

**Rosetta and Mars Express
observations of the influence of
high solar wind pressure on the
Martian plasma environment**
Edberg et al. [2009, Ann. Geophys.]

名古屋大学 太陽地球環境研究所
M2 原 拓也

要旨

- 2007/02/25--27日にかけて彗星探査機Rosettaが火星フライバイを行った。
- MEX+Rosettaという(新たな)多地点観測が実現
- 太陽風条件として, P_{dyn} が高い構造が到来
 - plasma boundary asymmetry が発生
 - 要因を 1.IMF(θ_{BN}), 2. E_{conv} , 3.MA から議論
- P_{dyn} が高いときに特徴的な重イオンの流出が観測
 - 流出メカニズム
 - 流出とplasma boundary asymmetryとの関係性を議論
- 観測事実から推測されるplasma boundary asymmetryが生じるまでのシナリオを提唱

Martian plasma boundary

BS, MPBの位置を決定するための
パラメータ：

➤ IMF

[e.g., *Brain et al.*, ; 2005, *Dubinin et al.*, ; 2008]

➤ Magnetic Anomaly (MA)

[e.g., *Crider et al.*, ; 2002, *Edberg et al.*, ; 2008]

➤ solar wind dynamic pressure

[e.g., *Crider et al.*, ; 2003, *Dubinin et al.*, ; 2006]

数多くの先行研究が存在。

現状ではどの因子がどの程度寄与しているか、定量的な切り分けは難しい。

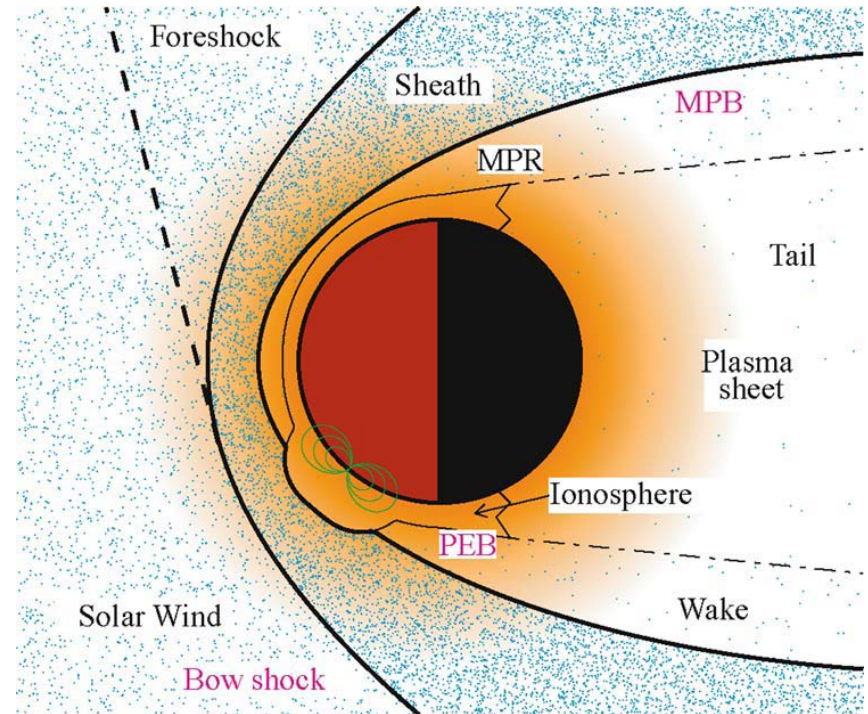


Figure 1. Cartoon of the global Martian solar wind interaction. Orange shading indicates density of planetary neutrals. Blue indicates relative density of solar wind ions in different plasma regions (labeled in black), separated by different plasma boundaries (labeled in magenta). Boundary names in this figure are those specific to MGS literature.

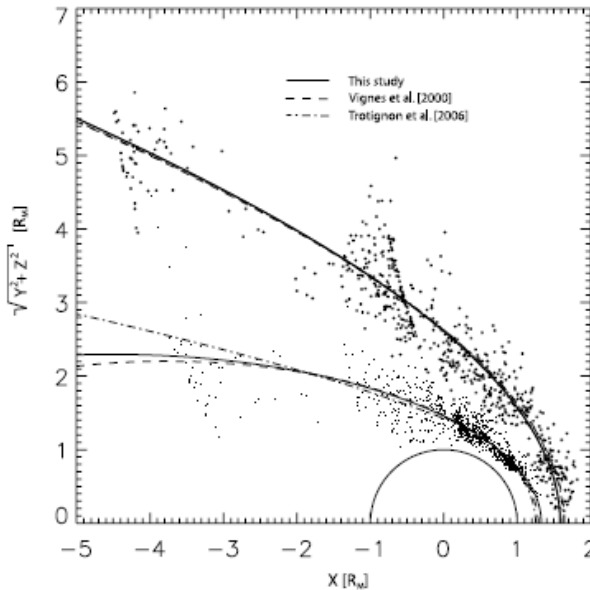
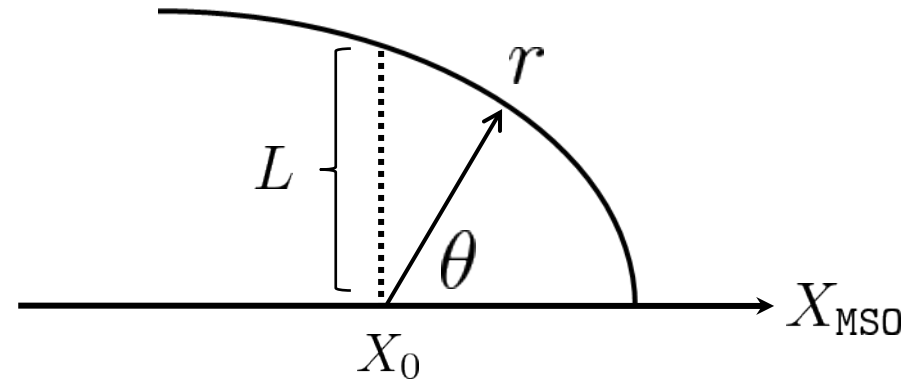
Brain et al., [2006]

Empirical model of the Martian BS & MPB

MGS, MEXの観測結果から、円錐曲線にfittingさせ、適当な X_0 , ϵ , L を求める

$$r = (X_0) + \frac{L}{1 + \epsilon \cos \theta}$$

ϵ : 離心率 L : 半直弦



MPB

Table 1. Best Fit Conic Section Parameters of the MPB From This Study as Well as From the Studies by *Vignes et al.* [2000] and *Trotignon et al.* [2006]^a

Study by	X_0 [R_M]	ϵ	L [R_M]	R_{SS} [R_M]	N
This study	0.86 ± 0.11	0.92 ± 0.03	0.90 ± 0.06	1.33 ± 0.15	993
<i>Vignes et al.</i> [2000]	0.78 ± 0.01	0.90 ± 0.01	0.96 ± 0.01	1.29 ± 0.04	488
<i>Trotignon et al.</i> [2006] ($x > 0$)	0.64 ± 0.01	0.77 ± 0.01	1.08 ± 0.03	1.25 ± 0.03	901
<i>Trotignon et al.</i> [2006] ($x < 0$)	1.60	1.009 ± 0.003	0.528 ± 0.012		901

^aN is the number of MPB crossings.

