



Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) Mission

Hara+ [2015],
Estimation of the spatial structure of
a detached magnetic flux rope at Mars
based on simultaneous MAVEN plasma and
magnetic field observations

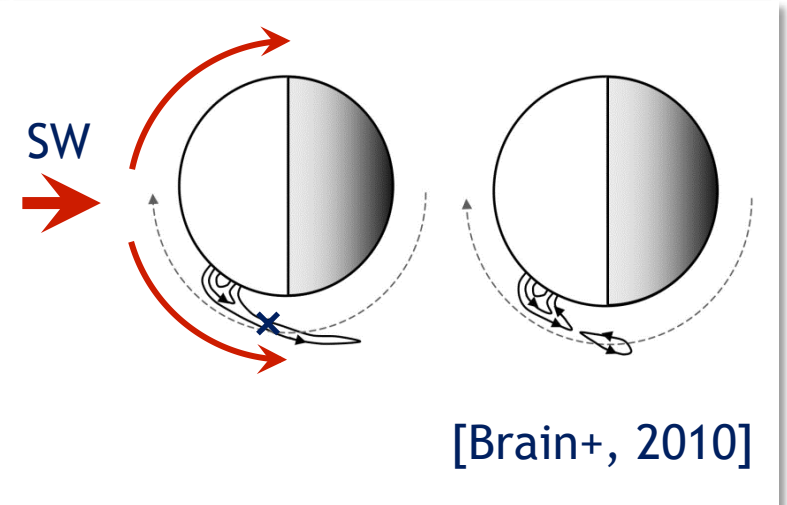
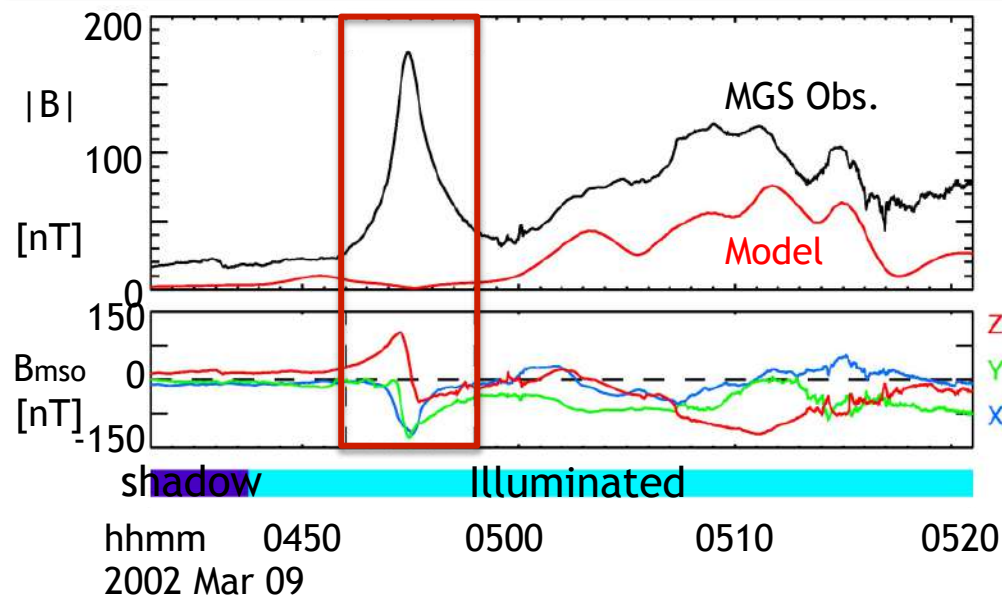
Geophys. Res. Lett., 42, 8933-8941,
doi:10.1002/2015GL065720.

原 拓也 (UCB-SSL)

- MAVENに搭載されたプラズマ観測機器群(イオン・電子・磁場)のデータを総合的に用いて、火星誘導磁気圏近傍で観測された磁気フラックスロープの特徴について調べた。
- フラックスロープを横切った際、観測されたイオン種が太陽風(磁気圏シース)起源の粒子(H^+ , He^{++})から惑星起源の重イオン(O^+ , O_2^+)に変化した。
- 報告されたイベントは、強い残留磁化の下流で観測された。
- Grad-Shafranov(GS)方程式に基づいて、衛星のその場(1点)観測データから磁気フラックスロープの2次元空間構造を推定する。
- CMEに起因する小規模な擾乱構造が火星に到達した数時間後にイベントが観測されたため、このようなCMEに伴う太陽風動圧・磁場強度の増大が今回報告したフラックスロープの形成に何らかの影響を与えた可能性がある。

磁気フラックスロープ

- 磁気フラックスロープは螺旋状をした特徴的な磁場構造で、宇宙空間の様々なところで観測されている。
- これまでに非磁化惑星である火星でもフラックスロープが観測されてきた [e.g., Cloutier+, 1999; Vignes+, 2004].
- 火星ではIMFと残留磁化のいずれもフラックスロープの起源になる可能性がある[e.g., Brain+, 2010; Briggs+, 2011].
- 惑星起源イオンが含まれていた場合、惑星から引きちぎられたフラックスロープはイオン流出に寄与する。



Grad-Shafranov再現法(GSR)

- Grad-Shafranov方程式に基づいて，衛星の1点観測データからフラックスロープの2次元構造を再現する.

- 仮定：

- magneto-hydrostatic static:

$$\cancel{\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}} + \cancel{\rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}} = \vec{j} \times \vec{B} - \nabla p \quad \vec{j} \times \vec{B} = \nabla p$$

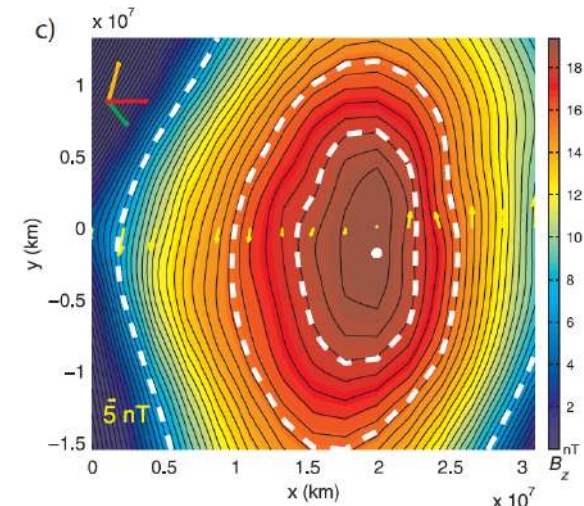
- 構造が2次元的: $\partial/\partial z = 0$

- Grad-Shafranov 方程式：

[e.g., Sturrock, 1994]

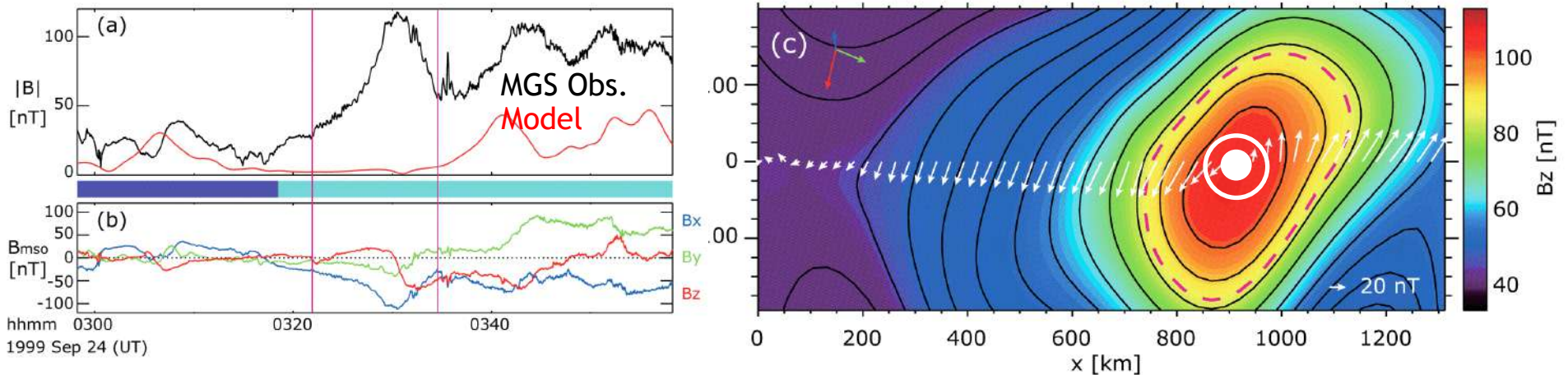
$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu_0 \frac{dP_t}{dA} = -\mu_0 j_z(A)$$

$$\begin{aligned} A &= A_z \\ \vec{B} &= [\partial A / \partial y, -\partial A / \partial x, B_z(A)] \\ P_t &= (p + B_z^2 / 2\mu_0) \end{aligned}$$



(Ex.) Magnetic cloud
[Hu and Sonnerup, 2002].

