第23回 火星勉強会 (2012/06/05)

Ion distributions in the vicinity of Mars: Signatures of heating and acceleration processes

Nilsson et al., [2012, EPS]

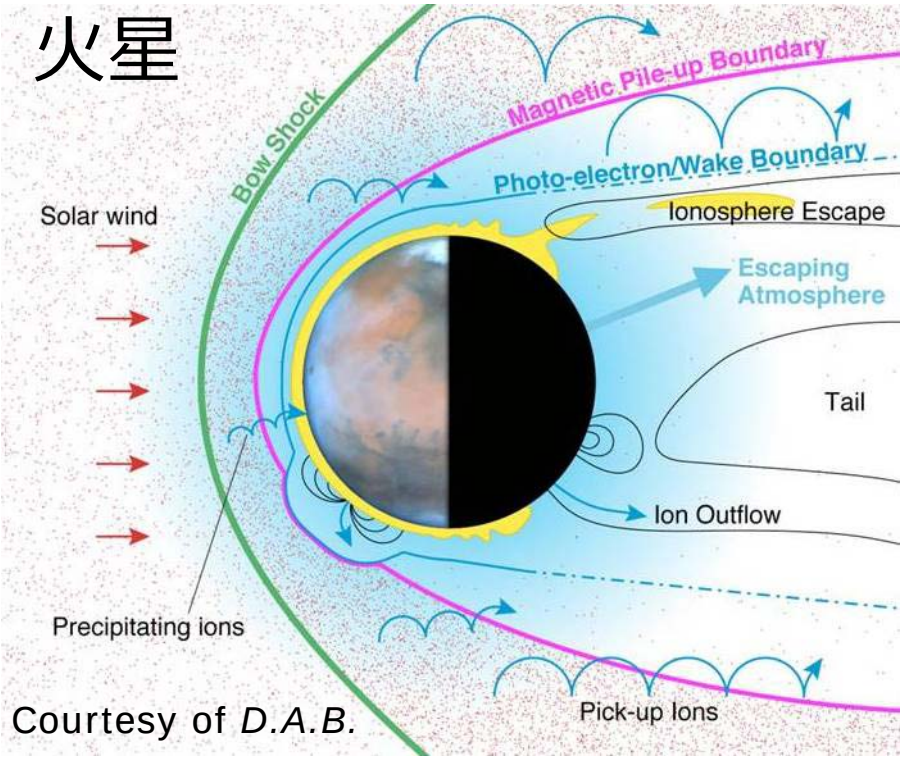
名古屋大学 太陽地球環境研究所 (STEL)
D2　原　拓也 (Takuya Hara)

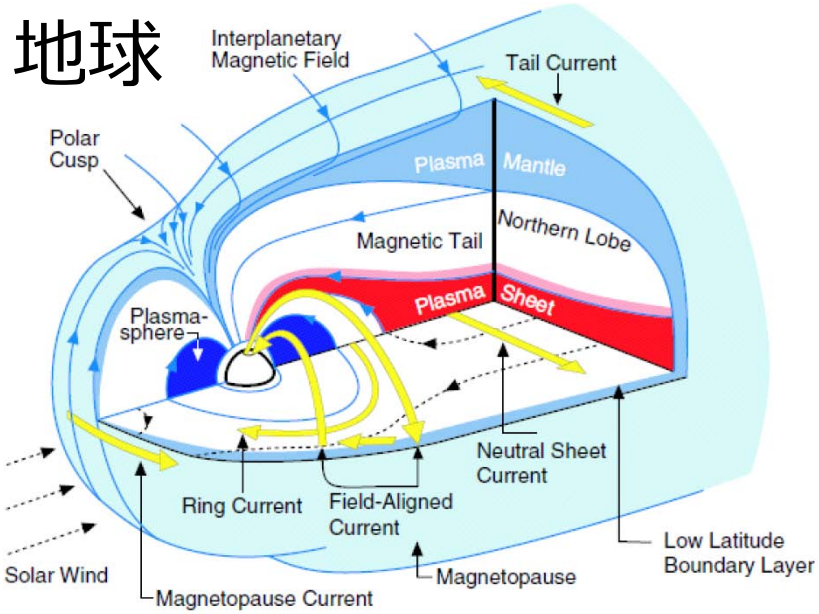
要旨

- ESAが打ち上げたMars Express(MEX)衛星に搭載されたイオン質量分析器(Ion Mass Analyzer: IMA)が，2007年5月--2011年2月までに観測した膨大なデータを統計的に解析することで，太陽活動極小期における平均的な火星プラズマ環境の状況を調べた.

- 観測器を開発した責任研究所(IRF)に所属する人ならではの，丁寧で慎重に観測データを取り扱っていることが感じられる.
  - 視野干渉を受けた観測器から得られる速度分布関数.
  - 低エネルギープロトンのコンタミの除去.
  - 衛星速度の考慮.

1. Introduction
火星の電磁圏環境と大気流出





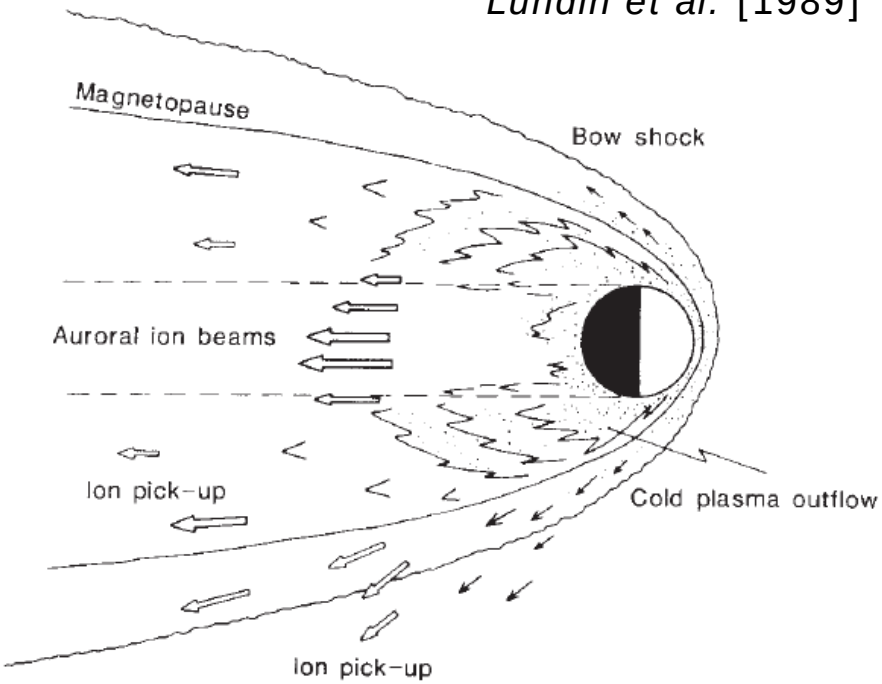
Kivelson and Russell [1995]

- 火星は非磁化惑星である(局所的な残留磁化は存在する).
- 火星は地球のような双極子磁場による磁気圏は持たない.
- 太陽風と火星超高層大気が直接相互作用できる.
- 太陽風誘導型の流出機構によって，火星大気が宇宙空間に流出する.