Table 2. Best Fit Conic Section Parameters for the BS Obtained in This Study, as Well as in the Studies by *Vignes et al.* [2000] and *Trotignon et al.* [2006]^a

Study by	X_0 [R_M]	ϵ	L [R_M]	R_{SS} [R_M]	N
This study	0.55 ± 0.12	1.05 ± 0.04	2.10 ± 0.09	1.58 ± 0.18	619
<i>Vignes et al.</i> [2000]	0.64 ± 0.02	1.03 ± 0.01	2.04 ± 0.02	1.64 ± 0.08	450
<i>Trotignon et al.</i> [2006]	0.6	1.026 ± 0.002	2.081 ± 0.006	1.63 ± 0.01	700

^aN is the number of BS crossings.

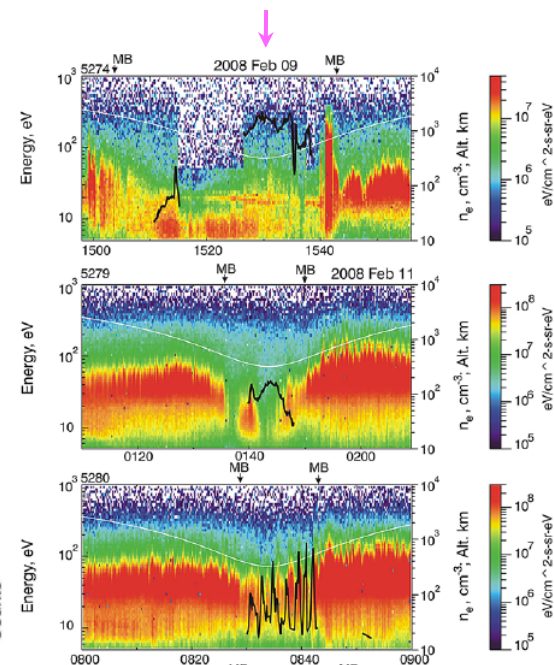
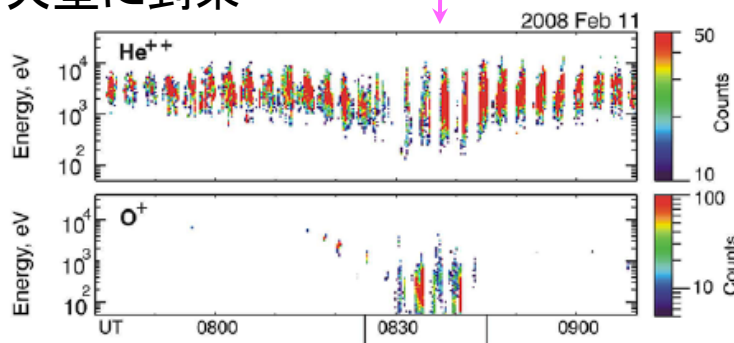
[*Vignes et al.*, ; 2000, *Trotignon et al.*, ; 2006, ***Edberg et al.*, ; 2008**]

Edberg et al., [2008]

太陽風変動(主に P_{dyn})が火星のプラズマ環境に及ぼす影響

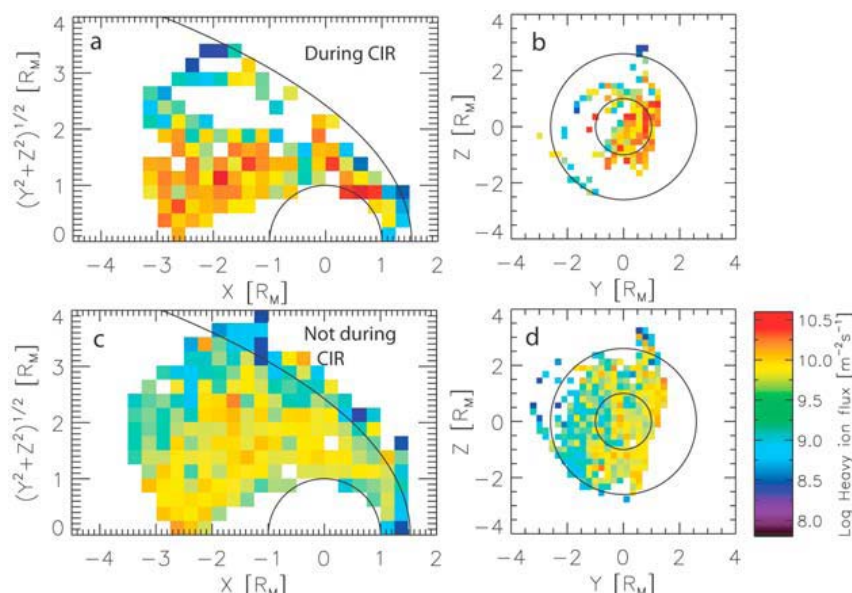
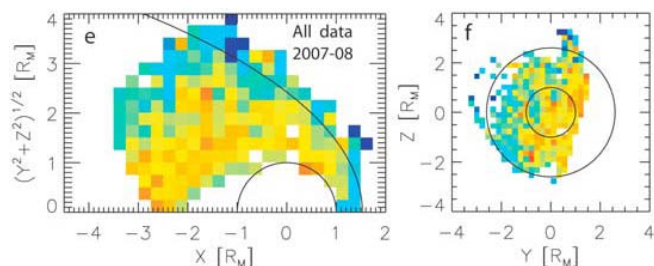
Dubinin et al., [2009]

- 2008/02にCIR構造が火星に到来
- high P_{dyn} によって、電離圏が消失
- 流出が通常の1桁増加



Edberg et al., [2010]

- 2007/07--2008/09までのMEX/ASPERA-3/IMAのdataから36個のCIRイベントを抽出し、統計解析
- 通常よりもCIR通過時は流出量が少なくとも2.5倍増



Mars Express (MEX) spacecraft

- 2003年打ち上げのESA初の惑星ミッション
- 2010年現在も運用継続中
- イオン・電子・ENAが観測できるプラズマ観測パッケージ(ASPERA-3 IMA/ELS/NPI/NPD)を搭載
- MARSISによって、ローカルな電子密度・磁場強度も観測可能
- 磁力計なし

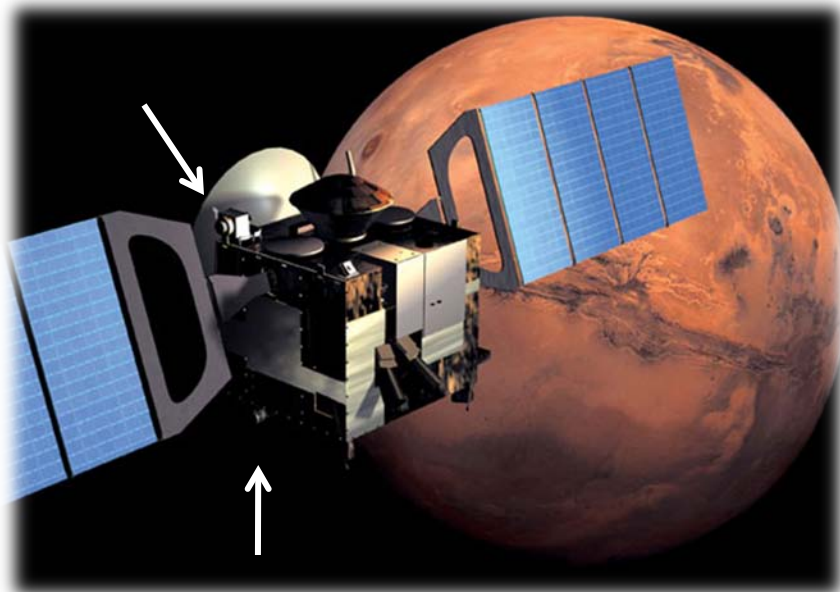


Table 3

Performance of the NPI, NPD, ELS, and IMA

Parameter	ELS	IMA
Particles to be measured	Electrons	Ions
Energy range, keV per charge	0.01–20	0.01–36
Energy resolution, $\Delta E/E$	0.08	0.07
Mass resolution	N/A	1, 2, 4, 16, 20, ..., 80 amu/ q
Intrinsic field of view	$10^\circ \times 360^\circ$	$90^\circ \times 360^\circ$
Angular resolution (FWHM)	$10^\circ \times 22.5^\circ$	$4.5^\circ \times 22.5^\circ$
G -factor/pixel, $\text{cm}^2 \text{sr}$	7×10^{-5}	3.5×10^{-4}
Efficiency, ε , %	Inc. in G	Inc. in G
Time resolution (one scan), s	32	196 ^b
Mass, kg	0.3	2.2
Power, W	0.6	3.5