過去の再現成功例(MGS) [Hara+, 2014a, b]



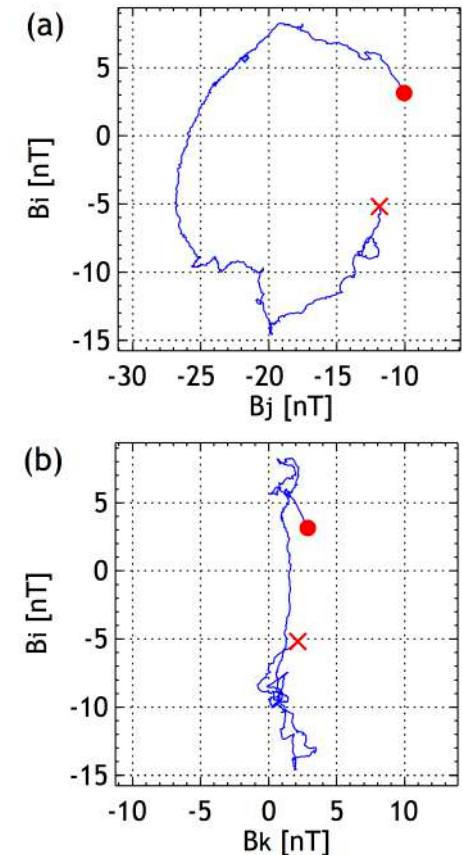
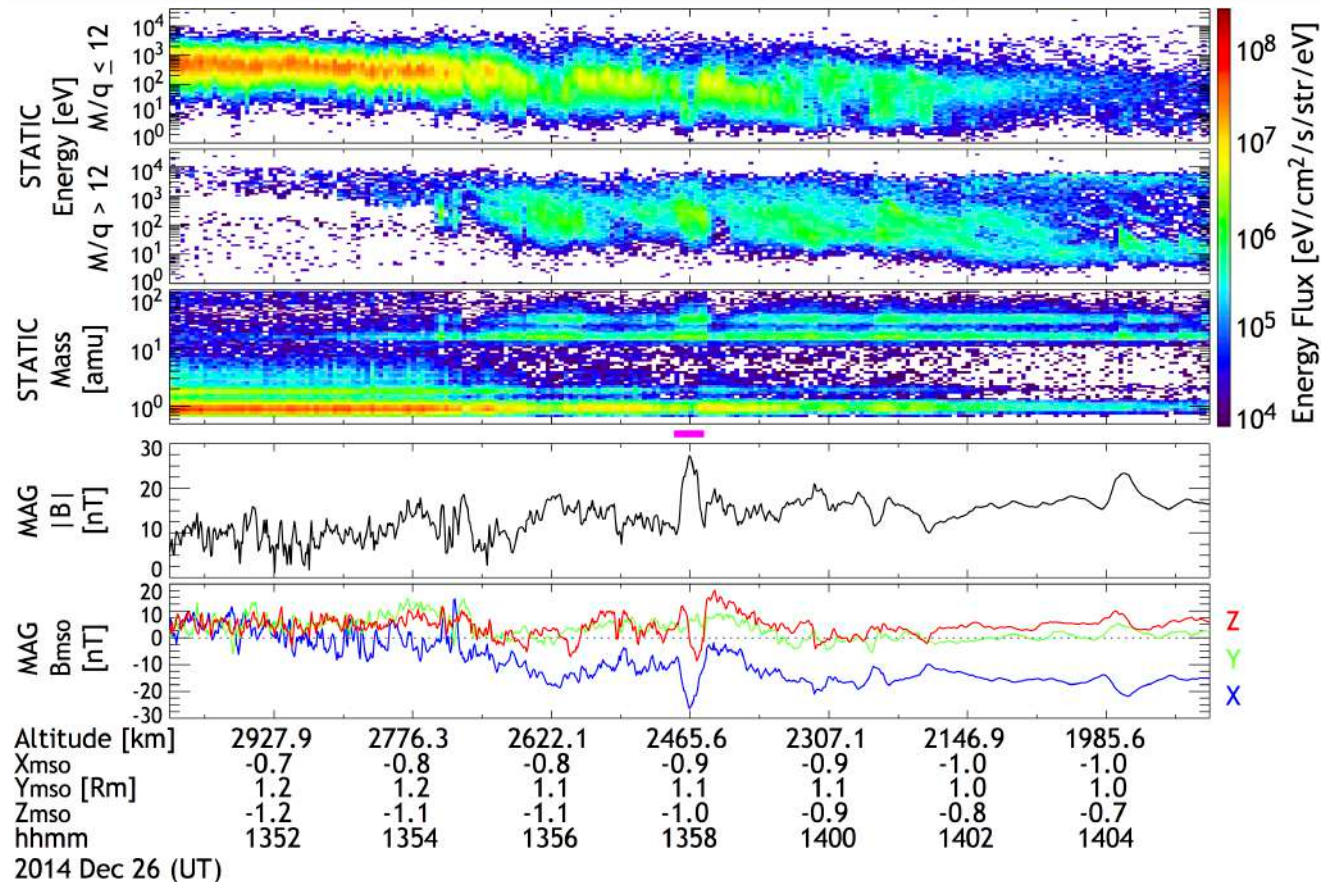
推定結果:

- 半径: 163.1 km, 軸方向の長さ: 341.1 km.
 - MSO座標系における軸の向き: $[-0.94, -0.09, -0.33]$.
- 従来のMGSによる観測では、イオン計測器が搭載されていないため、フラックスロープに封入された電離圏イオン密度を直接推定することができなかった。

本研究の目的:

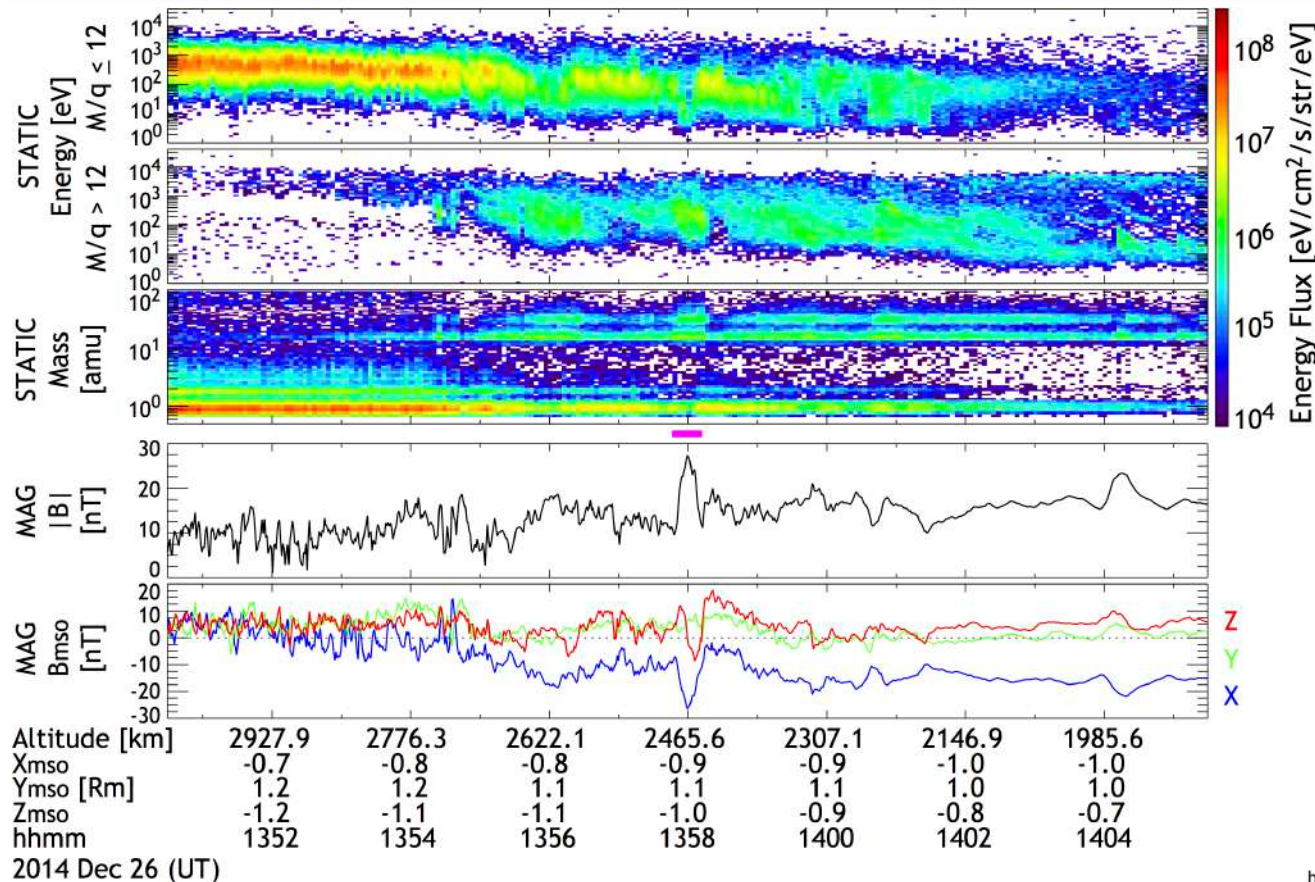
- MAVENによるプラズマ・電磁場の総合観測に基づいて、火星フラックスロープの空間構造の特徴をGS再現法を使って調べる。

