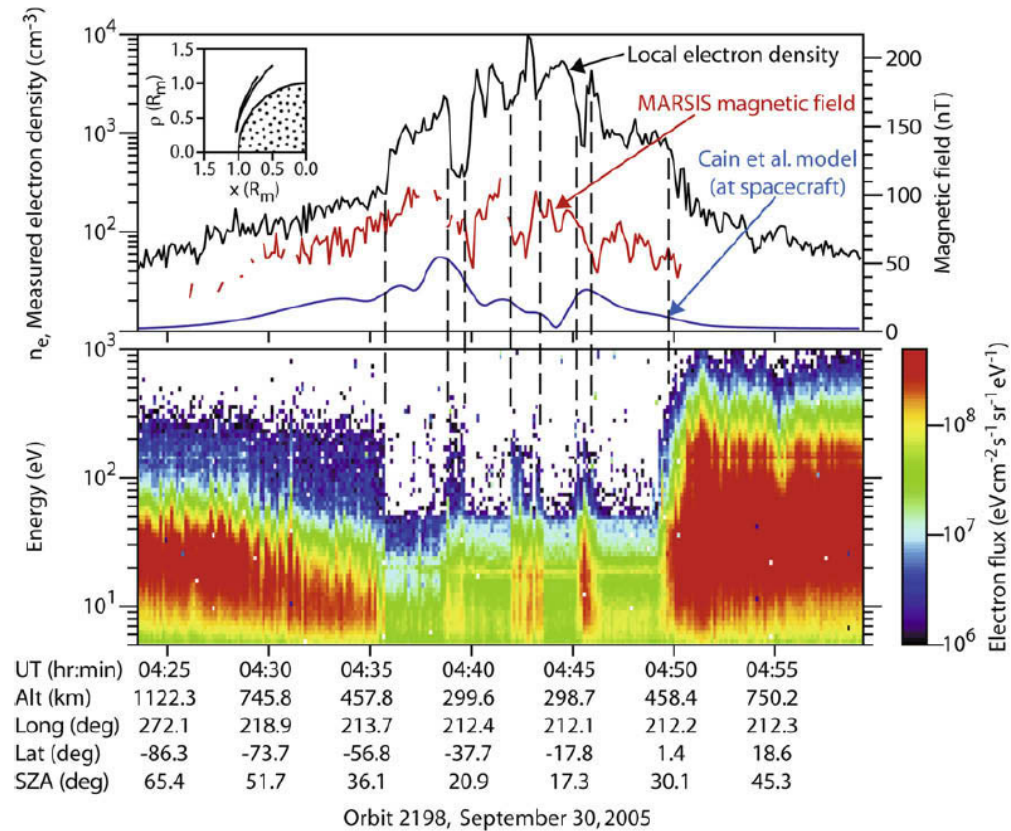
UT	19:00	19:15	19:30	19:45
Alt	1619.9	505.4	434.9	1481.0
Long	190.6	194.5	194.6	201.1
Lat	-70.1	-27.8	29.8	74.2
SZA	52.5	48.8	78.6	108.6



- 電磁パルスによって加速された電子が旋回運動をして、アンテナに戻ってくることを利用 (左図)
- ionogramで見ると、周期的に電子が戻ってくる様子が得られる (左上図)
- Cain et al. のモデル (MGS磁場観測がベース) と比較して、良い一致が得られている (右上図)
- MEXには磁場計測器が搭載されていないので、本手法が有用。