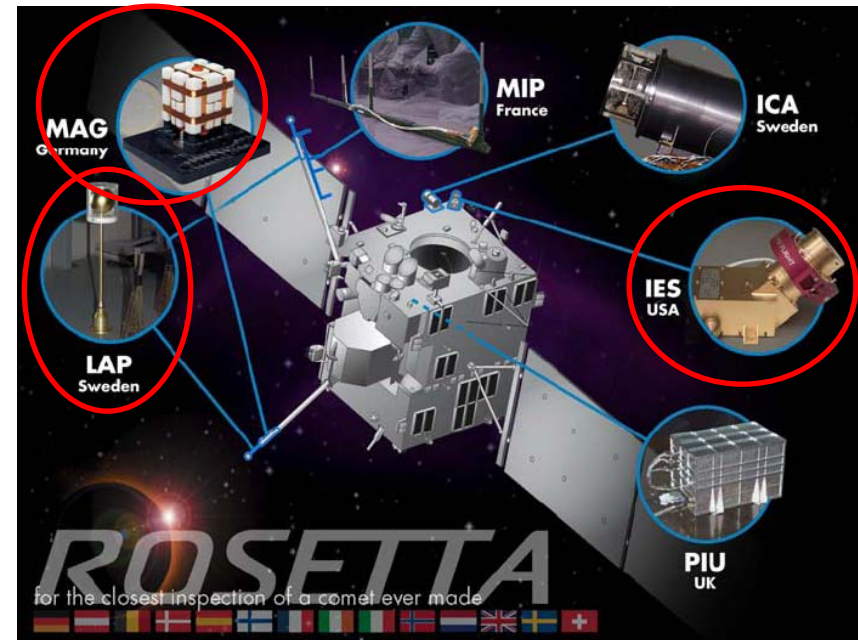
^a Upper cut-off of the deflector system.

^b Full energy–elevation scan.

Barabash and Lundin, [2006]

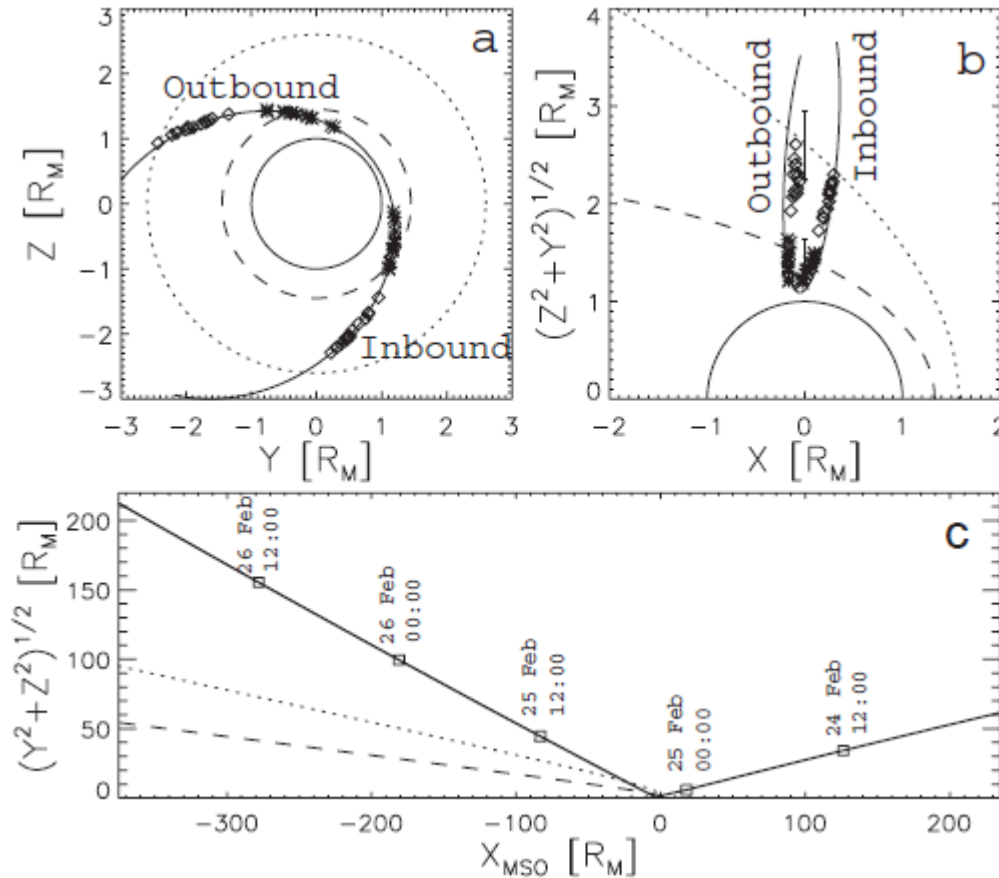
Rosetta spacecraft

- 2004年打ち上げのESAによる彗星探査機
- 観測対象はチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星
- 2014--2015年に到着予定
- 2007/02/25に火星フライバイ
- 磁力計を含んだプラズマ観測器群(RPC: Rosetta Plasma Consortium)を搭載



Instrument	Parameter	Value
Ion Electron Sensor (IES)	Energy range	1 eV/e to 22 keV/e
	Energy resolution ($\Delta E/E$)	0.04
	Field of view	$90^\circ \times 360^\circ$
	Resolution: electrons	$5^\circ \times 22.5^\circ$
	Resolution: ions (in solar wind direction)	$5^\circ \times 45^\circ$
	Temporal resolution (3D)	128 s
Langmuir Probes (LAP)	Plasma density	1 cm^{-3} to 10^6 cm^{-3}
	Electron temperature	100 K to 10^5 K
	Plasma drift velocity	to 10 km s^{-1}
	AC electric field	to 8 kHz
	Spacecraft potential	$\pm 32 \text{ V}$
Magnetometer (MAG)	Range	$\pm 16384 \text{ nT}$
	Digital resolution	31 pT
	Sampling rate	20 Hz

Orbit Configuration



MEX Orbital information ;

- Near – Polar orbit
- Pericenter : ~ 275 km
- Apocenter : ~ 100,00 km
- Period : about 6.7 hours
- Inclination : 86.3 degree

2007/02/25--27の軌道 ;