MAVENによって観測された 火星磁気フラックスロープ

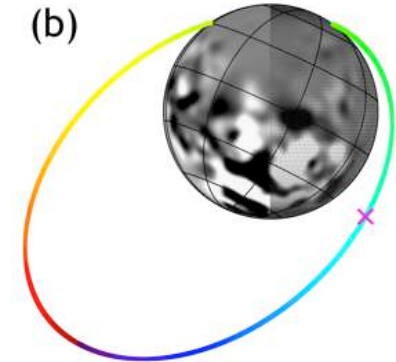


- シースから誘導磁気圏を通過する際にイベントが観測される。
- 複数種の惑星起源イオン(H^+ , O^+ , O_2^+)が含まれている。
- 宇宙空間に流出するのに十分なエネルギーを観測されたイオンは持っている。

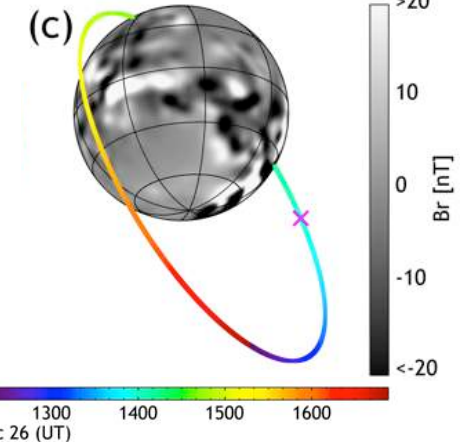
MAVENによって観測された 火星磁気フラックスロープ



Viewed from Duskside



Viewed from the Sun



- 従来のMGSによる観測(高度: 400km)に比べて高い約2500kmで観測される
→ 惑星からdetachされている可能性が高い。
- 強い残留磁化の下流で観測される。

GS再現法を用いたフラックスロープの 空間構造推定: プラズマ圧の寄与



- 複数種のイオンが同時に混在したフラックスロープに対して, GS再現法を適用することは非常に稀である.
- 火星周辺で観測されたフラックスロープについて, MAVENが初めてイオンと磁場の振る舞いを直接調べることができた.
- GS再現法によって推定されたフラックスロープの形状に対するプラズマ圧 p を寄与を調べるために, GS再現法を適用するために入力するプラズマ圧の与え方を工夫してみる.
 - Case 1:
 $p = 0$ (フォースフリー近似)
 - Case 2:
 $p \neq 0$
(MAVEN/MAG観測によって得られた磁気圧と等価のプラズマ圧を与える)
 - Case 3:
 $p \neq 0$
(MAVEN/STATICによって実際に観測されたイオンの密度・温度によって計算されるプラズマ圧を与える)

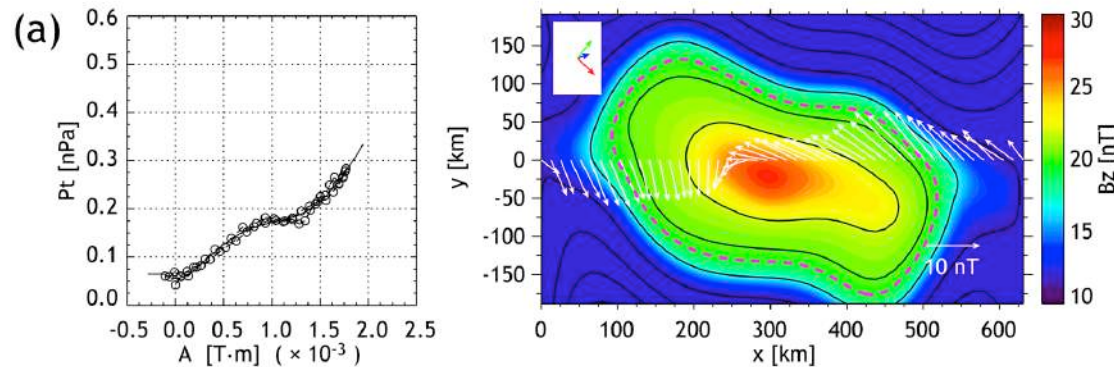
GS再現法を用いたフラックスロープの 空間構造推定: 再現結果



MAVEN 2014 Dec. 26, 13:57:50 - 13:58:10 (UT)

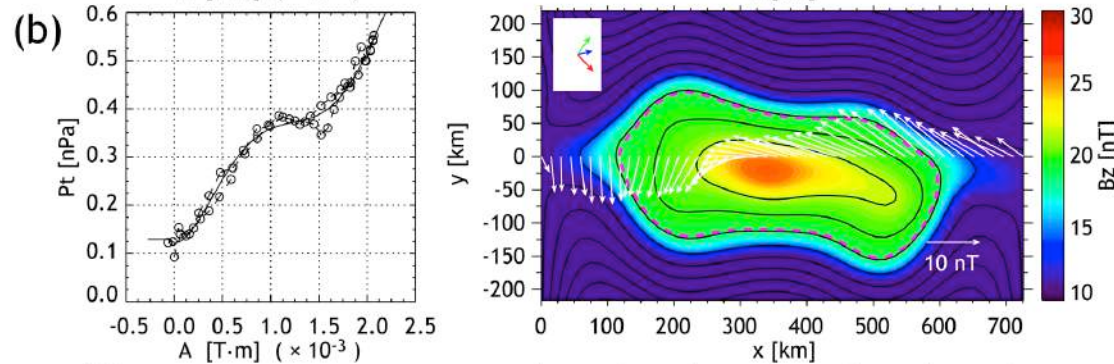
GSR Spatial Results:

Case 1



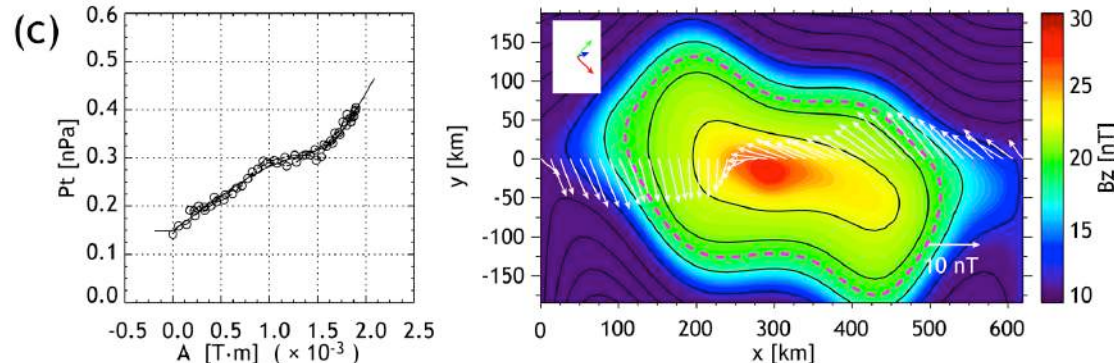
Axis:
 $[-0.91, 0.36, 0.20]$
 $r = 165.8 \text{ km}$
 $l = 373.4 \text{ km}$
 $V = 3.22 \times 10^{22} \text{ cm}^3$
 $\Phi_T = 1.88 \times 10^3 \text{ Wb}$
 $\Phi_P = 4.18 \times 10^2 \text{ Wb}$