1. Introduction
飛翔体による大気流出量観測

Phobos-2 @太陽活動極大期

Lundin et al. [1989]

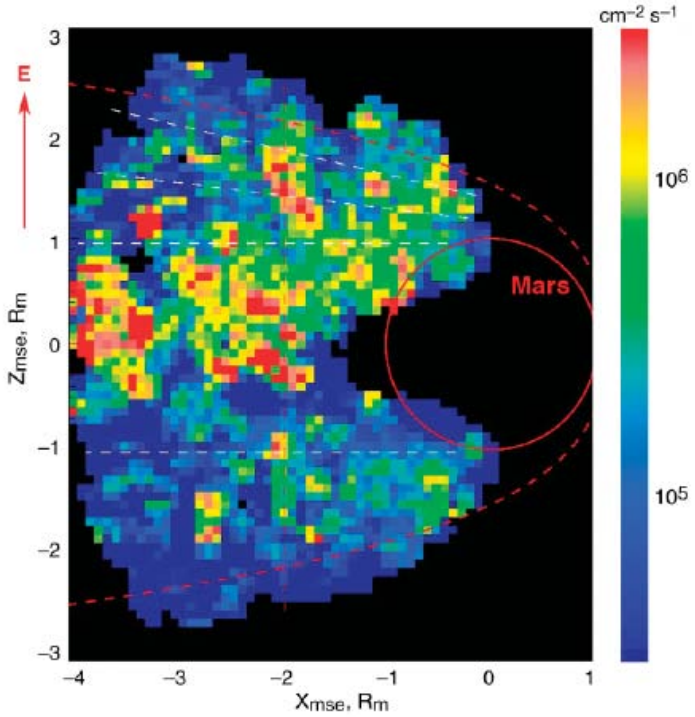


O^+:2.0 × 10^{25} [ions/s]

太陽活動度によって大気流出量は少なくとも1桁程度変動する.

Mars Express (MEX)
@太陽活動極小期

Barabash et al. [2007]



O^+ : 1.6 × 10^{23} [#/s]
O_2^+ : 1.5 × 10^{23} [#/s]
CO_2^+ : 8.0 × 10^{22} [#/s]
(maximum ~10^{24} [#/cc])

1. Introduction
太陽風変動が火星大気流出に与える影響

(例) *Edberg et al.*, [2010]

- Mars Express(MEX)衛星のプラズマ観測に基づく太陽活動極小期における惑星起源イオンの流出について統計解析を行った.
- CIR (Corotating Interaction Region)通過時には，通常よりも少なくとも2.5倍だけ流出量が増加した.
- これまでの研究では，流出総量の推定までにとどまっており，流出プロセスの詳細まで踏み込むことができていなかった.

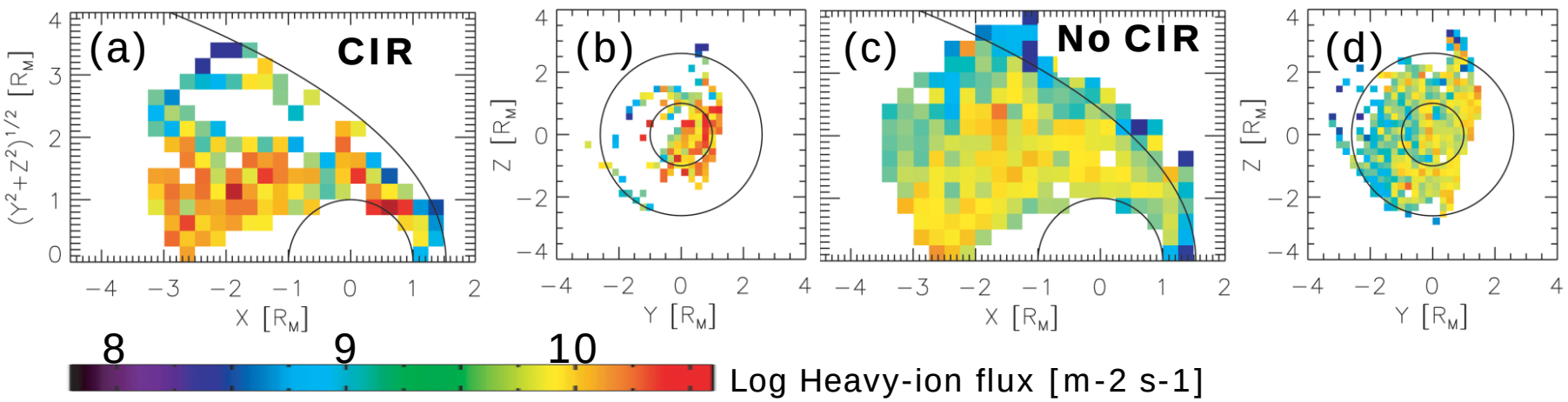
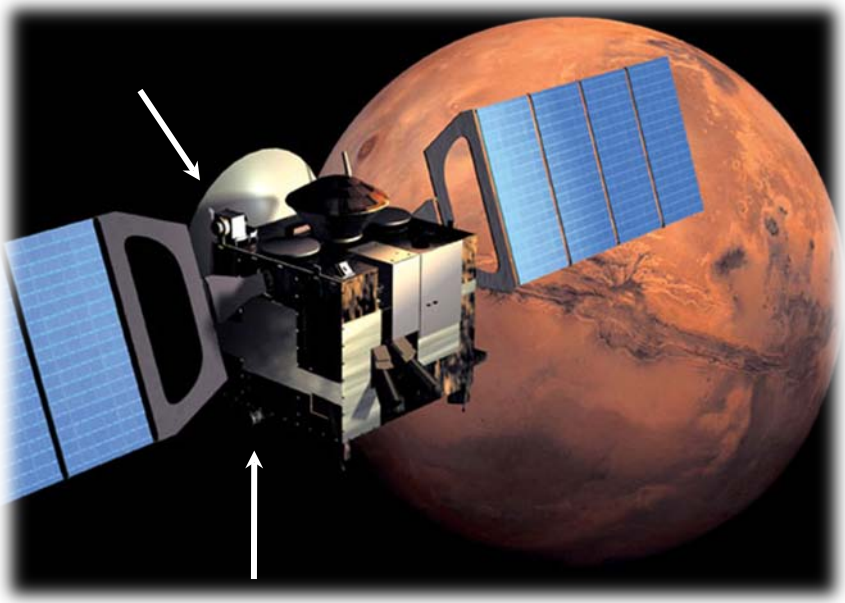


Figure:
(a)(b) CIR通過中(c)(d)通常時における，MEX衛星が観測した惑星起源イオン流出フラックスの空間分布.

2. Instrument and Data
Mars Express (MEX) 衛星

- 打ち上げ日： 2003/06/02
- 3軸固定衛星
- 極軌道 (inclination: 86°)
- End of mission：2009/12/31 ⟶ 2012→2014?

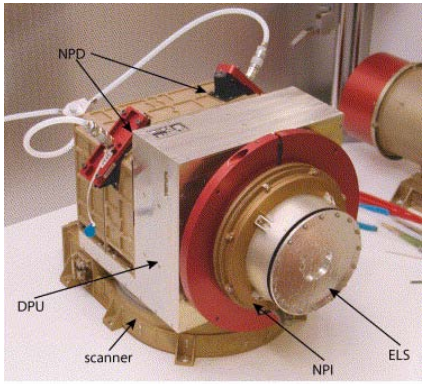


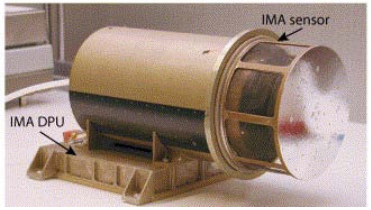
- 近火点：～ 275 [km]
- 遠火点：～ 10,000 [km]
- 軌道周期：～ 6時間40分
- イオン，電子，高速中性粒子を計測するプラズマ観測器群(ASPERA-3)を搭載.
- 磁場観測器なし.

Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms (ASPERA-3)

2. Instrument and Data
プラズマ観測器群 (ASPERA-3)

- Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms
- イオン，電子と2種類の高速中性粒子(Energetic Neutral Atoms; ENA)観測器で構成されている.
- 火星でENAを観測するのはMEX衛星が世界初である.