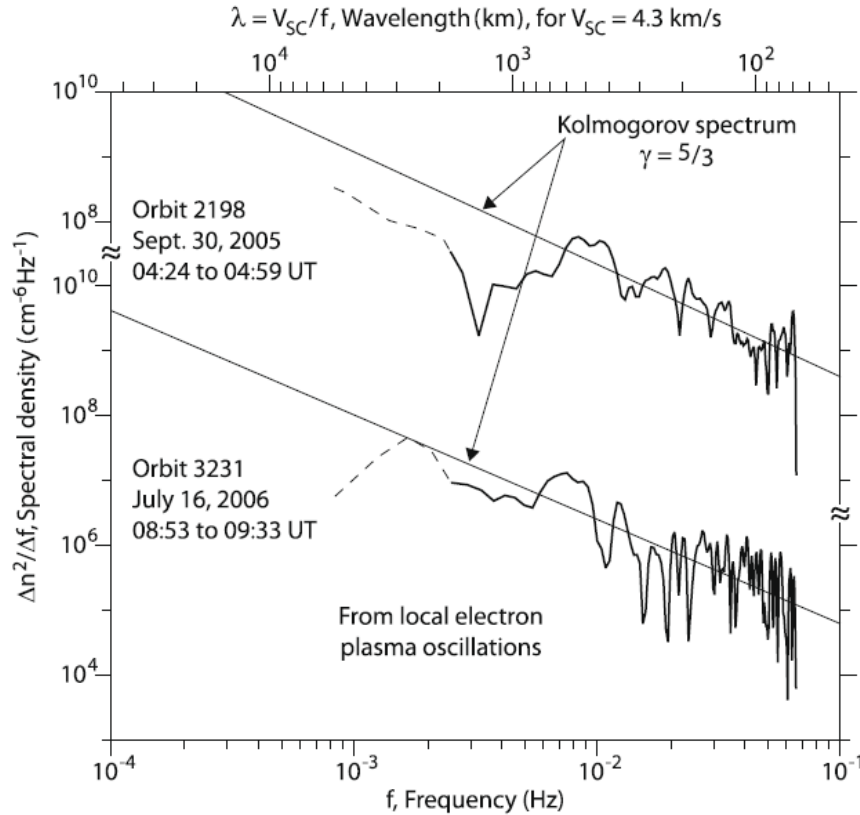
# イベント



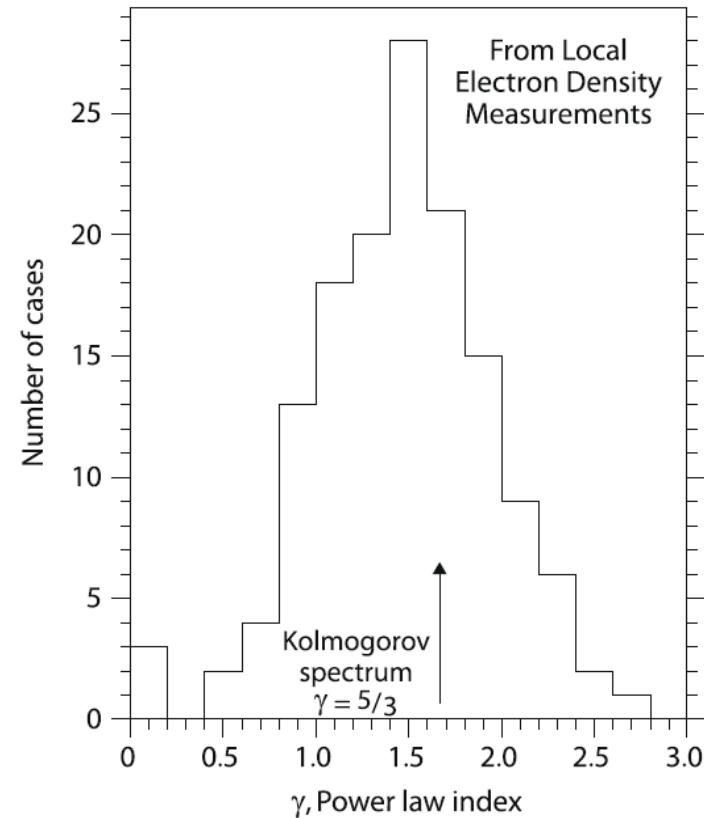
- Orbit 3231 09:01UT付近のようなクリアな電子密度のジャンプによる、きれいなionopause crossingはまれ
- Orbit 2198 04:35~04:50に代表されるように、ionopause付近では大きな密度変動が伴なう。
- 磁場は、大まかなトレンドはモデルに沿うが、密度同様に変動成分が乗る。Offsetはモデルには含まれない、昼間側の太陽風による圧縮の効果。