Quasi-terminator orbit

In : Southern/dusk hemisphere

Out : Northern/dawn hemisphere

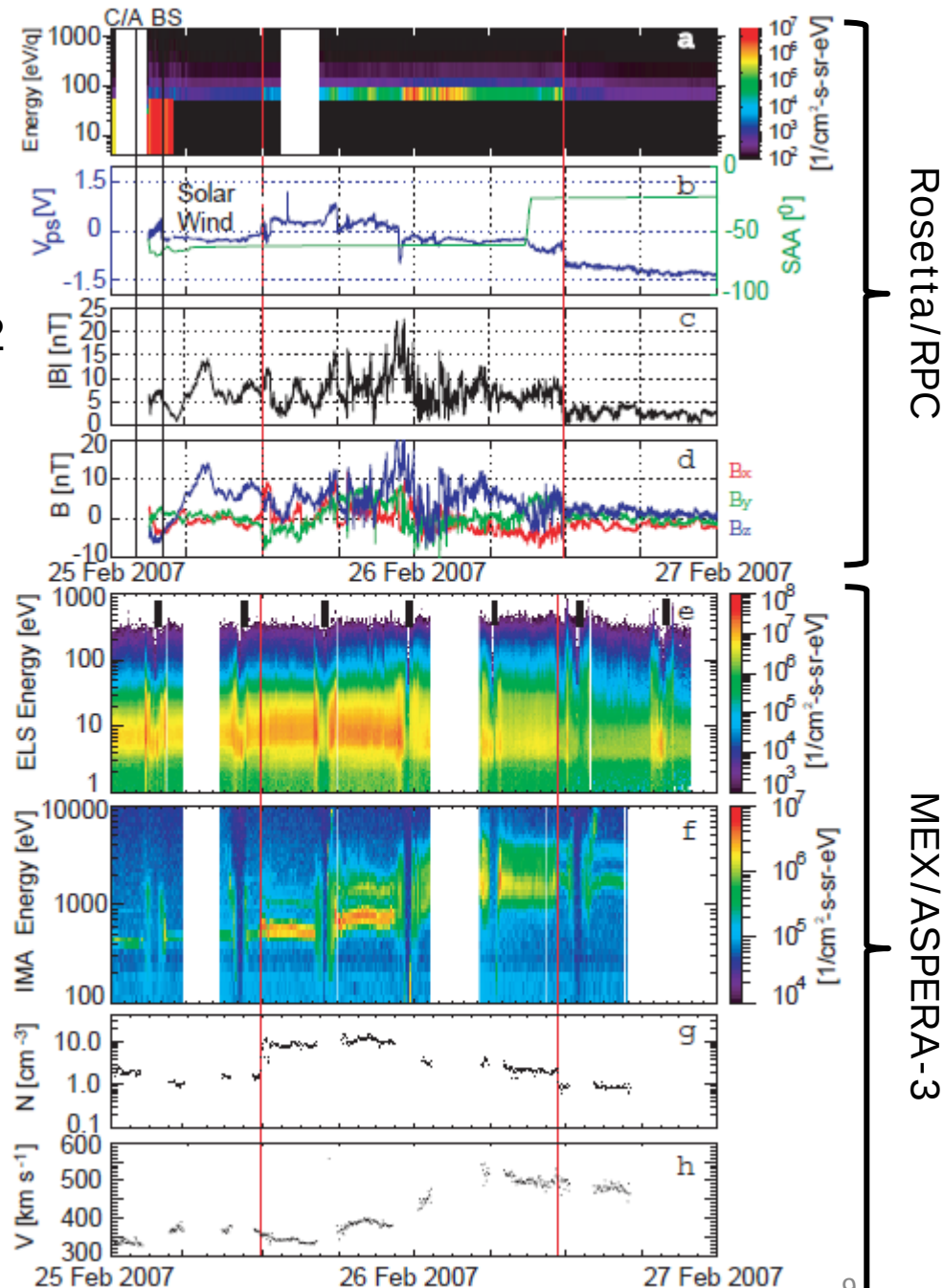


太陽風領域だけでなく, sheath・MPRを含んだ幅広い火星のプラズマ領域をカバー

Fig. 1. Boundary crossing locations and orbital geometry during the Rosetta Mars swingby. The panels show all BS (diamonds) and MPB (stars) crossings observed by MEX during 24–27 February 2007, projected onto (a) the y-z plane and (b) in cylindrical coordinates together with the average BS (dotted line) and MPB (dashed line) as well as (c) the trajectory of Rosetta in cylindrical coordinates (black solid line) together with best fits of the MPB (dashed line) and BS (dotted line) from Trotignon et al. (2006). A part of the MEX orbit is shown in panels (a) and (b) (black line). The vertical bars in panel (b) indicate the mean extrapolated terminator distance and standard deviation of the BS and MPB crossings from Edberg et al. (2008). The positions of the crossings are adjusted to account for the 4° aberrated solar wind flow caused by the orbital motion of the planet with respect to an average solar wind speed of 400 km s⁻¹.

Observation

- 2007/02/25-11:49 ~ 02/27-11:22 (赤線の間)にCIR likeな構造が火星に到来したことをMEXが観測
- Flybyを終え、火星の下流にいた Rosettaでも、
 - 60--100eVの電子フラックスの増加 (a)
 - V_{ps} (密度増加のproxy)の増加 (b)
 - 磁場強度の増大 (c)
 を観測
- MEXとRosettaの距離とCIR likeな構造が観測された時間差から求められる太陽風の伝播速度は、そのとき MEX/IMAからモーメント計算によって求められた太陽風速度とConsistent