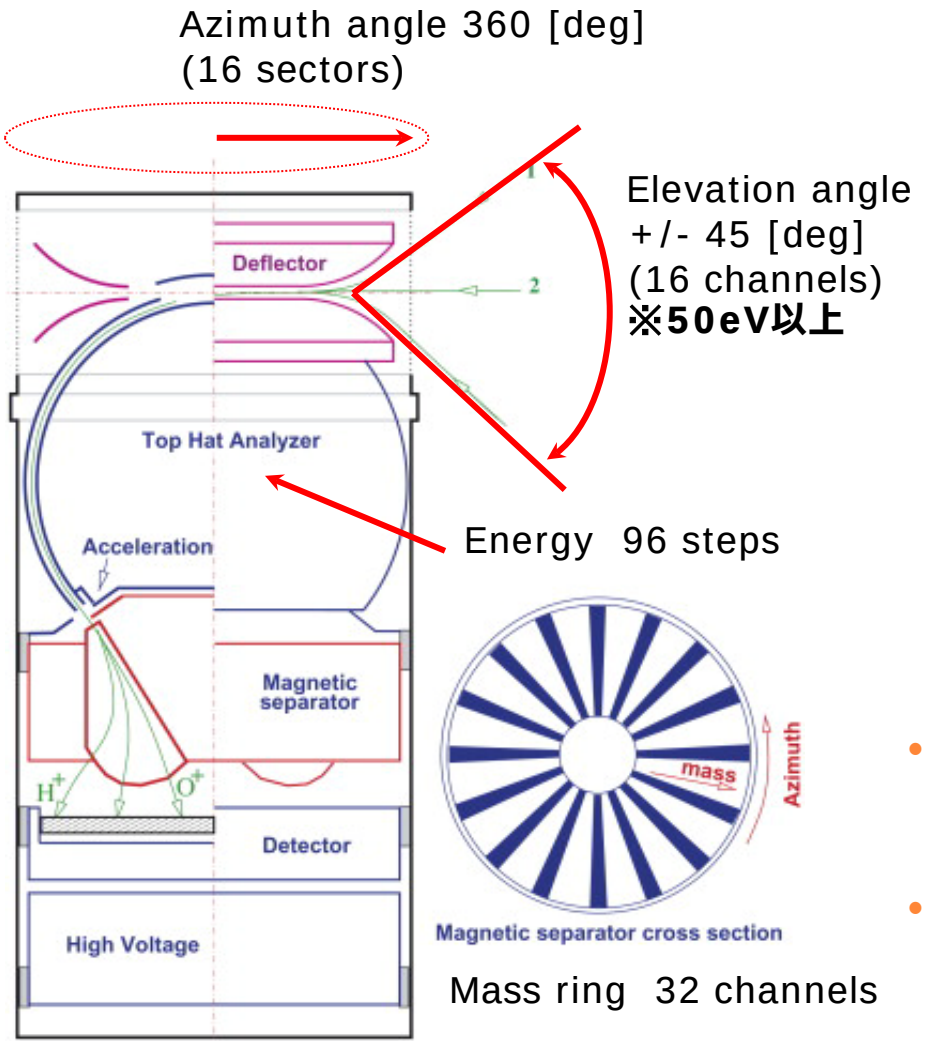




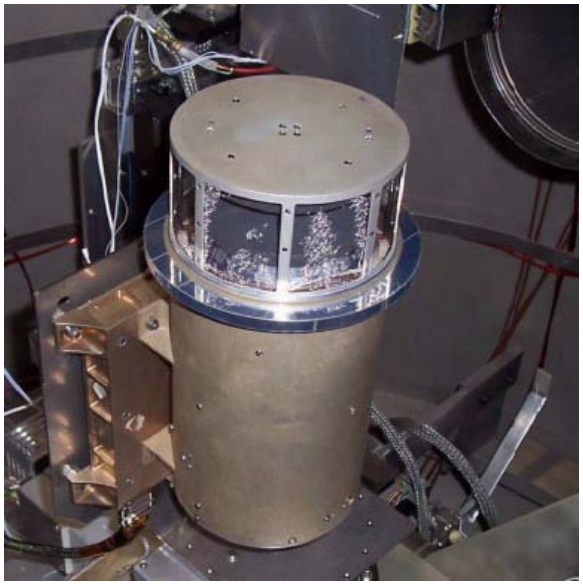
Parameter	NPI	NPD	ELS	IMA
Particles to be measured	ENA	ENA	Electrons	Ions
Energy range, keV per charge	≈0.1–60[a]	0.1–10	0.01–20	0.01–30
Energy resolution, $\Delta E/E$	No	0.5	0.08	0.07
Resolved masses, amu/q	No	1, 16	N/A	1, 2, 4, 8, (16, 32, 44)[b]
Intrinsic field of view	$9° \times 344°$	$9° \times 180°$	$4° \times 360°$	$90° \times 360°$
Angular resolution (FWHM)	$4.6° \times 11.5°$	$5° \times 40°$	$2° \times 22.5°$	$4.5° \times 22.5°$
G-factor/pixel or sector cm^2 sr (NPI, NPD) cm^2 sr eV/eV (ELS, IMA)	2.5×10^{-3} (ε not incl.)	6.2×10^{-3} (ε not incl.)	7×10^{-5}	1.6×10^{-6}
Efficiency, ε, %	~1	1–15	Inc. in G	Inc. in G
Time resolution (one scan), s	32	32	32	192
Mass, kg	0.7	1.3	0.3	2.2
Power, W	0.8	1.5	0.6	3.5

Barabash and Lundin [2006]

2. Instrument and Data
イオン質量分析器 (IMA)



IMA Cross Section ; *Barabash et al.* [2006]



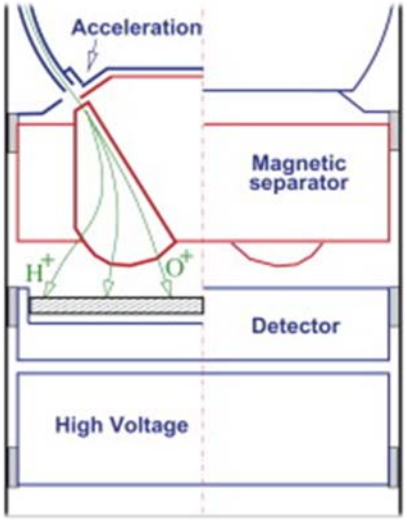
2007年5月以降での
イオン質量分析器の特徴:

- 検出できるエネルギー範囲を10eVまで引き下げる.
- 50eV以下はElevation scanをせず，12秒の時間分解能で2次元分布をとる.

2. Instrument and Data
低エネルギープロトンのコンタミ

- 低エネルギー(700eV以下)のプロトン(m/qの値が小さいイオン)は，Magnetic separatorによって軌道が曲げられすぎることで，Mass tableとは異なるアノードで検出される．