# パワースペクトル

## 密度変動によるスペクトル



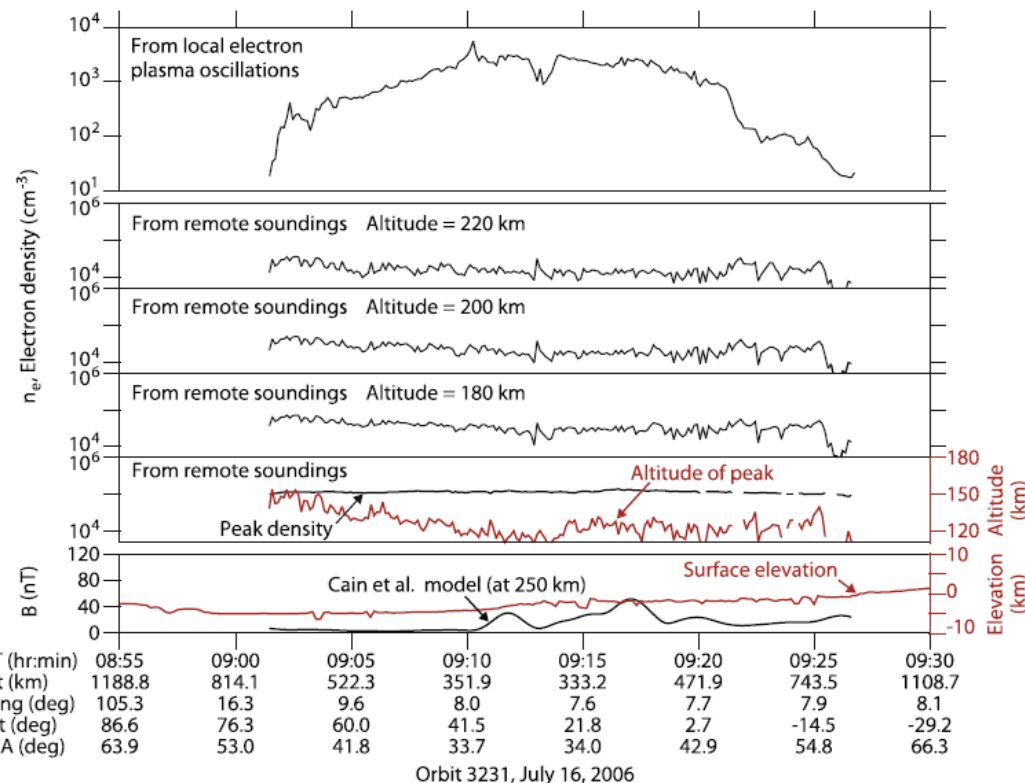
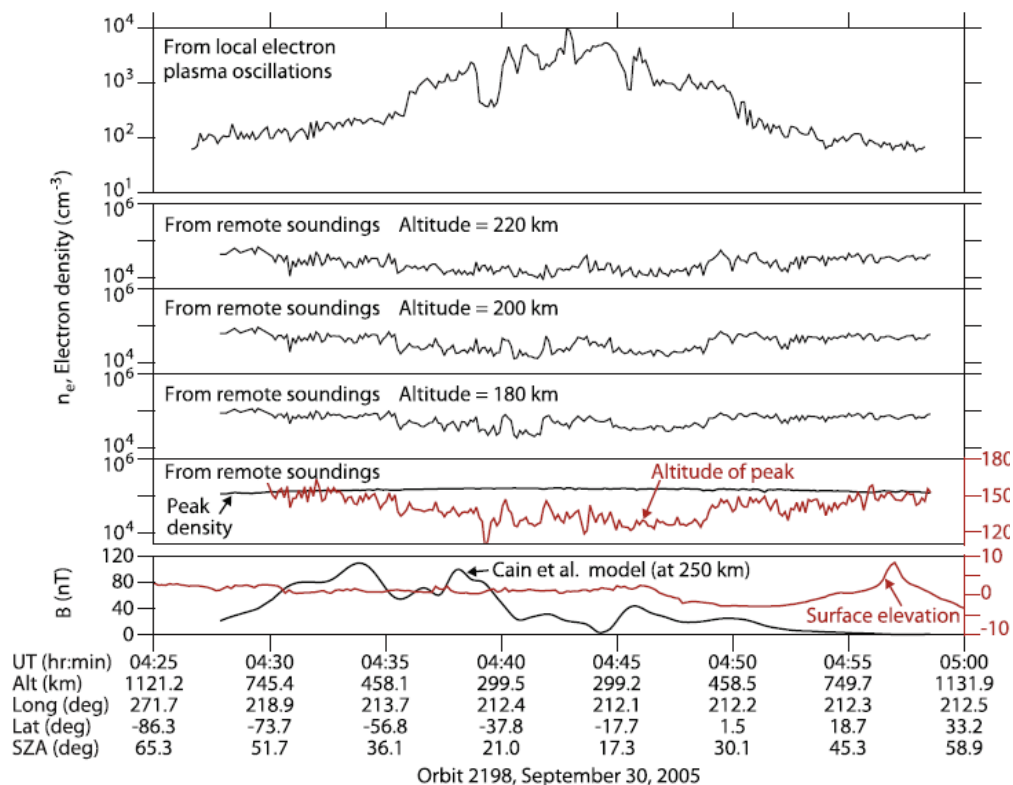
## 142例のベキ指数の統計