Case 2



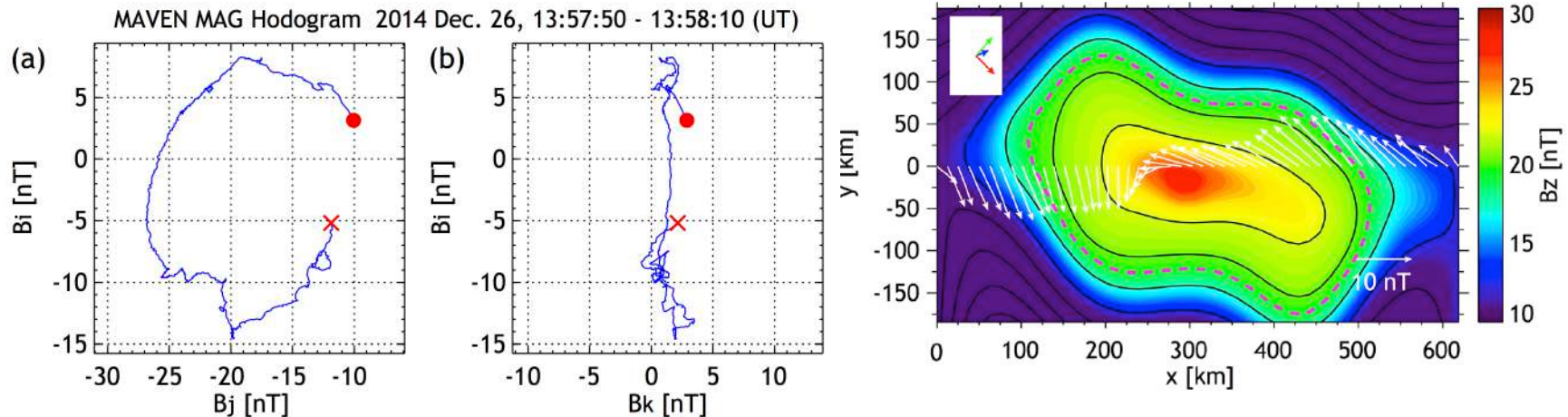
Axis:
 $[-0.83, 0.46, 0.32]$
 $r = 161.6 \text{ km}$
 $l = 302.1 \text{ km}$
 $V = 2.48 \times 10^{22} \text{ cm}^3$
 $\Phi_T = 1.72 \times 10^3 \text{ Wb}$
 $\Phi_P = 3.98 \times 10^2 \text{ Wb}$

Case 3



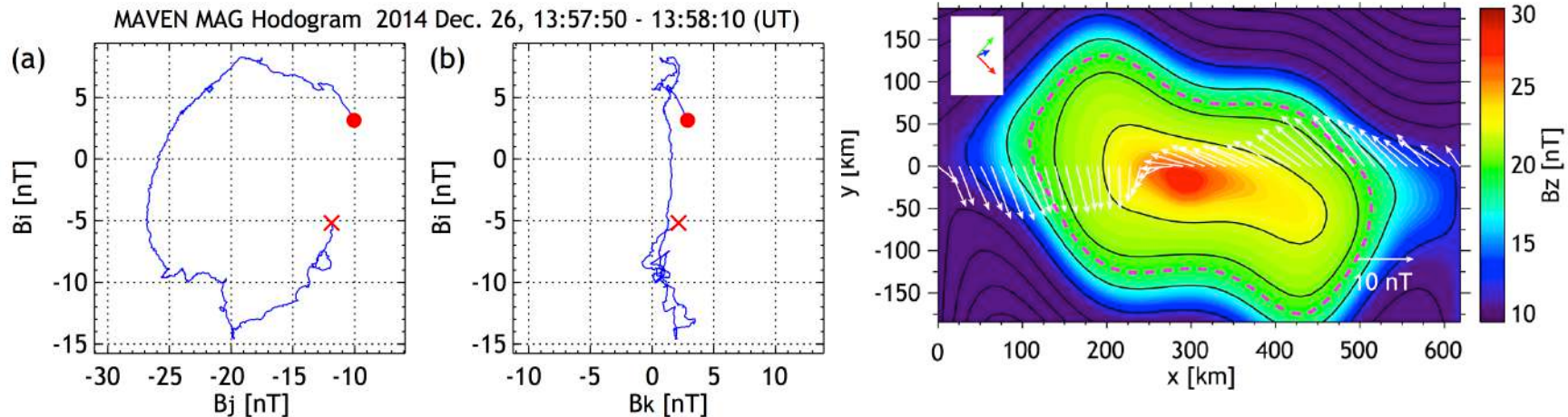
Axis:
 $[-0.92, 0.37, 0.17]$
 $r = 160.0 \text{ km}$
 $l = 368.2 \text{ km}$
 $V = 2.96 \times 10^{22} \text{ cm}^3$
 $\Phi_T = 1.76 \times 10^3 \text{ Wb}$
 $\Phi_P = 3.89 \times 10^2 \text{ Wb}$

GS再現法を用いたフラックスロープの 空間構造推定: 再現結果



- いずれもGS再現法によって磁気フラックスロープの2次元構造を一意に推定することに成功した。
- 推定された軸はほぼ-Xmsoに沿った方向で、いずれの場合もほとんど同じ方向である。
- 推定されたフラックスロープの空間スケールは、従来のMGS観測による再現結果と大差はない。
- 実際の観測データを与えたCase3の形状は、Case1に似ているため、今回のイベントではプラズマ圧の寄与は小さい。