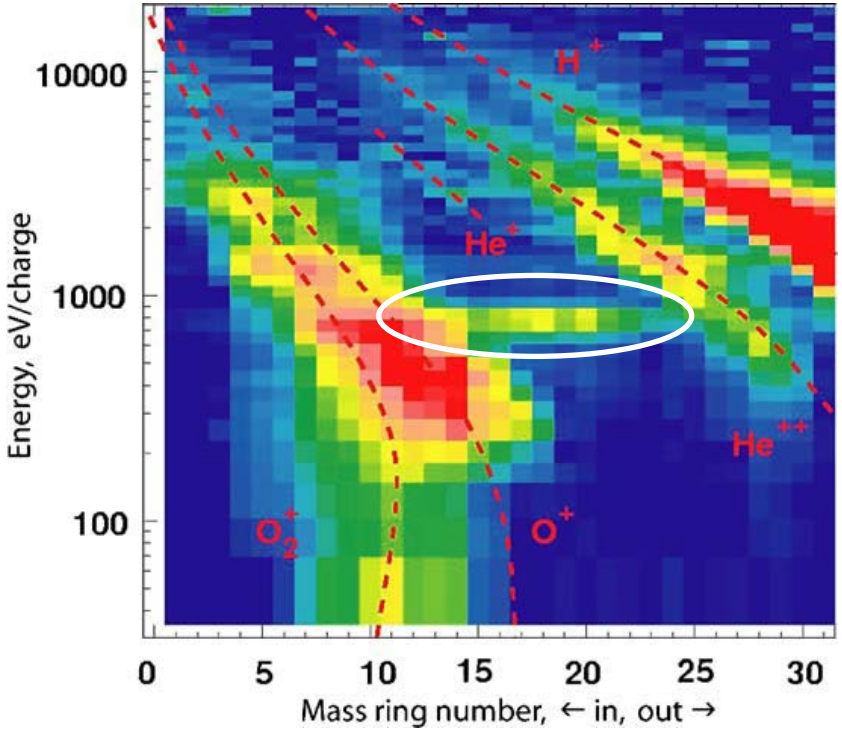
  (右下図の白丸で囲まれたカウント)
- 電離圏起源イオンのモーメント計算をするときに悪影響を与える．



Magnetic separator cross section

Mass ring 32 channels

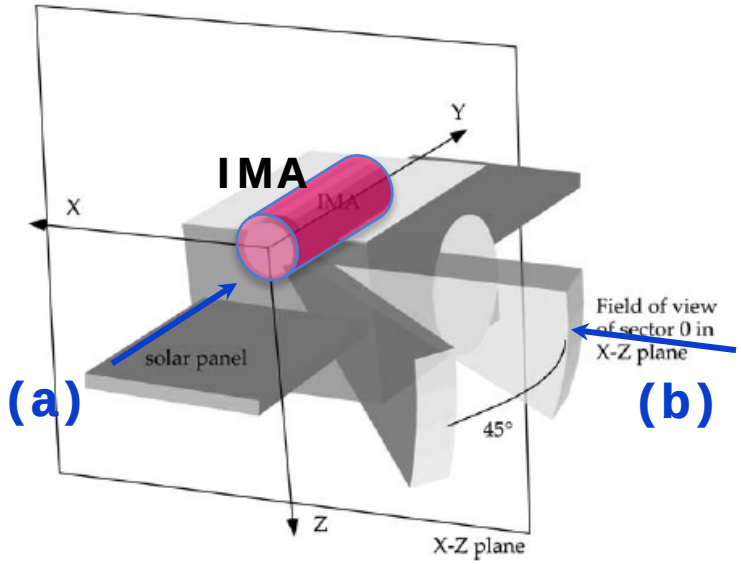
IMA Cross Section ; *Barabash et al.* [2006]

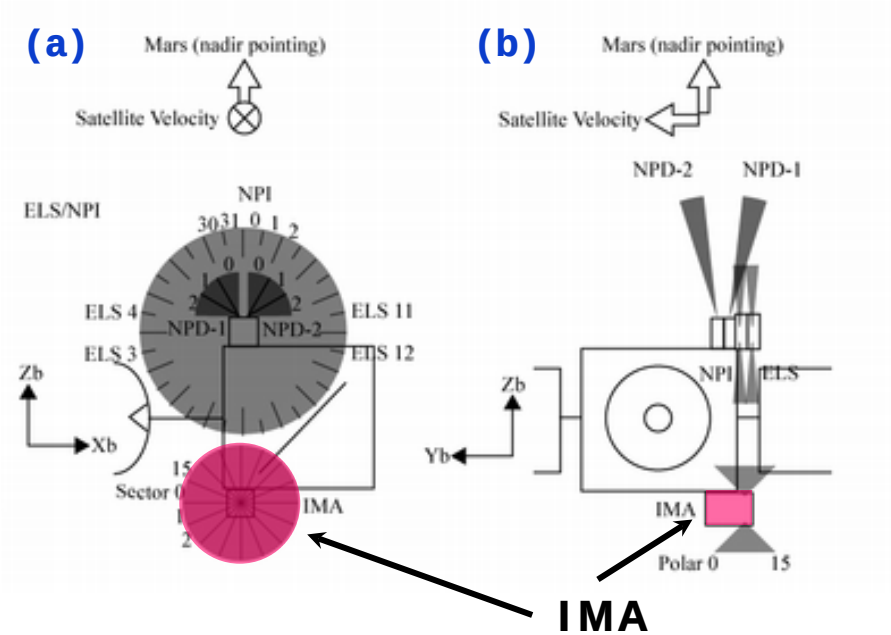


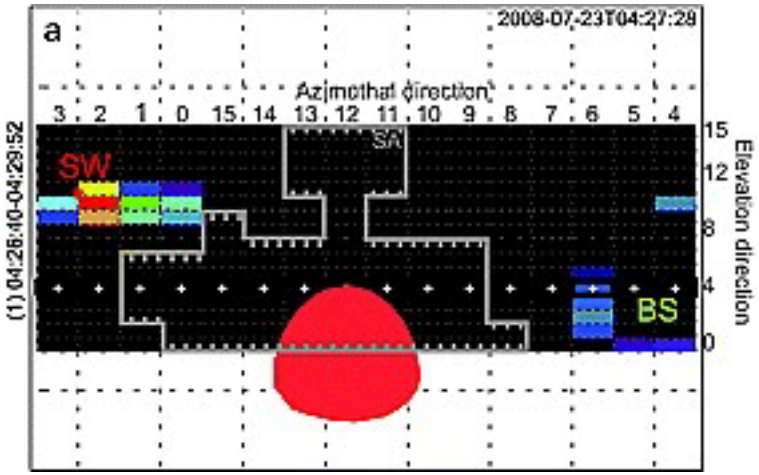
2. Instrument and Data
MEX/ASPERA-3の視野干渉

二穴さん提供

Nilsson et al. [2006]







イオン質量分析器(IMA)は，衛星航体やsolar panelによって視野の一部がブロックされている．

完全なイオンの3次元速度分布関数を得ることはできない．

Futaana et al. [2010]－太陽風領域の観測例．

3. Data Analysis Method
データ処理の方法

Nilsson et al. [2011]

- 4年間にわたるMEXの観測データをspatial binとangular binの2種類のbinを使ってbinningする.
- spatial binはXmso-Rmso空間に0.2Rm×0.2Rmの大きさで分ける.
- 1つのspatial binに入ったデータに対して，粒子が運動する方向のXmsoとなす角度をもとにangular binに分ける.
- 速度空間上でRmsoの符号が正の粒子は(大雑把にいえば)流出することを意味する.
- 衛星速度の考慮は行っているが，衛星電位は考慮していない.
- 各spatial bin内での平均的な速度分布関数を求める.