- テイラー仮定 ( $\delta v \ll V_{SC} = 4.3$  km/s) の下、イベントの時系列データを空間変化に焼き直して、パワースペクトルを求めた
- ベキ指数の142イベントの平均値は1.45 ( $5/3 = 1.67$ )
- 磁場も同様
- コルモゴロフの5/3乗則が得られた。一様乱流状態？

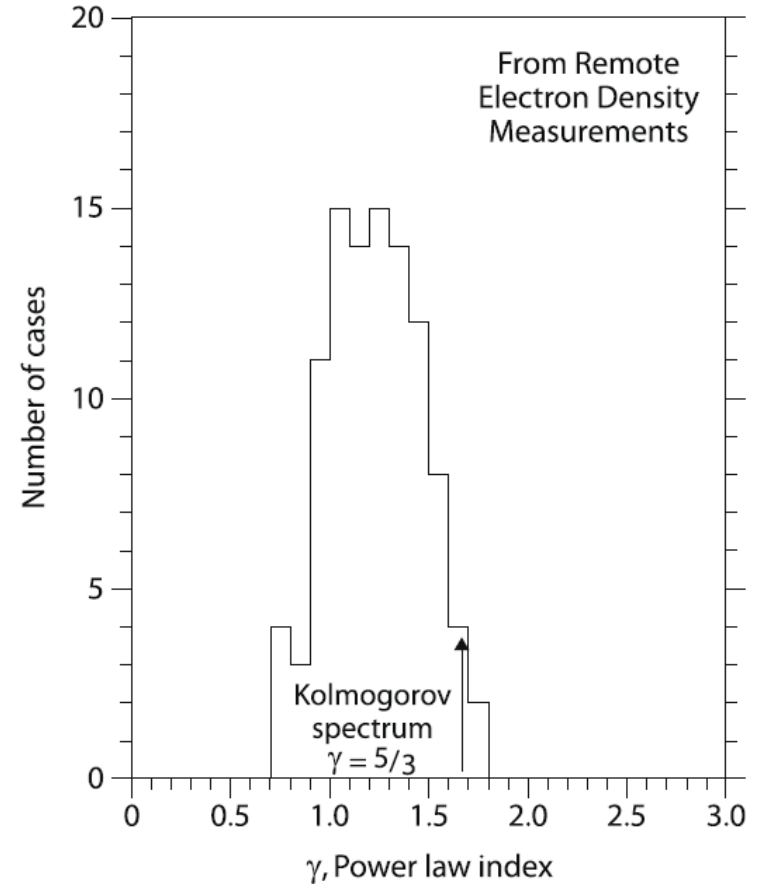
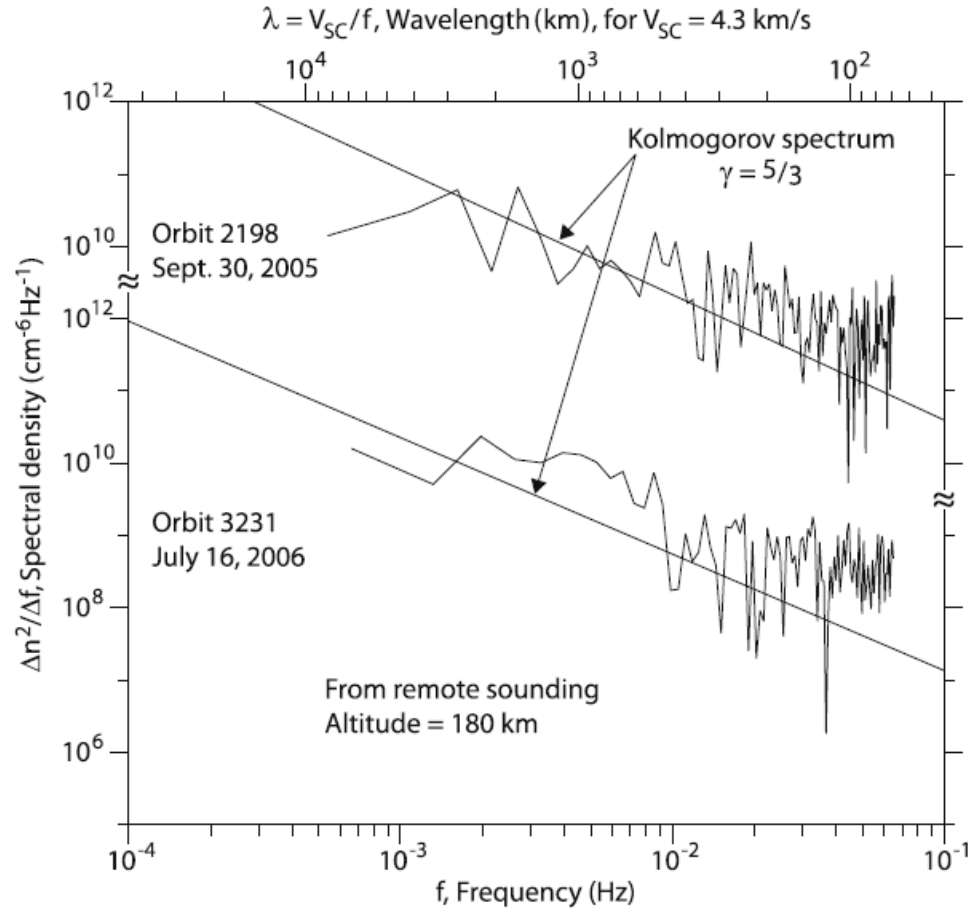