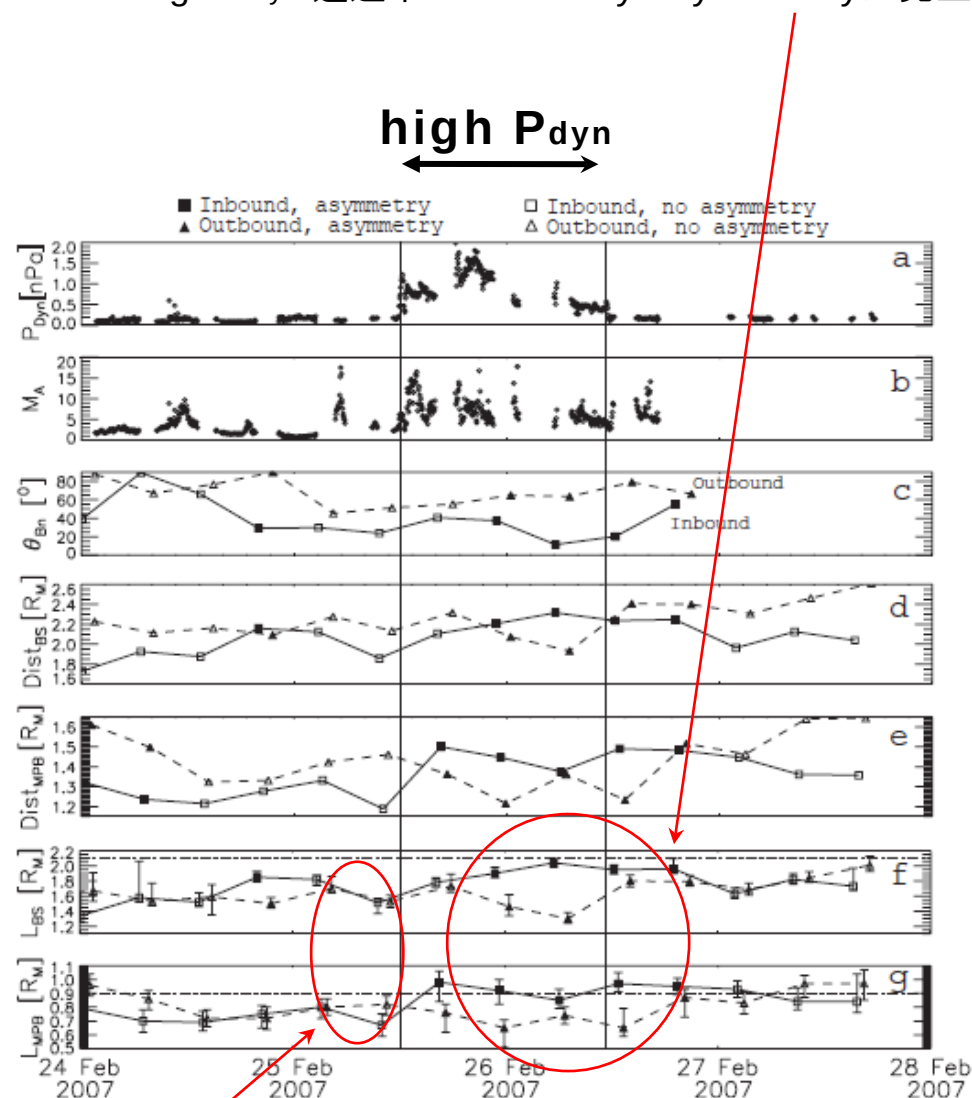
Observation

in/out boundでsolar zenith angle (SZA)依存性を無視するため、火星のBS, MPBの経験モデルで使した,

$$r = (X_0) + \frac{L}{1 + \varepsilon \cos \theta}$$

に対して, ε , X_0 をfixし, 各パスごとに L を計算し, L -valueをin/out boundで比較する。著しくin/outで差が生じた場合, plasma boundary asymmetry になったとみなす(f・g)。

high P_{dyn} 通過中にboundary asymmetryが発生



high P_{dyn} 直前にboundaryが惑星寄りになる

Cause of the asymmetries (1)

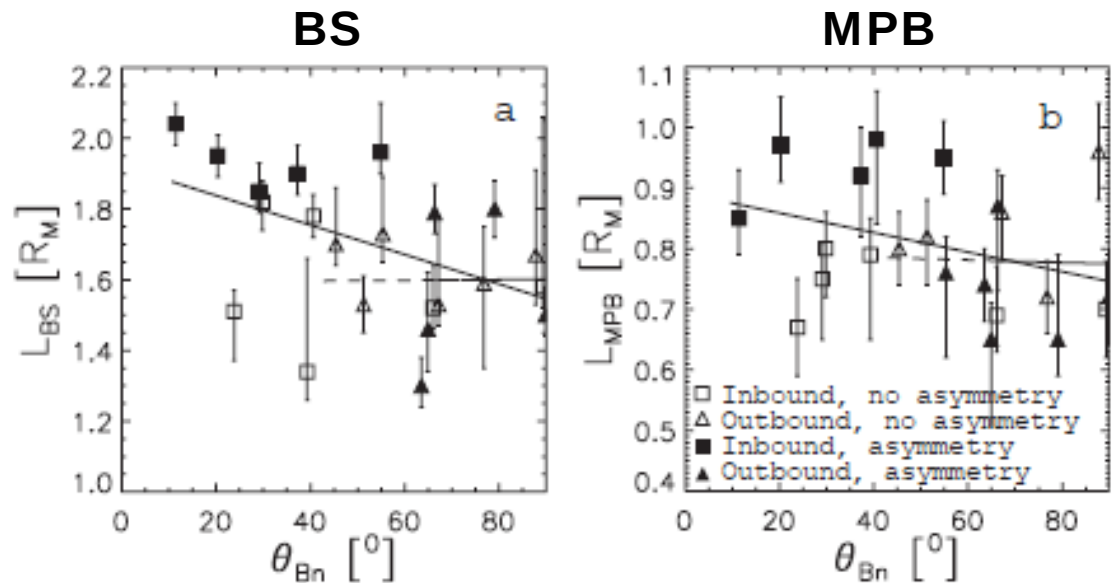
IMF (θ_{BN}); quasi-parallel or quasi-perpendicular ?

BSについて:

- すべてのパスでは//と $\perp$ に有意な差あり
- in/outの区別をすると, inのみに有意な差あり

MPBについて:

- 有意な差は認められず



- 観測事実として, plasma boundary asymmetryのとき inboundは//, outboundは $\perp$ の傾向あり
- θ_{BN} によって, BS, MPBの位置が決められているとは認められない (data量の少なさが問題)
- 先行研究として, *Zhang et al.*, [1991] とは正反対の結果

Cause of the asymmetries (2)

Convective Electric field (E_{conv});

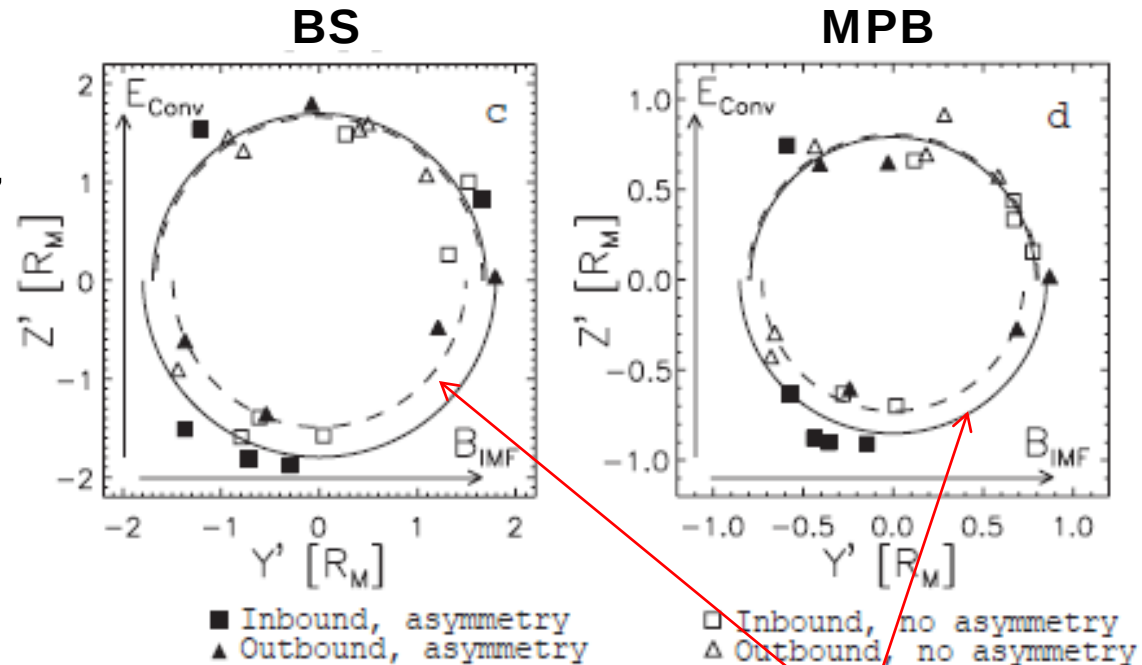
[仮説]

E_{conv} によって, BS, MPB
の位置が決定される場合,
+E hemisphereの方が
mass loading 効果に
よって位置は高高度にな
るはず



そのような傾向は確認
できない

— Averaged inbound distance
- - - Averaged outbound distance



- -E hemisphere でin/out boundの平均位置に差異がある
(inboundはSouthern/dusk hemisphere ← MAの寄与か??)
- B_{IMF} は火星下流にいるRosettaのdataを時間シフトさせている。
→ IMFの時空間発展の影響か?