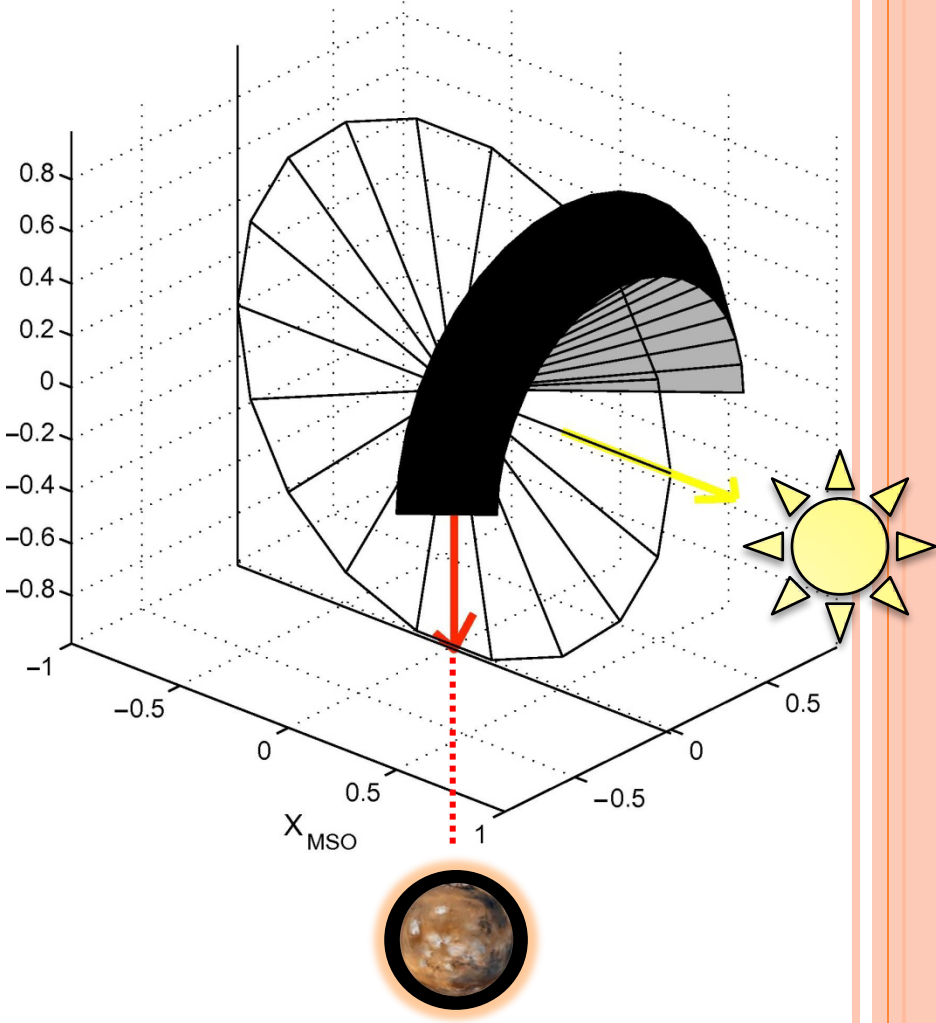
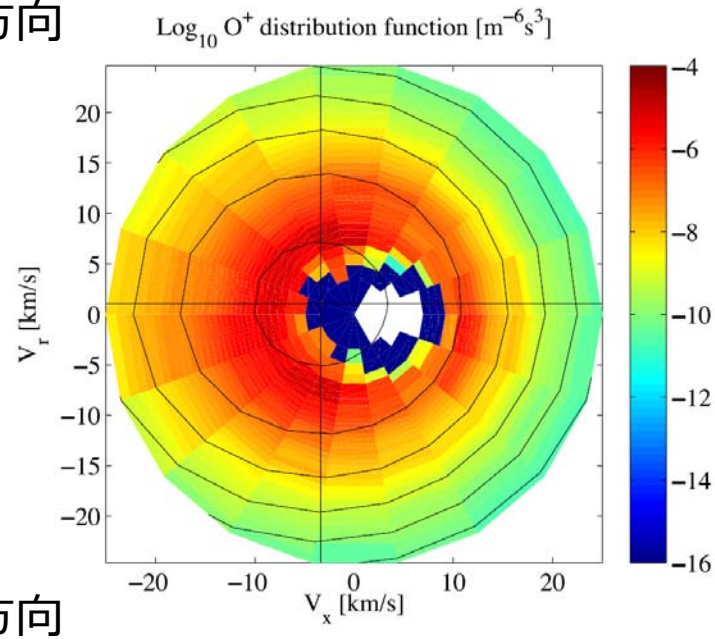


Figure:
1つのspatial binの中でのangular binの定義.
黒く塗られた領域が1つのangular binに対する立体角.

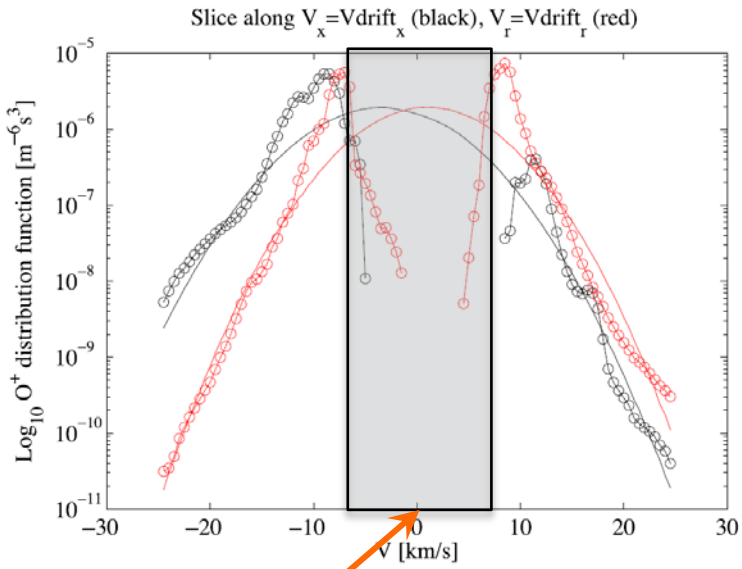
3.1 Fitting of distribution function to low energy data

流出方向



流入方向

反太陽方向　　太陽方向



IMAの観測限界

- 誘導磁気圏(IMB)内のterminator近傍(=図2のregion 6)における50eVより低いエネルギーをもった電離圏イオンはdrifting Maxwellian分布を示す(上図).
- フィッティングから得られる電離圏プラズマの温度は3--10eV程度.

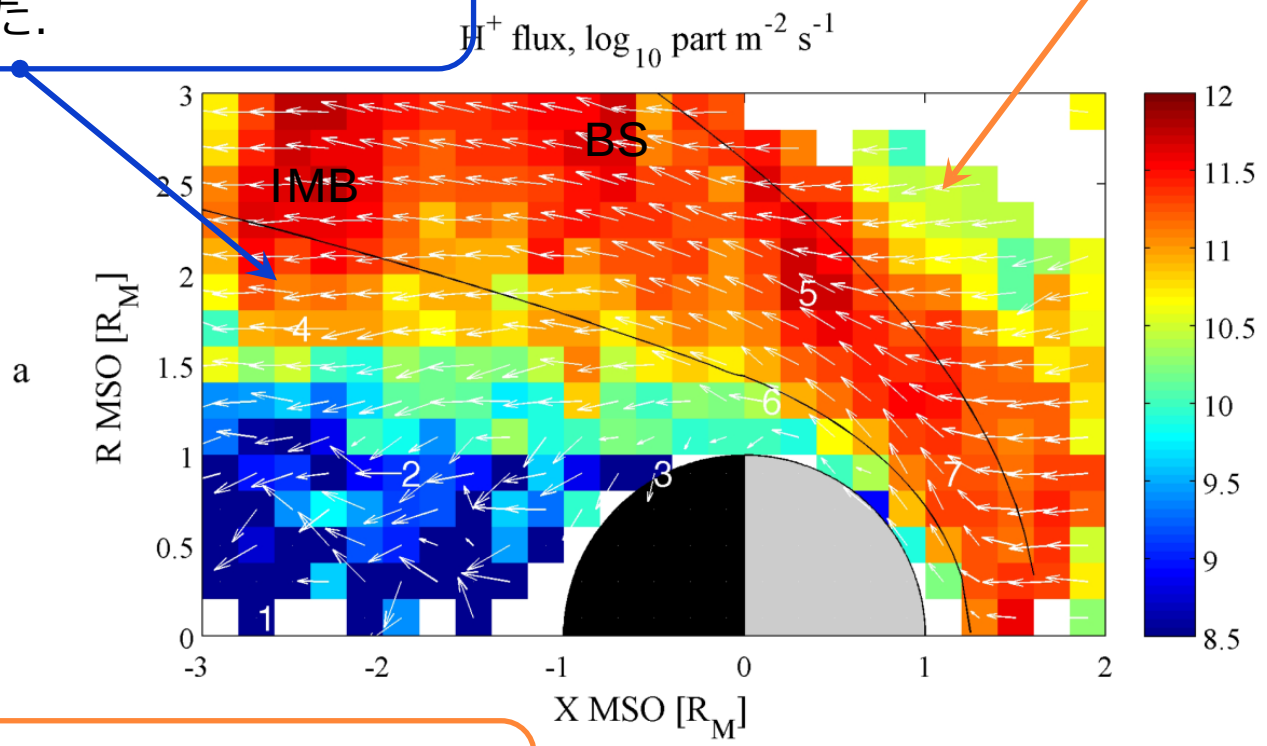
4. Results

4.1 Average flow around the planet

プロトンの空間分布

統計的な問題で太陽風領域であるが，フラックスが小さい.