# Local vs. Remote



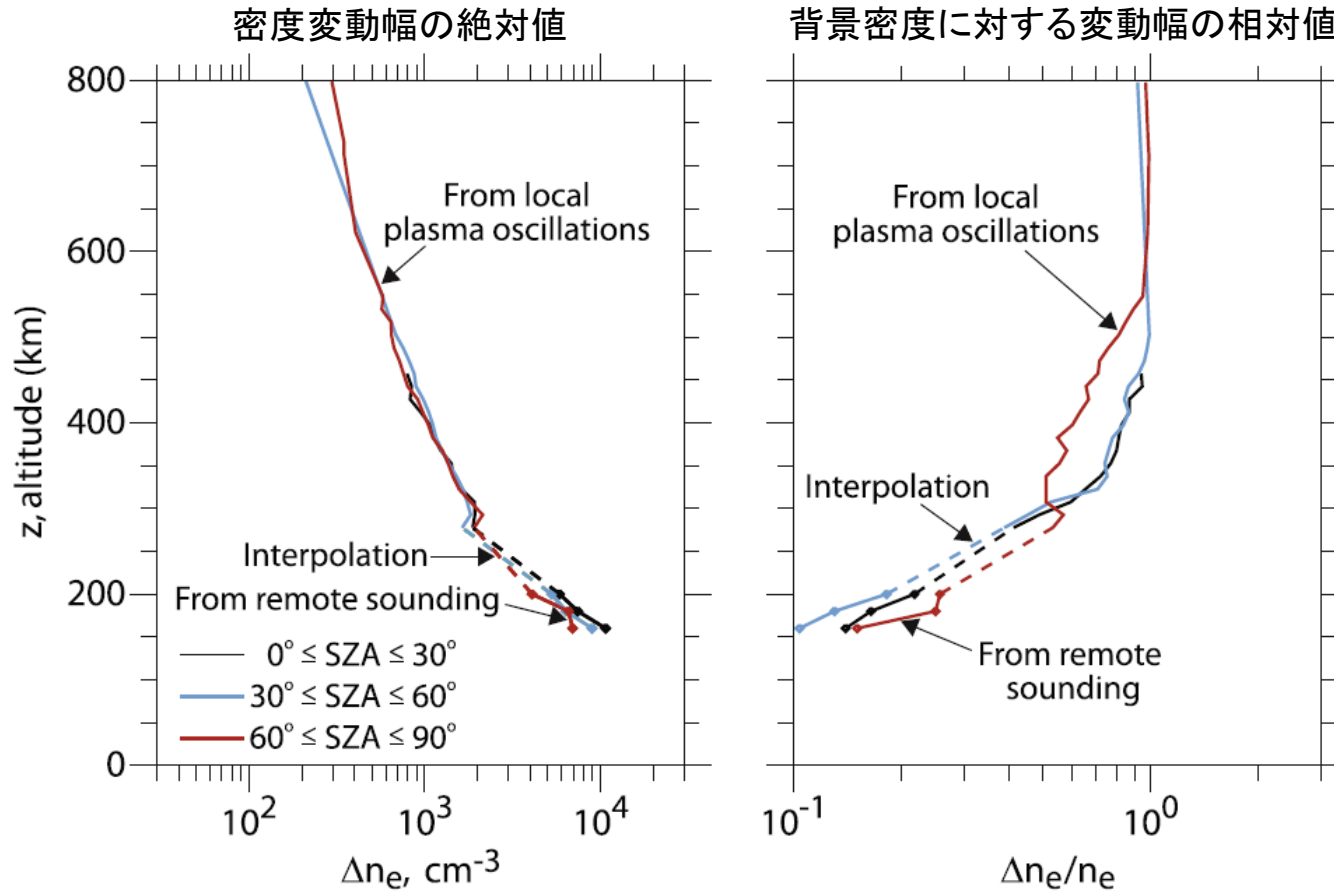
- 高度180~220kmにおいても、密度変動が有意（特に左図）
- その場観測（>300km）との相関は低い
- 高度差が大きいほど（180と220km）、相関は低い
- 電子密度ピーク位置が鉛直方向に大きく運動（~±10km）
- 地形や残留磁場との関係はなさそう（一番下のパネル）