GS再現法を用いたフラックスロープの 空間構造推定: イオン流出率の推定

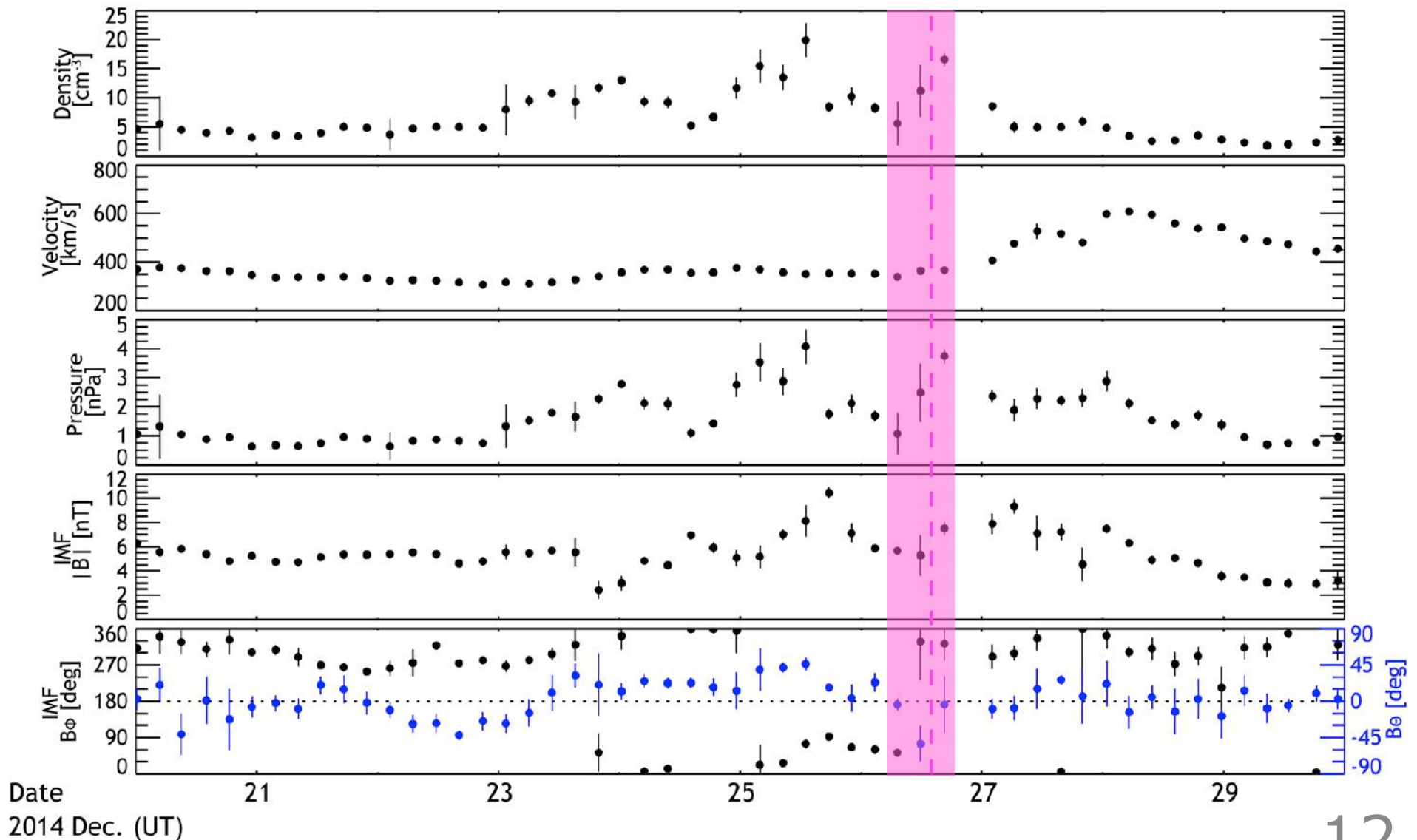


- STATICの観測で得られたフラックスロープ中でのイオン密度は,
 $H^+ 4.6 \text{ cm}^{-3}$, $O^+ 4.2 \text{ cm}^{-3}$, $O_2^+ 4.4 \text{ cm}^{-3}$.
- Case3の結果では, フラックスロープの体積は $2.96 \times 10^{22} \text{ cm}^3$
なので, ロープ中に含まれるイオンの個数は,
 $H^+ 1.36 \times 10^{23}$, $O^+ 1.23 \times 10^{23}$, $O_2^+ 1.30 \times 10^{23}$.
- 衛星がロープを横切るのに要した時間で(11.8 s), 封入された
すべてイオンが流出したと仮定した場合, イオン流出率は,
 $H^+ 1.16 \times 10^{22} \text{ s}^{-1}$, $O^+ 1.04 \times 10^{22} \text{ s}^{-1}$, $O_2^+ 1.11 \times 10^{22} \text{ s}^{-1}$
→ 瞬間的には, 全大気流出量の~1%を担う可能性がある.

上流太陽風パラメータ(1軌道平均): 2014年12月20~30日



Event: 2014-12-26/13:58(UT)

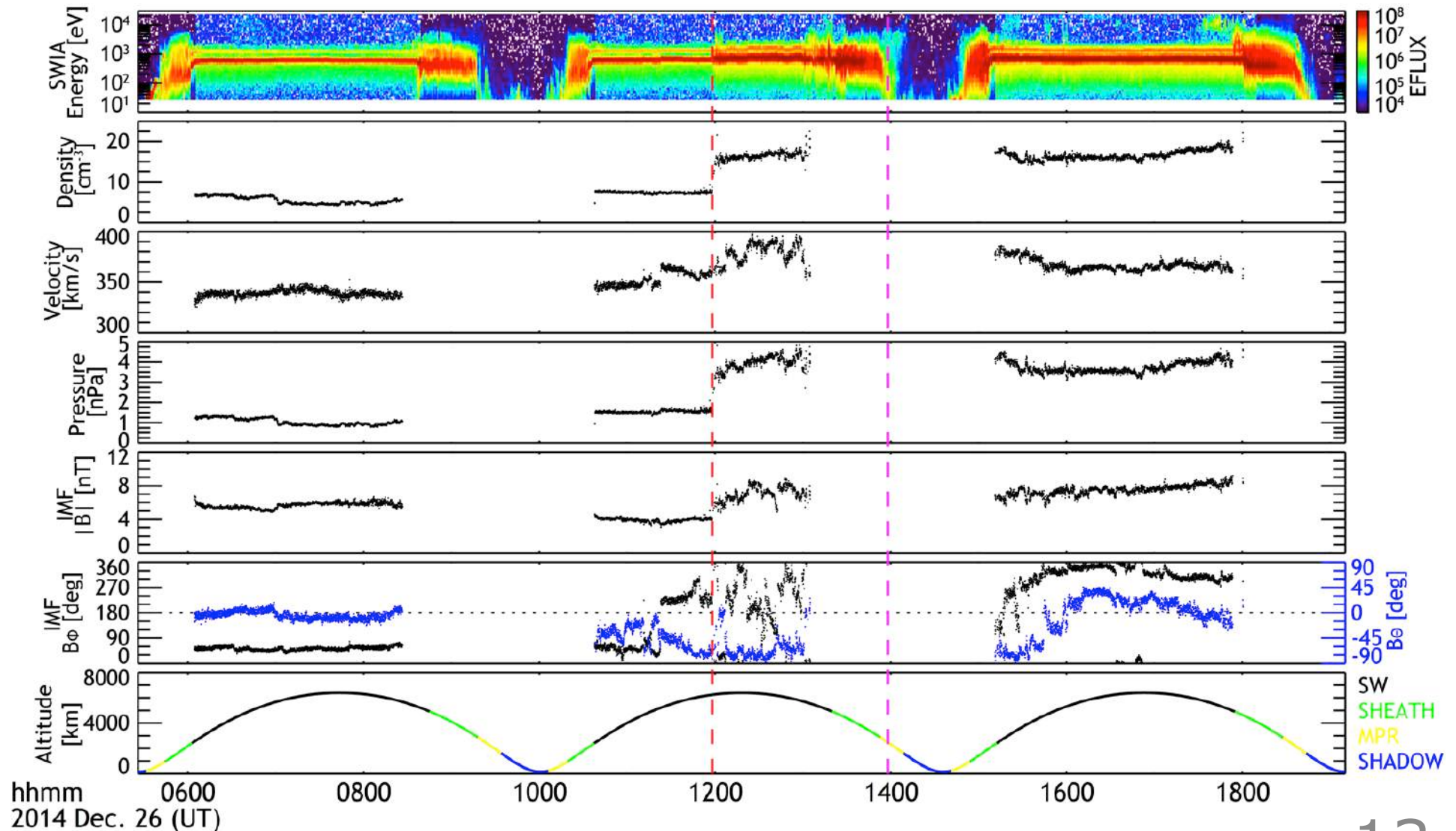


上流太陽風パラメータ: 2014年12月26日(3軌道分)



CME Shock Encounter: 2014-12-26/11:58(UT)

Event: 2014-12-26/13:58(UT)