モデルのIMBの内側において大きなプロトンのフラックスを観測した.



Flowの向きから予想されるBSの位置はモデルよりも低高度か.

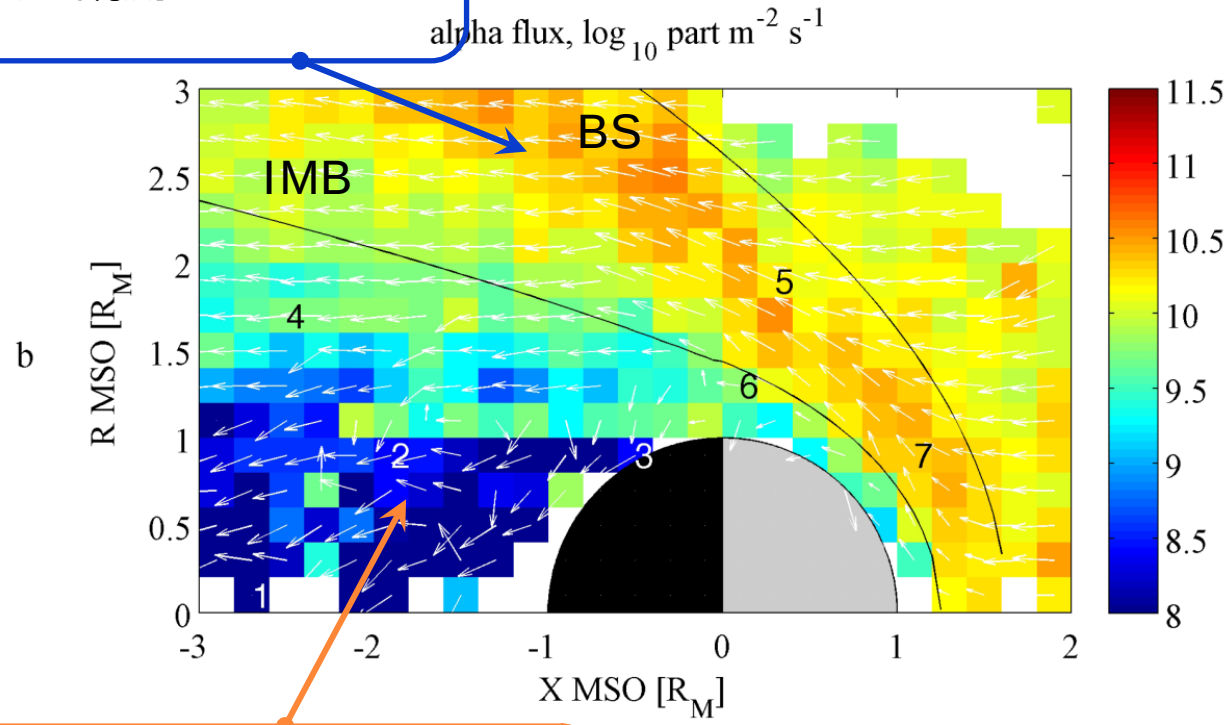
モデル境界位置は *Trotignon et al.* [2006]に基づく.

4. Results

4.1 Average flow around the planet

アルファ粒子(He^{++})の空間分布

BSの内側において最も大きなフラックスを観測.



惑星に近付くにつれて，フラックスは減少する.

モデル境界位置は
Trotignon et al. [2006]に基づく.