# パワースペクトル (高度180km)



- 5/3乗則に近い結果が得られたが、高周波（短波長）領域において平坦なプロファイルになる
- 遅延時間計測の観測限界による、ノイズの影響が大
- その結果、平均的なベキ指数は1.23とやや小さめ（ベキがハード）

# 密度変動幅の高度依存性



- 太陽天頂角 (SZA) による依存性はない
- 電子密度の変動幅自体は高度と共に減少する
- 一方、背景密度に対する変動幅は増大する
- 前者は、密度変動の成因が低高度領域にあることを示唆し、後者の結果は、その成因が上層部にあることを示唆する → 議論へ

# 議論

## 密度擾乱の成因は？

Solar wind disturbances



- ~~Solar wind fluctuations~~
- the mirror-mode instability
- the Kelvin-Helmholtz instability



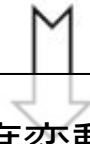
Ionosphere



MHD waves



MHD waves

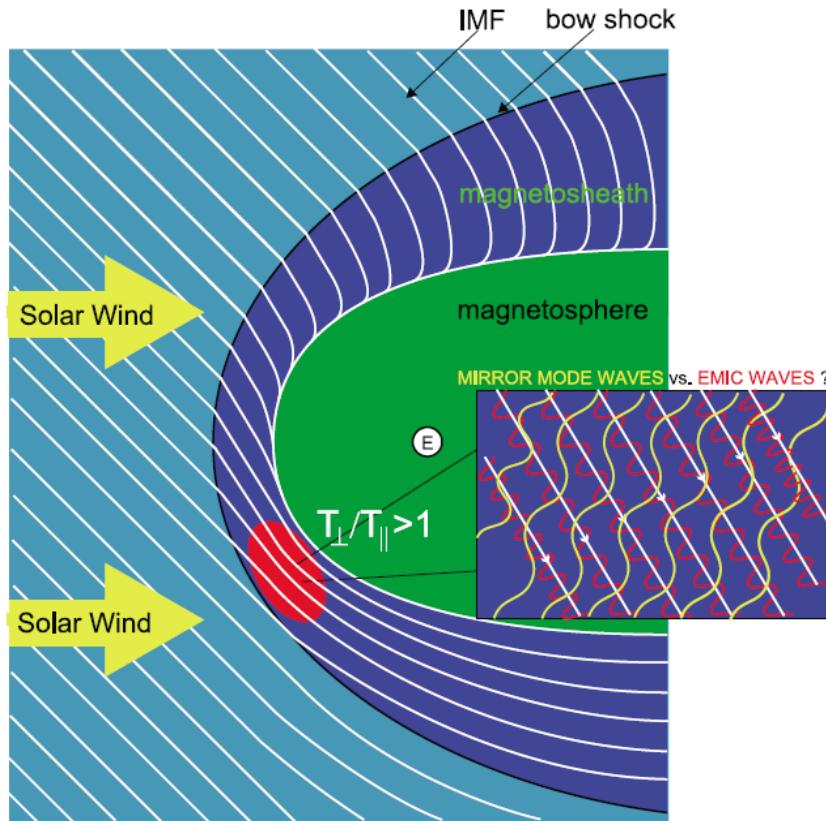


密度変動が観測される領域は、地形が緩やかで残留磁化が小さい、北半球が主である

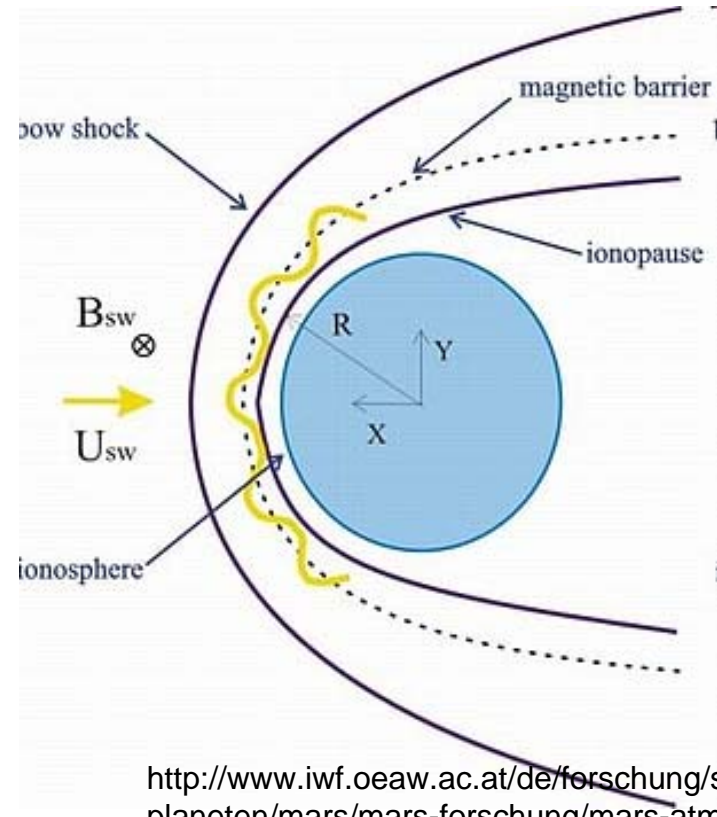
# Mirror-mode and Kelvin-Helmholtz instabilities

衝撃波下流で生じる温度異方性による不安定性

太陽風と電離圏との速度シアによる不安定性



Shoji et al., 2009



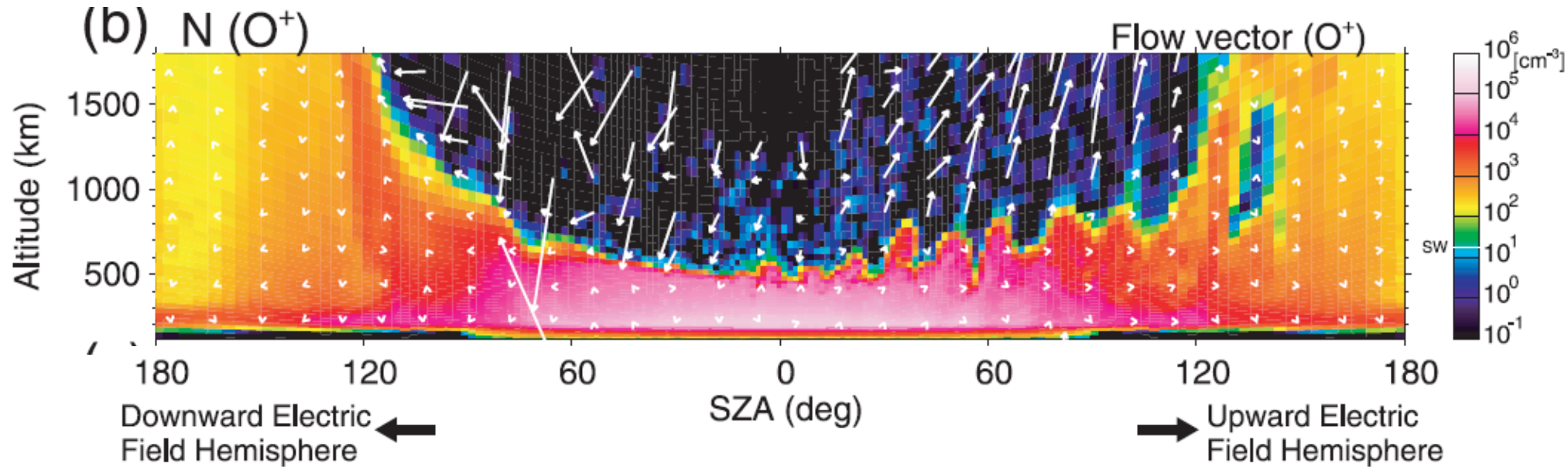
<http://www.iwf.oeaw.ac.at/de/forschung/sonnensystem/planeten/mars/mars-forschung/mars-atmosphaere/ion-loss-on-mars.html> より