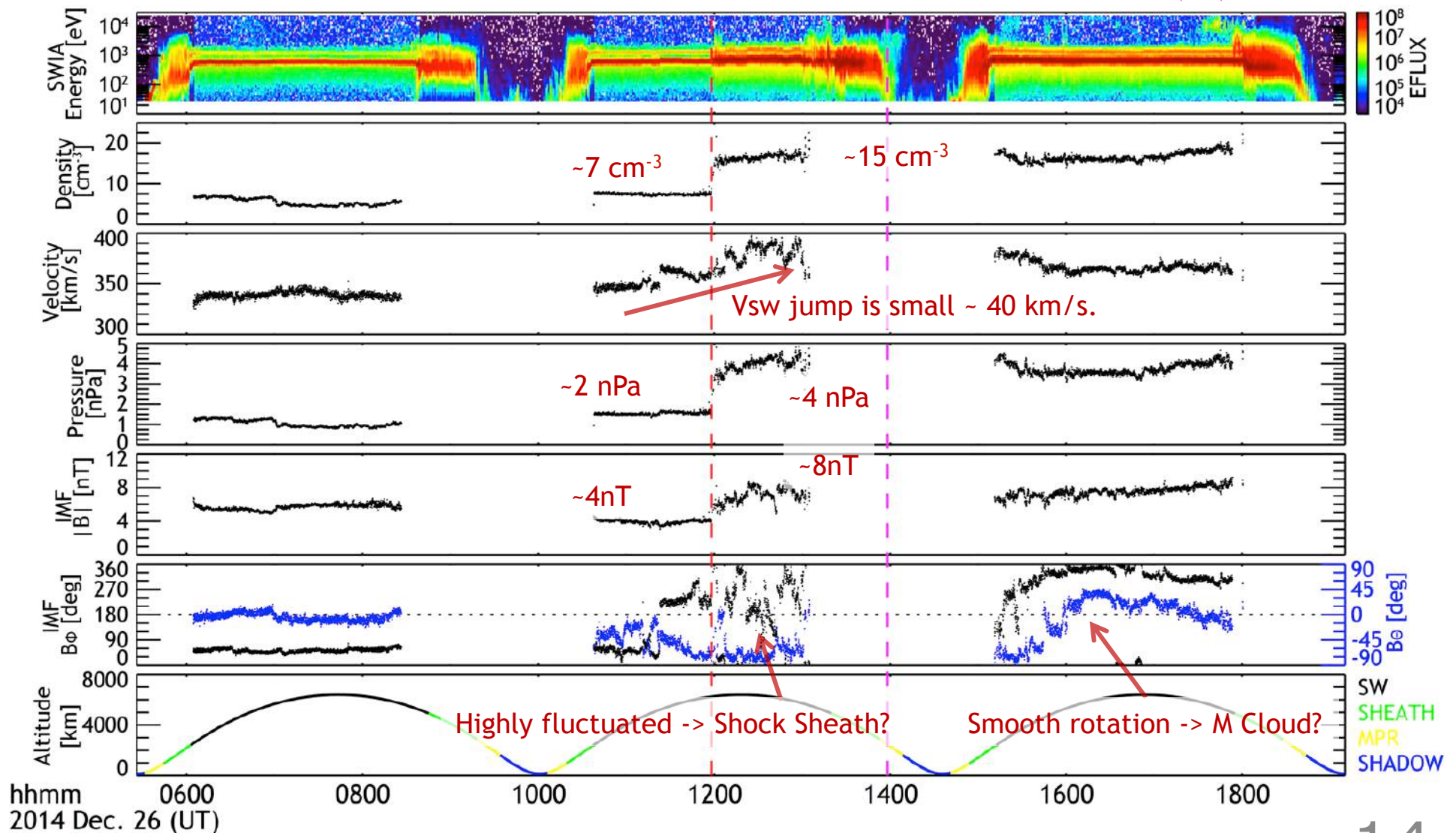


上流太陽風パラメータ: 2014年12月26日(3軌道分)



CME Shock Encounter: 2014-12-26/11:58(UT)

Event: 2014-12-26/13:58(UT)

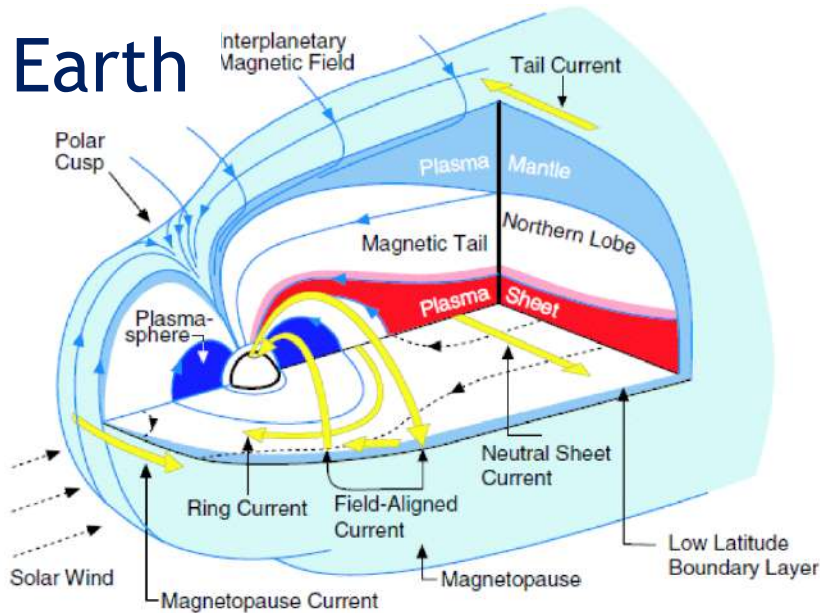


- MAVENによるプラズマ・磁場同時観測データを用いて、磁気フラックスロープの空間構造を調べた。
- 観測されたフラックスロープ中には、複数種の惑星起源イオンが存在しており、それらのイオンは宇宙空間に流出するのに十分なエネルギーを持っていた。
- 従来のMGS観測よりも高い高度~2500kmで観測され、強い残留磁化の下流に位置していた。
- GS再現法によってロープの軸の向きと形状を一意に推定することに成功した。
- 今回のイベントでは、プラズマ圧はロープの形状決定に大きな影響を与えない。
- 概算されたフラックスロープの大気流出に果たす役割としては、瞬間的に全大気流出量の~1%を担う可能性がある。
- イベントの数時間前に、CMEに伴う弱い擾乱構造が火星に到来しており、フラックスロープの形成に影響を与えた可能性がある。

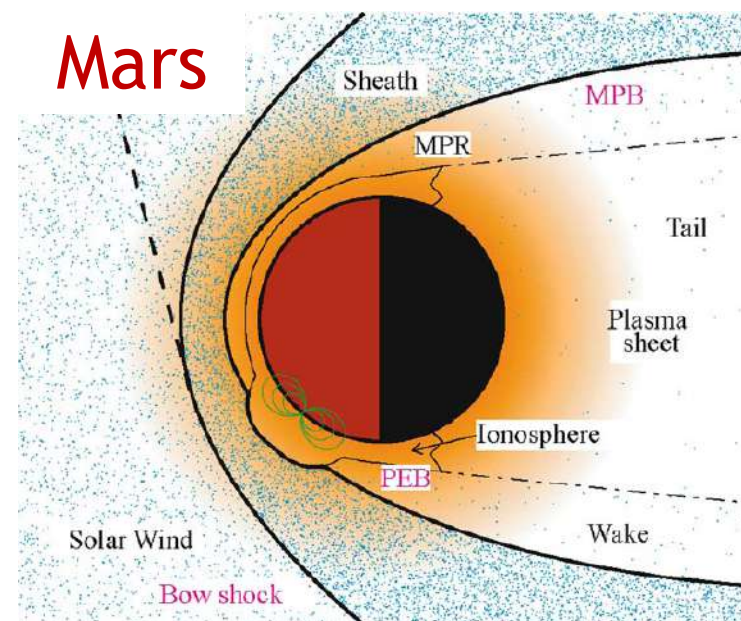
Backup & Appendix

1. Introduction:

1.1. Plasma Environment on Mars



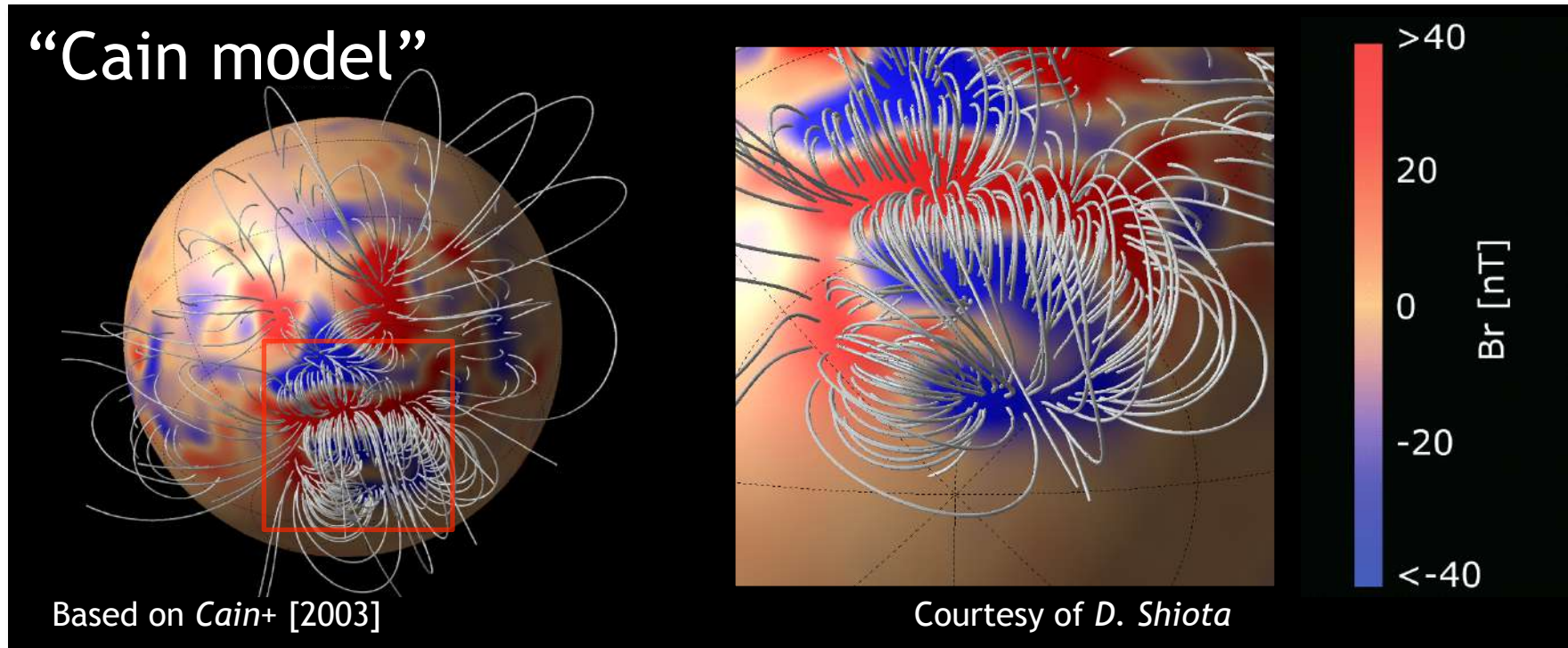
Kivelson and Russell [1995]