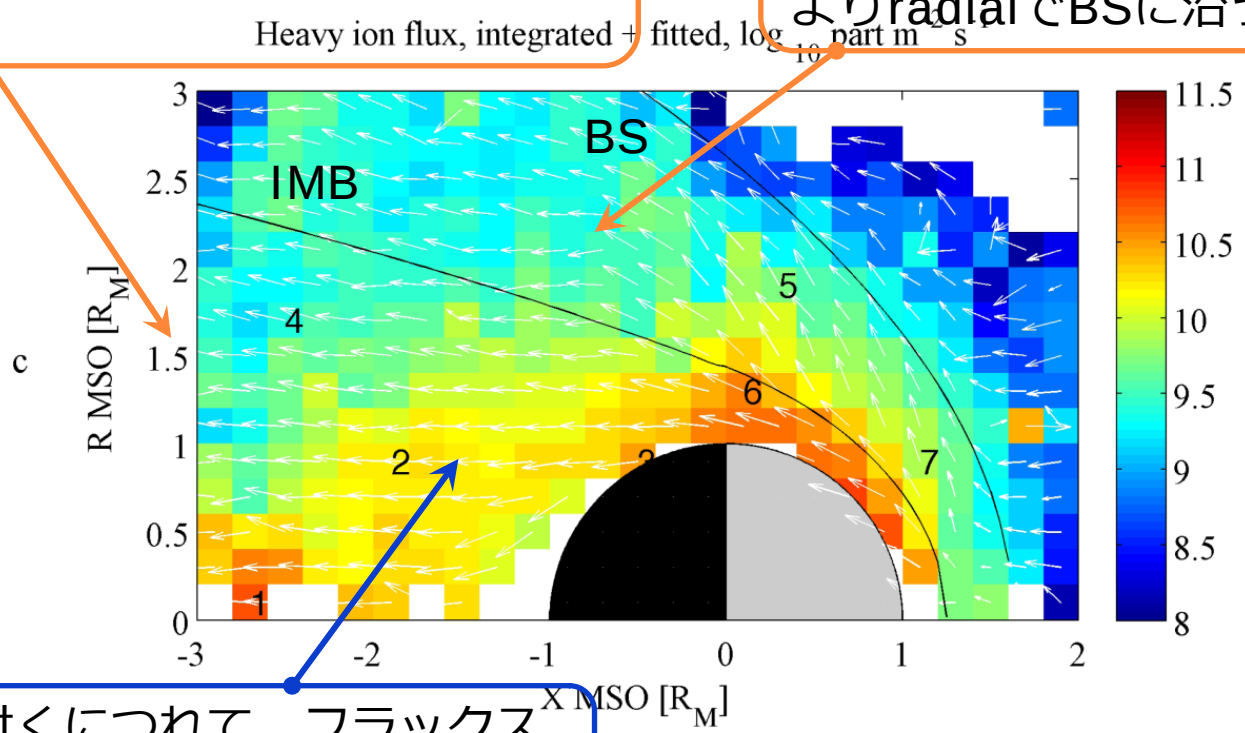
4. Results

4.1 Average flow around the planet

電離圏イオン(O^+ & O_2^+ & CO_2^+)の空間分布

電離圏イオンは広がりながら反太陽方向に流れるため，徐々にフラックスは減少する．

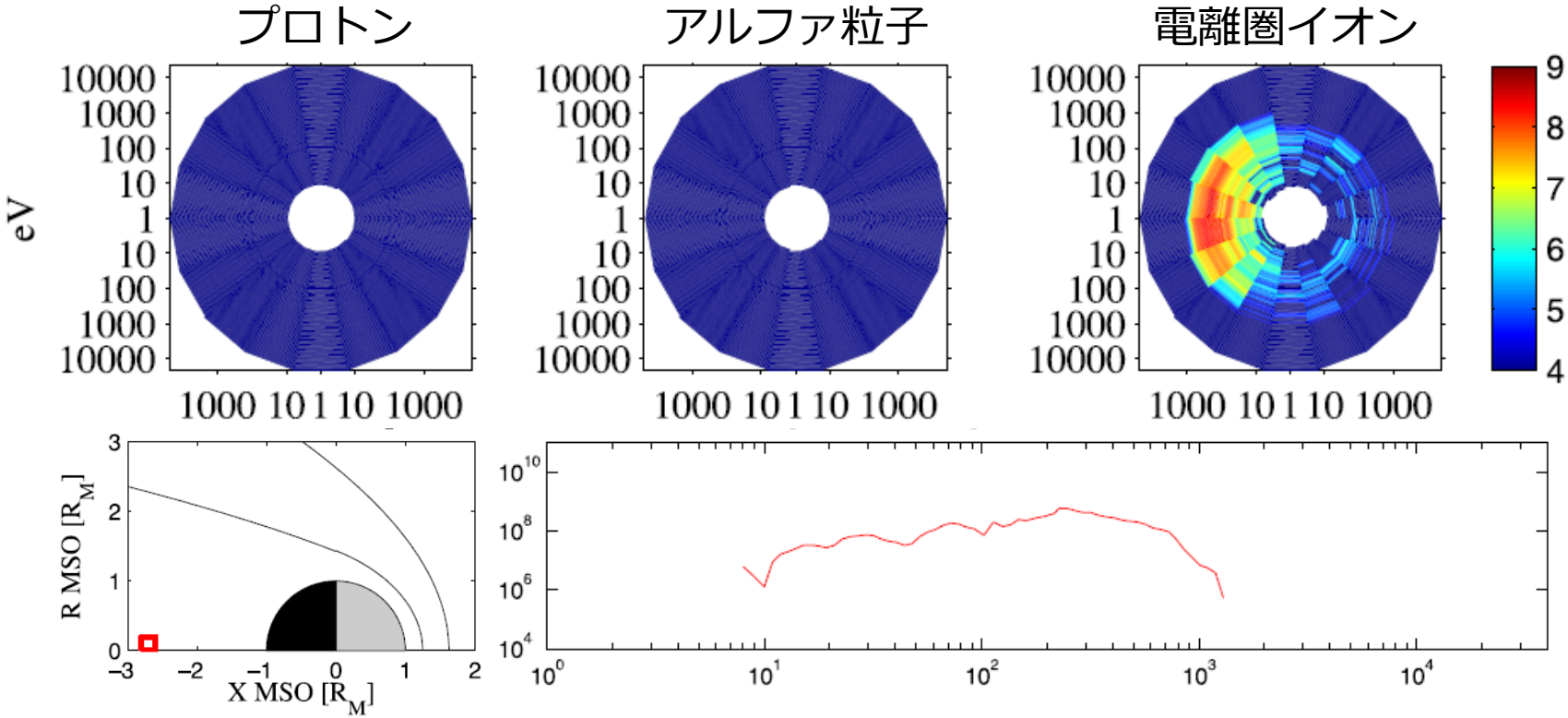
IMBの外側でも一定のフラックスが存在し，粒子の運動方向はよりradialでBSに沿う．