**k** is nearly perpendicular to **B**  
 $n$  と  $B$  は反相関  
 slow mode

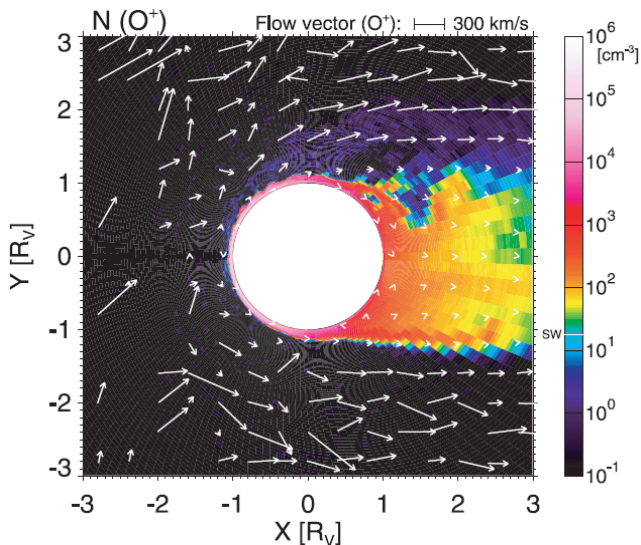
Most unstable when **k** is perp. to **B**  
 $n$  と  $B$  は相関  
 fast mode



# Kelvin-Helmholtz instability and SZA



Terada et al., 2002



- 密度擾乱のSZA依存性が少ないことから、論文ではKH不安定の可能性について、やや弱気な議論
- Terada et al.のハイブリッドシミュレーションでは、 $0 < \text{SZA} < 30^\circ$ 付近でも波状構造が見られる。



# 雑感

- 乱流スペクトルは疑問
- むしろ、100秒 (0.01 Hz) 付近に特徴的な振動のピークがある→KH不安定の特徴的時間スケール
- 磁場と密度変動は反相関にも見える→Mirror-mode不安定？
- SZAに強い依存性がないのと、太陽風を起源を強く主張する理由について議論が必要

# References

- Duru et al., “Electron densities in the upper ionosphere of Mars from the excitation of electron plasma oscillations”, *J. Geophys. Res.*, 113, A07302, 2008.
- Gurnett et al., “Radar Soundings of the Ionosphere of Mars”, *Science*, 310, 1929-1933, 2005.
- Gurnett et al., “An overview of radar soundings of the martian ionosphere from the Mars Express spacecraft”, *Adv. Space Res.*, 41, 1335-1346, 2008.
- Gurnett et al., “Large density fluctuations in the martian ionosphere as observed by the Mars Express radar sounder”, *Icarus*, 206, 83-94, 2010.
- Hinson et al., “Radio occultation measurements of forced atmospheric waves on Mars”, *J. Geophys. Res.*, 106, 1463-1480, 2001.
- Noguchi et al., “Radio-occultation projects in space programs of Japan”, *Radio Science Bulletin*, 27-31, 2002.
- Patzold et al., “A Sporadic Third Layer in the Ionosphere of Mars”, *Science*, 310, 2005.
- Shoji et al., “Mirror instability and L-mode electromagnetic ion cyclotron instability: Competition in the Earth’s magnetosheath”, *J. Geophys. Res.*, 114, A10203, 2009.
- Terada et al., “Global hybrid simulation of the Kelvin–Helmholtz instability at the Venus ionopause”, *J. Geophys. Res.*, 107, 1471, 2002.