Brain [2006]

- Since Mars lacks a global intrinsic magnetic field, the solar wind can directly interact with Martian upper atmosphere.
- Atmospheric escape from Mars induced by the solar wind interaction has been directly observed by spacecraft missions [e.g., *Lundin+*, 1989; *Barabash+*, 2007].

1.2. Martian Crustal Magnetic Fields

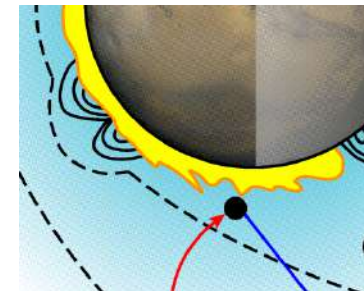
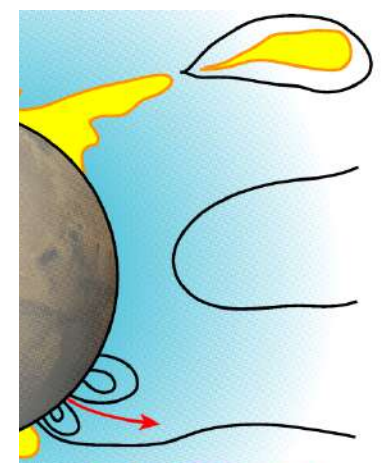


- Mars Global Surveyor (MGS) orbiter found Martian crustal magnetic fields.
- Amplitude of magnetic field attains up to ~250 nT at the altitude of 400 km [e.g., *Acuña+*, 1998, 1999].
- The crustal magnetic fields might be locally and/or globally affected the Martian plasma environment.

1.3. Role of Crustal Magnetic Fields in Atmospheric Escape from Mars

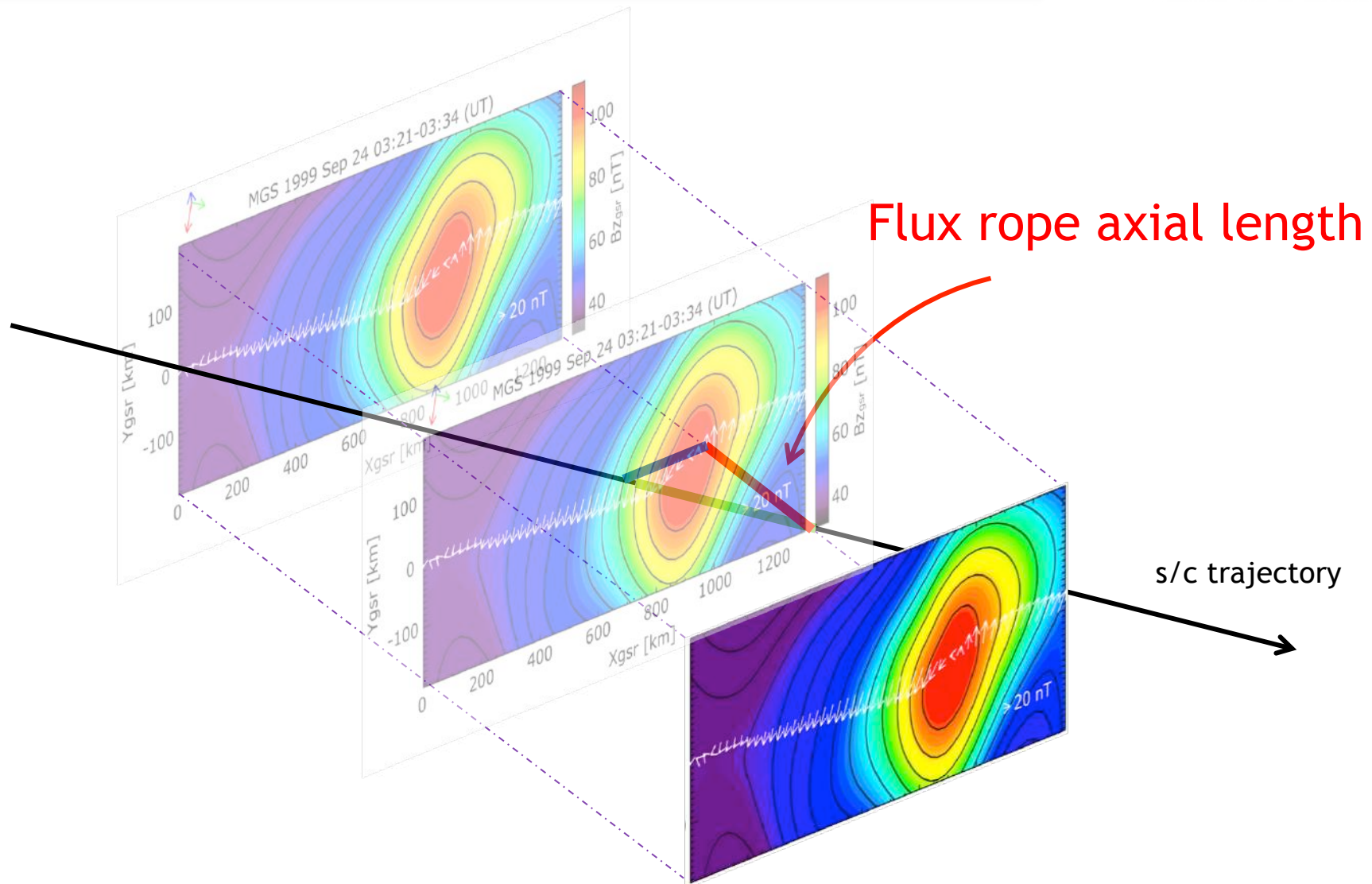


- Enhancements :
 - Auroral-like accelerations.
[Brain+, 2005; Lundin+, 2006]
 - Magnetic reconnection.
[Eastwood +, 2008; Halekas+, 2009]
 - Magnetic flux ropes (Plasma clouds)
[Brain+, 2010; Briggs+, 2011]
- Protections :
 - Mini-Magnetosphere.
[Mitchell+, 2001; Lundin+, 2011]