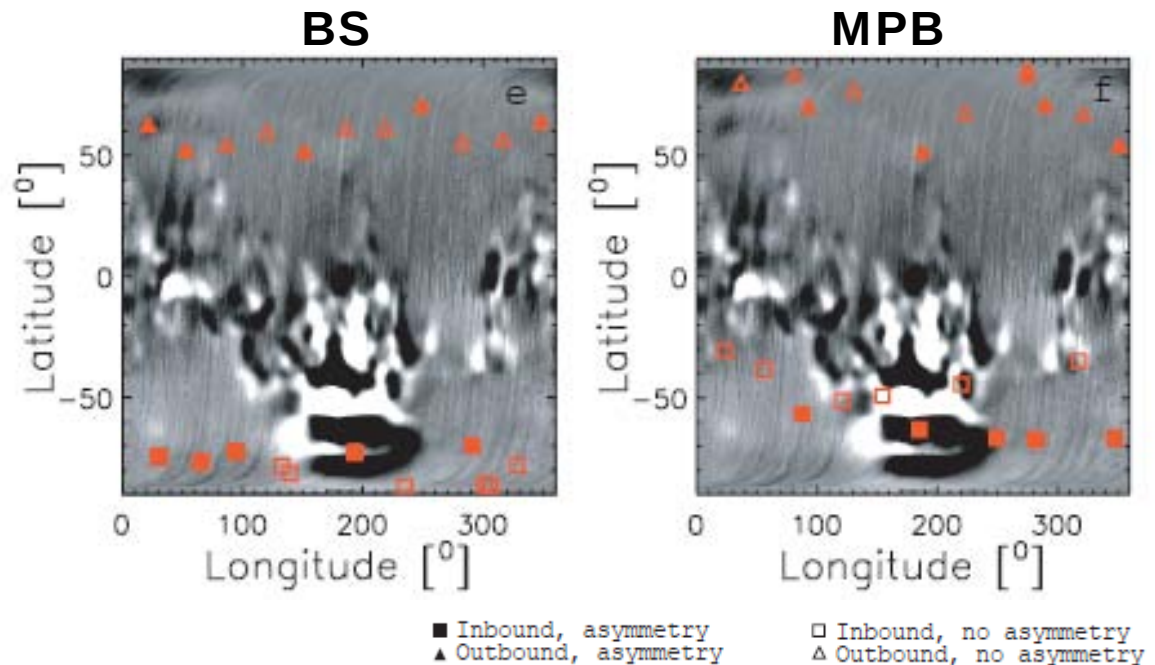
Cause of the asymmetries (3) magnetic field anomaly (MA);

[仮説]

磁気異常帯の上空では
磁気圧の効果によって、
太陽風動圧を支える
ことが可能になり、
BS, MPBの位置を
外側に広げる可能性
がある。

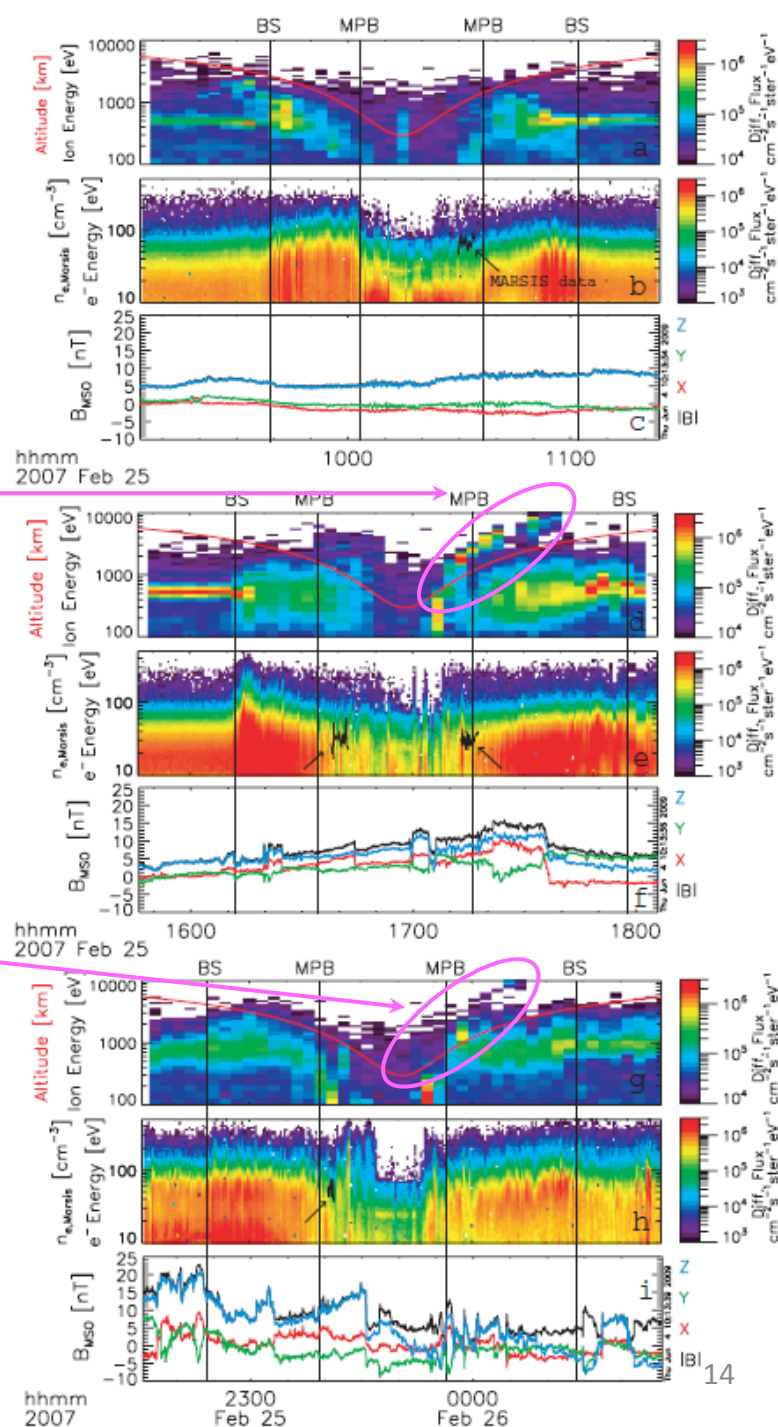


plasma boundary asymmetryが観測された期間の一部に磁気異常帯の領域が重なるが、asymmetryの観測地点が経度方向に広がっているので、直接的な影響はない。



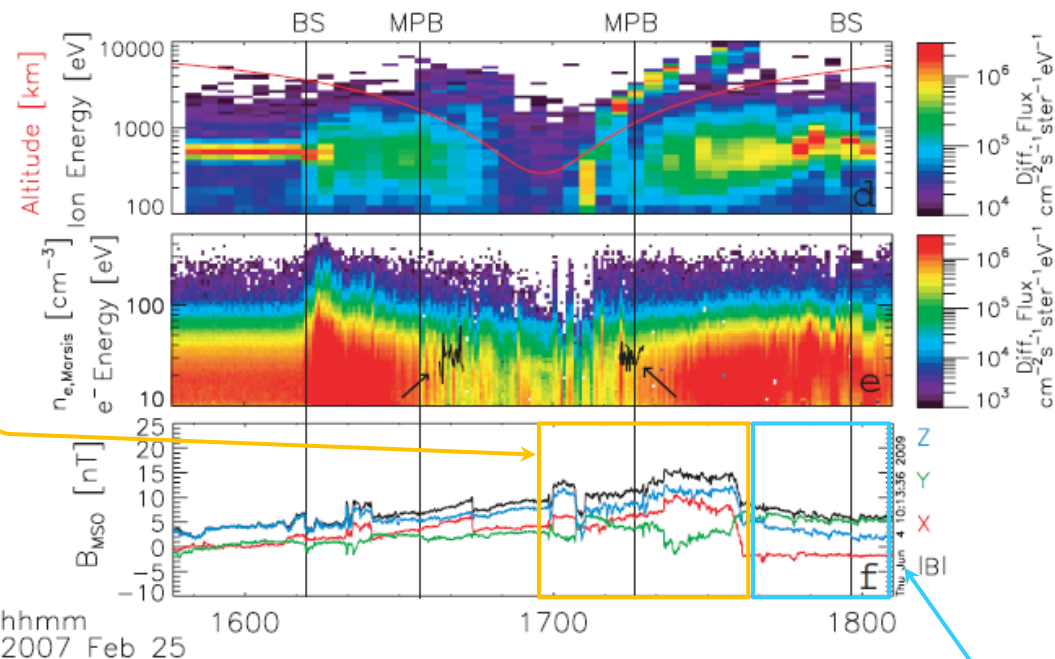
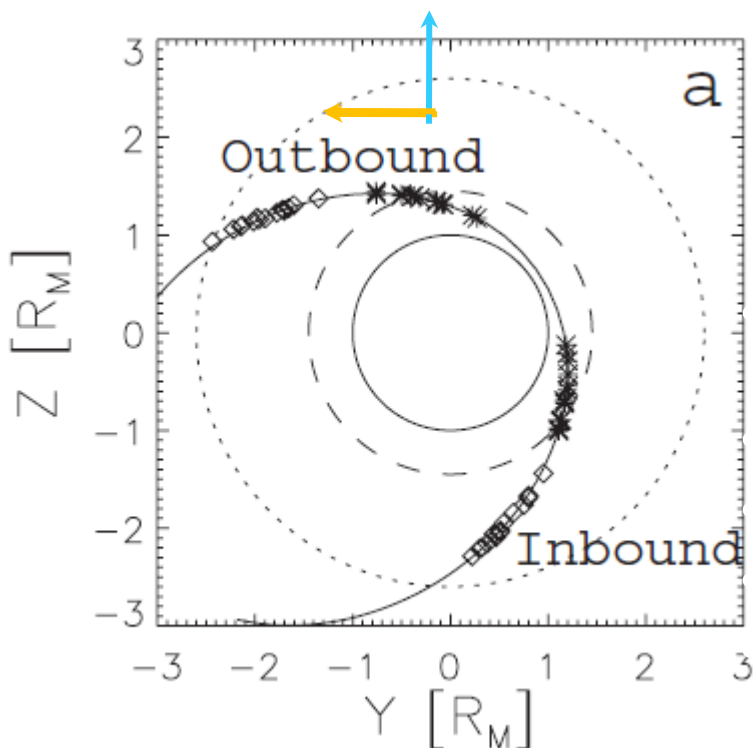
Ion outflow (1)

- 下2つのパスがhigh P_{dyn}
 - 2007/02/25-17:00~40に100eV—10keVの高エネルギーに達する惑星起源重イオンの流出が観測される
 - 次のパスでもカウントとして弱いながらも似たようなフラックスが観測されている
 - MARSISの電子密度観測で, high P_{dyn} のときに電子密度の減少を観測 (*Dubinin et al.*, [2009]とConsistent)
 - inbound;
BS → outward, MPB → outward
 - outbound;
BS → out/in, MPB → inward
- P_{dyn} のみでBS, MPBの位置は決まっていない



Ion outflow (2)

重イオンの流出が観測された期間,
 B_{IMF} は主に $+Z_{MSO}$ (北向き)
 $\Leftrightarrow E_{conv}$ は $-Y_{MSO}$ (夕朝向き)
 $\therefore E_{conv}$ によって加速をされ流出



重イオンの流出が観測されなくなった期間
 (17:40以降),

B_{IMF} が $+Z_{MSO} \rightarrow +Y_{MSO}$ に切り替わる

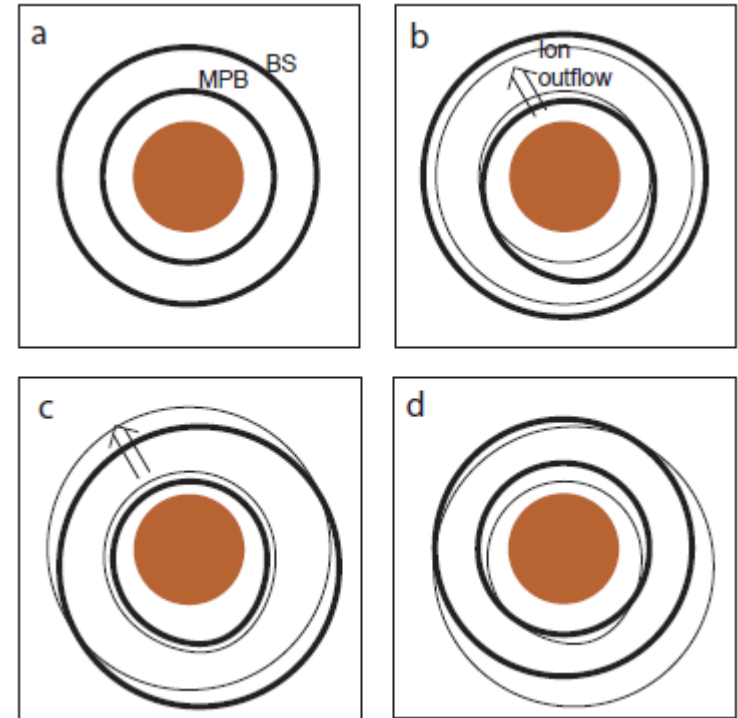
$\Leftrightarrow E_{conv}$ は $+Z_{MSO}$ (北向き)

$\therefore$ MEXの軌道と加速方向が異なり流出が
 観測されなくなる

$\longleftrightarrow$ Perez-de-Tejada et al., [2009]はモーメント輸送と指摘

Possible explanation

- Initial condition
- high P_{dyn} が到来したとき, S/夕側で境界がoutwardになると同時に, N/朝側では E_{conv} によって大気が流出し, MPBはinward, BSはmass loadingでoutwardになる
- 大気が流出したN/朝側では, 流出が原因でプラズマ圧が減少し, BS, MPBはinwardになる
- high P_{dyn} の通過が終了すると, 元のsymmetryな状態に戻る
その他にhigh P_{dyn} の太陽風が一方の半球を押し込んだのか?



Northern/dawn hemisphere ... N/朝
Southern/dusk hemisphere ... S/夕

上記の過程で, 少なくともN/朝側のBS, MPBの位置の変化は説明できたが, S/夕側のoutwardはどう説明する??(mass loading?, MA?)