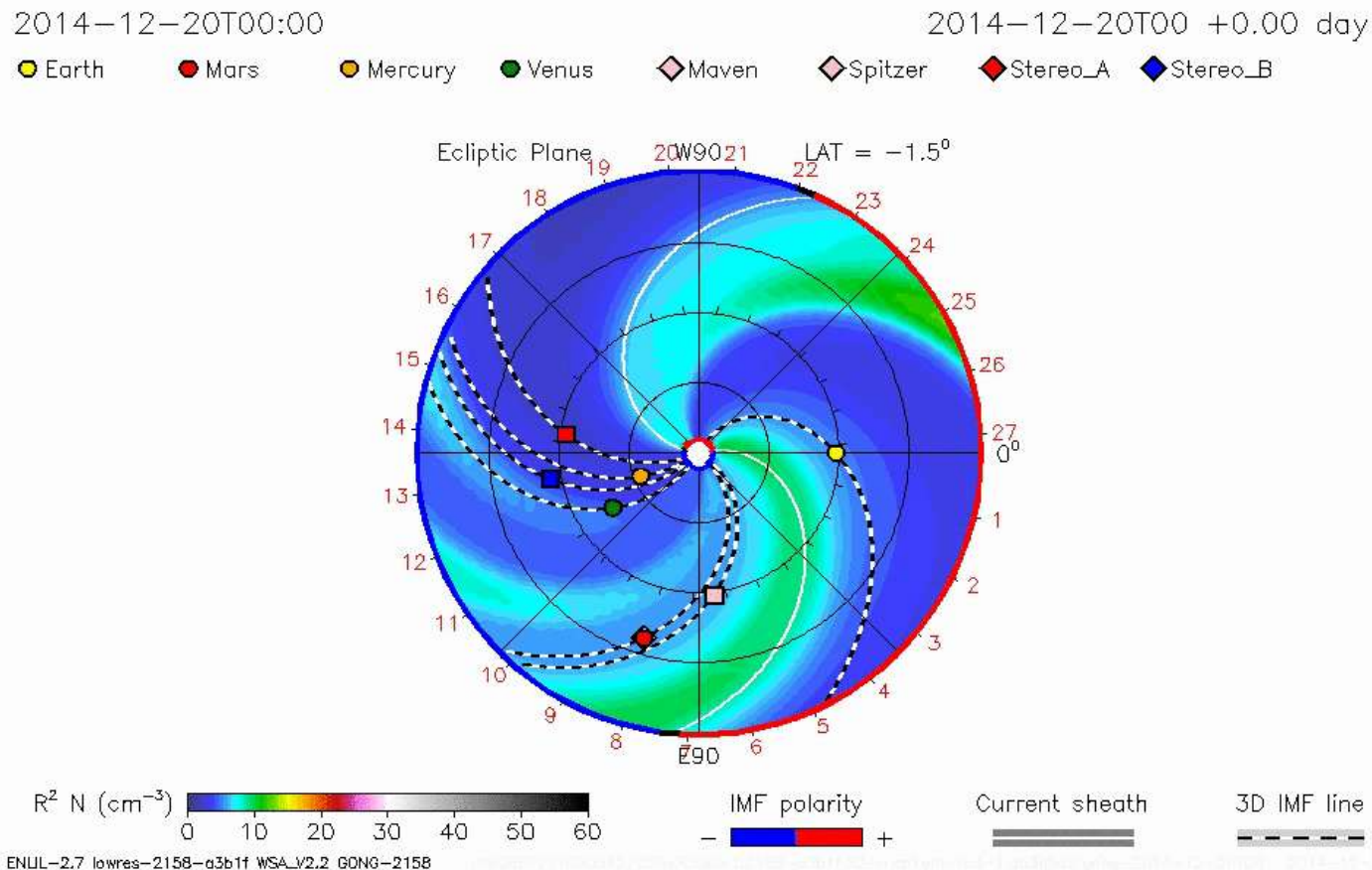


We have not determined the role of the crustal magnetic fields in the atmospheric escape from Mars yet.

軸方向の長さの推定方法



ENLIL Prediction Movie (1)



<http://iswa.ccmc.gsfc.nasa.gov/IswaSystemWebApp/StreamByDataIdServlet?allDataId=734423502>

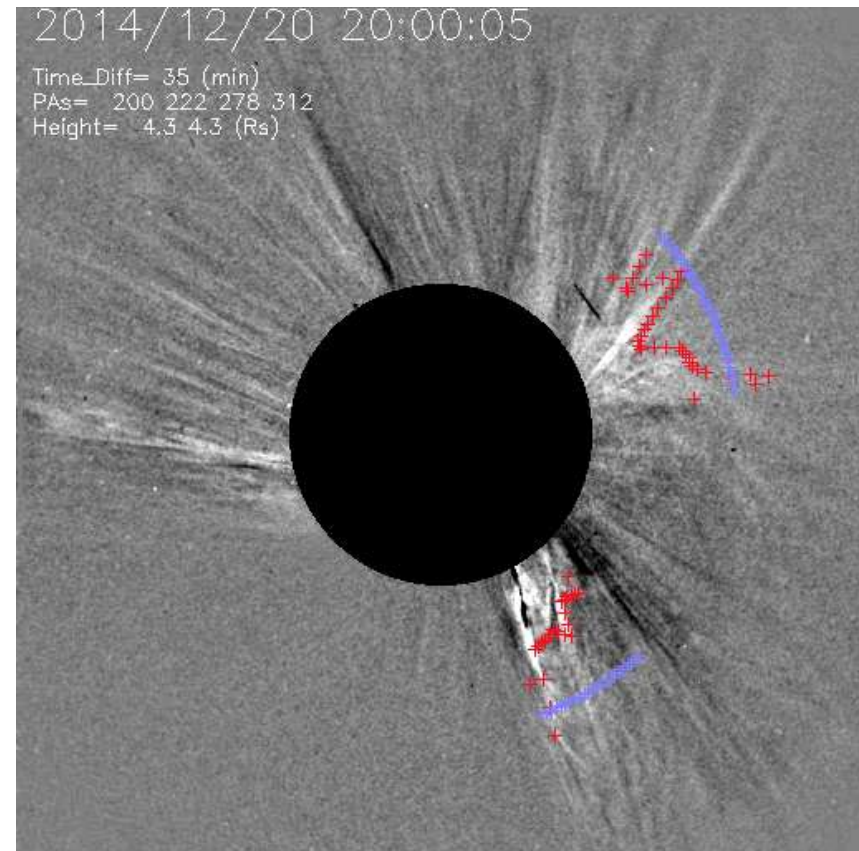
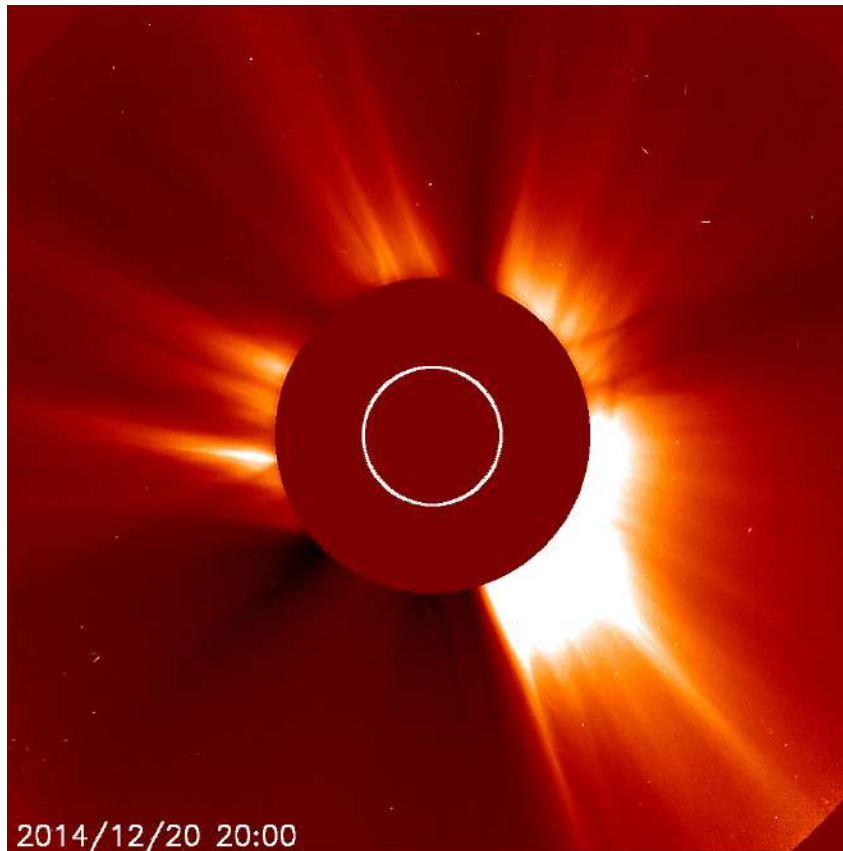
- The ENLIL solar wind model is predicted the possibility of a weak CME arrival at Mars on December 26th.

ENLIL Prediction Movie (2)



http://spaceweather.gmu.edu/projects/enlil/archive/2014/12/vel1r2o4b_201412.mp4

SOHO/LASCO C2 Movies



<http://spaceweather.gmu.edu/seeds/mkmovie.php?cme=20141221.012553.w087.v0276.p079&frame=16>

- SOHO/LASCO detected a correspondent CME on December 21st ~01:25(UT).