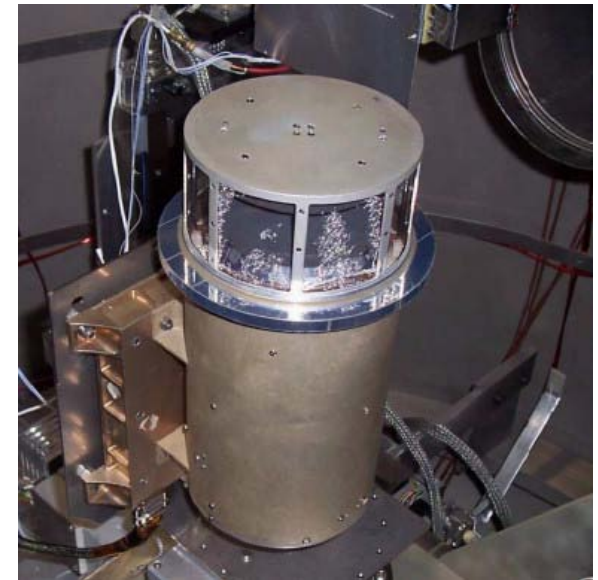
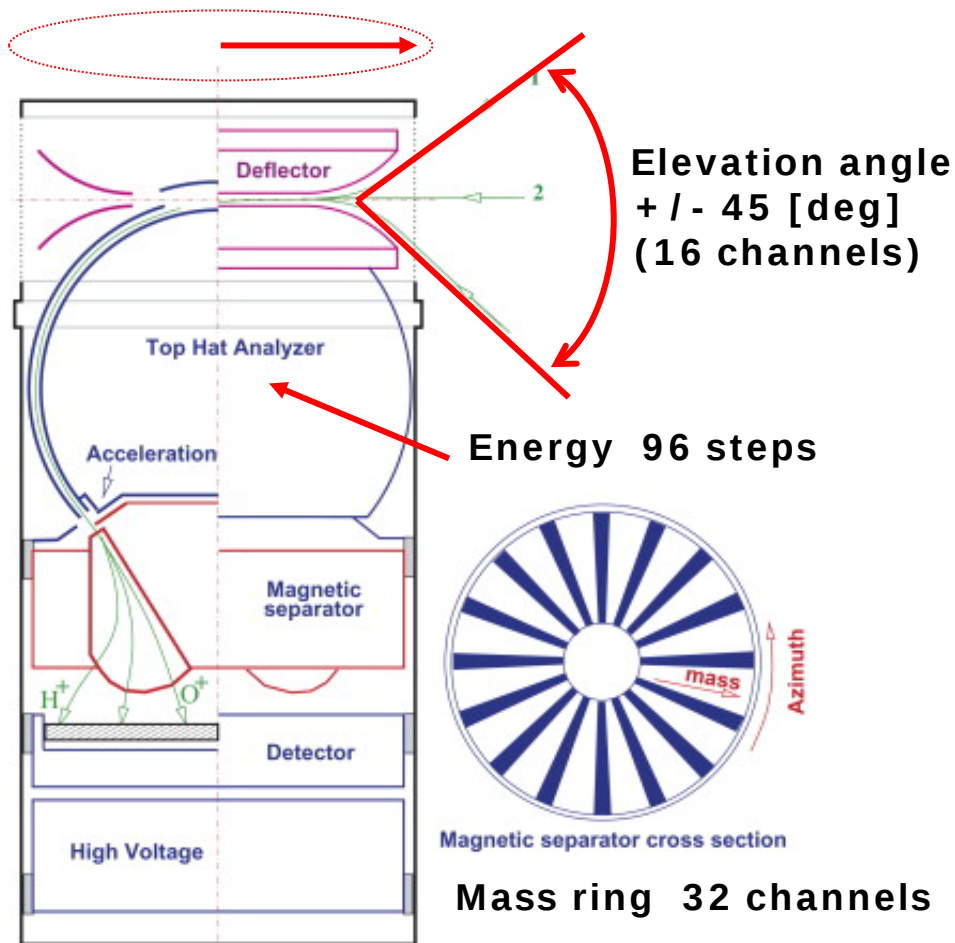
Comments

- high P_{dyn} の寄与について:
plasma boundary asymmetryを引き起こしたのが E_{conv} による大気流出が原因だったのであれば, むしろ B_{IMF} の方が重要ではないだろうか。(P_{dyn} のenhanceによる流出量の増加が先行研究でもいくつか報告されているが, どの流出メカニズムが発動したのか。)
- Fig.5の一番上のパネル(low P_{dyn} だけど, ややhigh $|B_{\text{IMF}}|$ の期間)の近火点付近で見えてるフラックスは重イオンの流出かも。
- そもそも最初のBS, MPBはsymmetryだったか。(Fig.3の2007/02/24)

Back up & Appendix

Instrument – (ASPERA-3 Ion Mass Analyzer : IMA)

Azimuth angle 360 [deg]
(16 sectors)



IMA Performance table ;

10 ~ 30000 [eV]

1, 2, 4, 16, 32, 44, ..., 80 [a.m.u.]

FOV : 90 × 360 [deg]

192 [sec] in full 3D scan

IMA Cross Section ; *Barabash et al. (2006)*

IMA field of view obstacle

MEXは3軸固定衛星であり、衛星航体やsolar panelによって、ASPERA-3/IMAの視野が部分的にブロックされている。

近火点付近では、流出方向の視野の大部分がブロックされている

Nilsson et al., Space Sci. Rev. (2006)

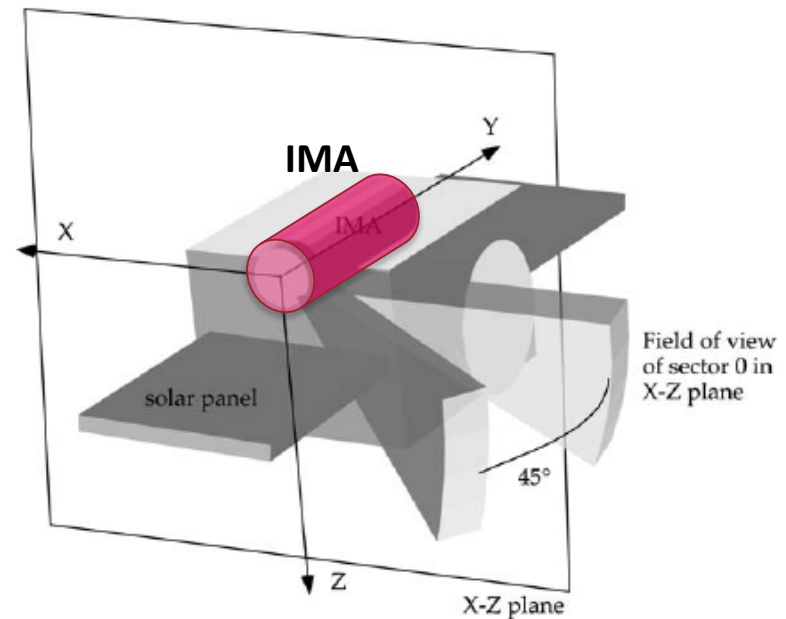


Figure 1. Schematic figure of the IMA Ion Mass Analyzer on the Mars Express spacecraft. Indicated are the spacecraft coordinate system and the field-of-view of one sector of the instrument at no deflection and at 45° away from the spacecraft.

論文の誤植

- P.4535 Rosetta RPC/IESのモードについて
(誤) 500 eV → (正) 50 eV ?
- P.4538 第2パラグラフ
(誤) the horizontal dash-dot lines in panels (d) and (e)
(正) ... in panels (f) and (g)
- P.4542 第3章 Discussion *Zhang et al.*, [2009]の引用
(誤) quasi-perpendicular case than in the quasi-perpendicular case
(正) quasi-perpendicular case than in the quasi-parallel case
- ...