惑星に近付くにつれて，フラックスは増加する．

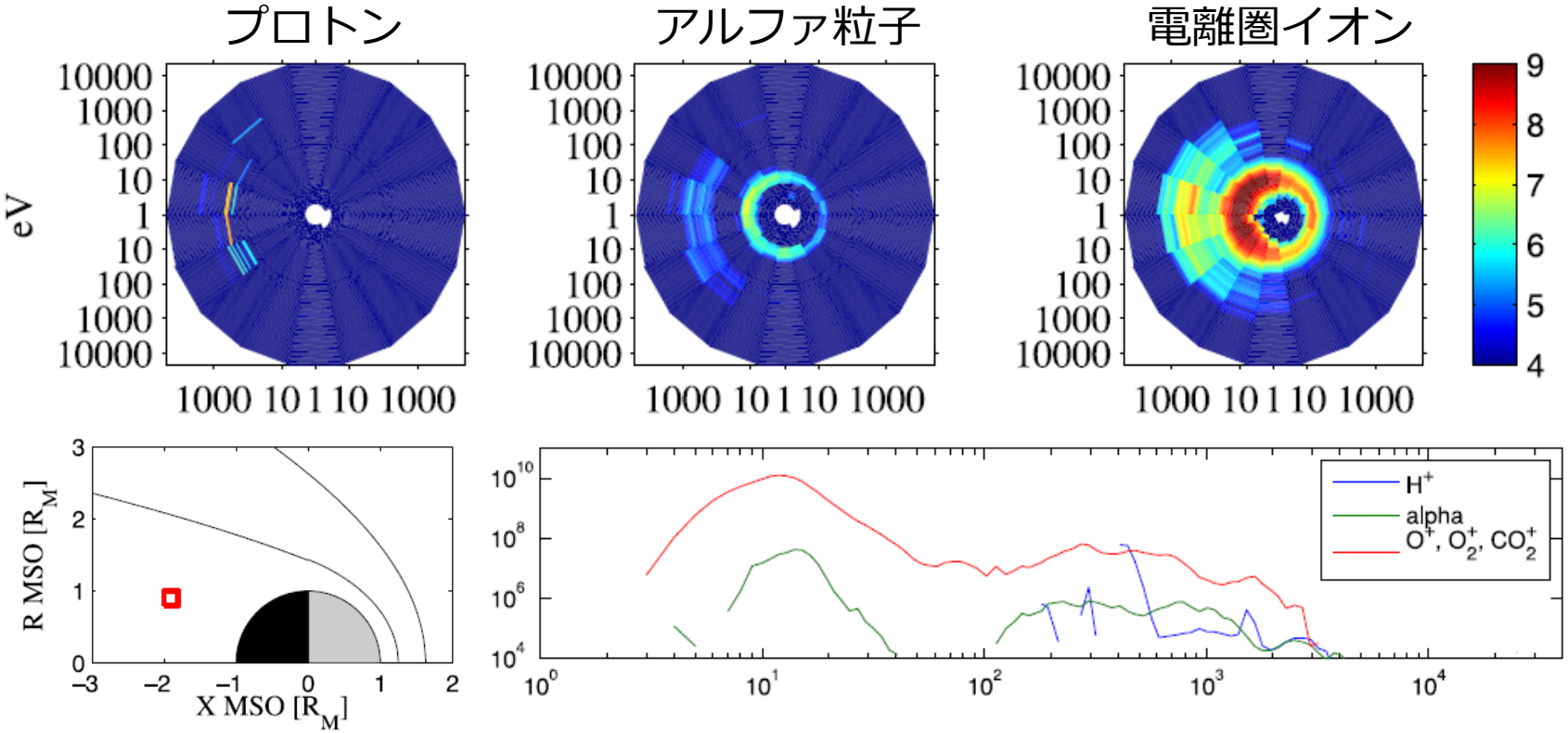
モデル境界位置は
Trotignon et al. [2006]に基づく．

4.2 Average distribution functions Point 1.



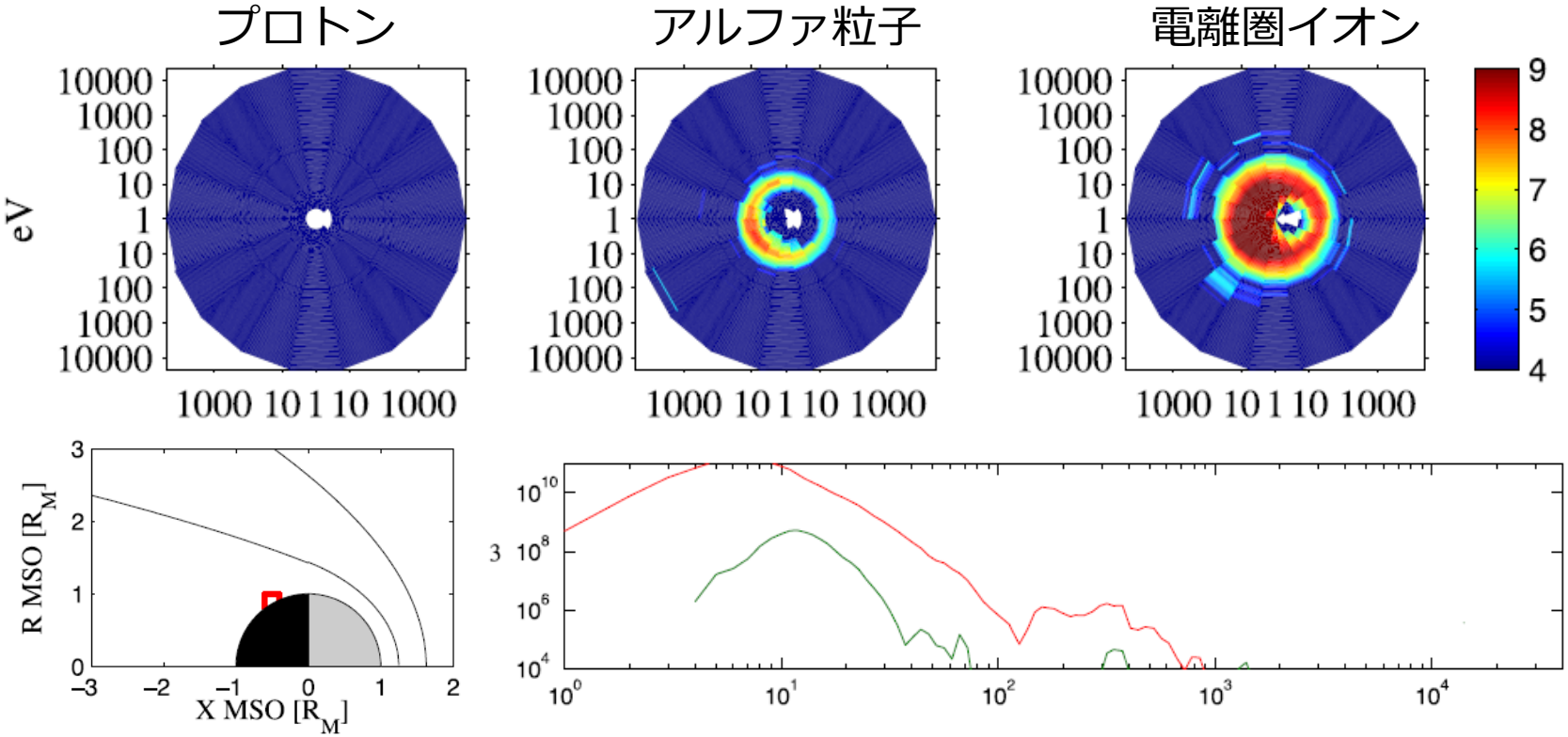
- 太陽風起源のイオンは見られない.
- 電離圏イオンは少なくとも100eV以上に加速され，反太陽方向に運動し，惑星から流出している.

4.2 Average distribution functions Point 2.



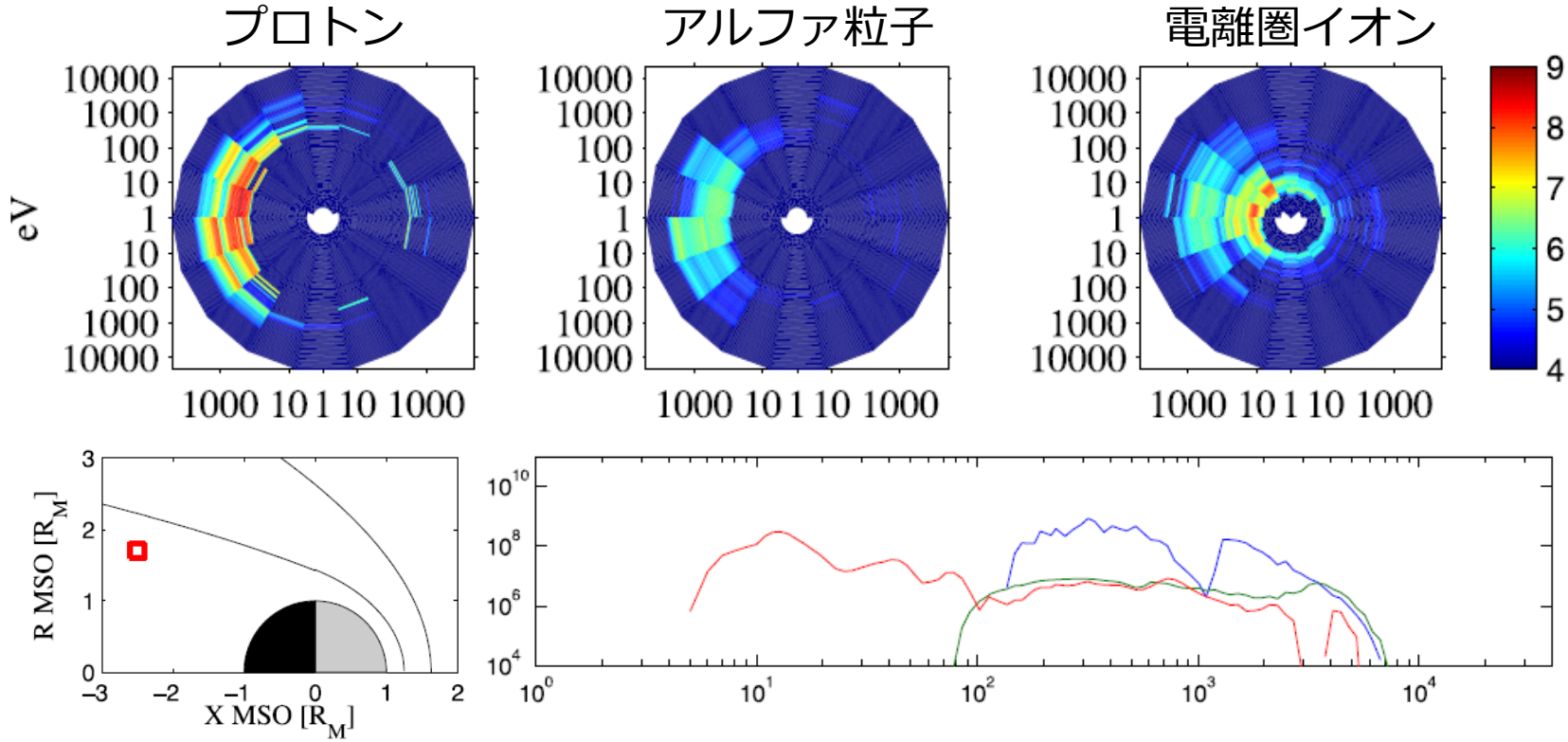
- 太陽風起源のイオンは少し観測される.
- 電離圏イオンは加速された成分に加えて，よりcoldな成分も観測される. フィッティングから求めた温度は5eV.
- coldなアルファ粒子はH_2^+かも. [*Lundin et al.*, 2009]

4.2 Average distribution functions Point 3.



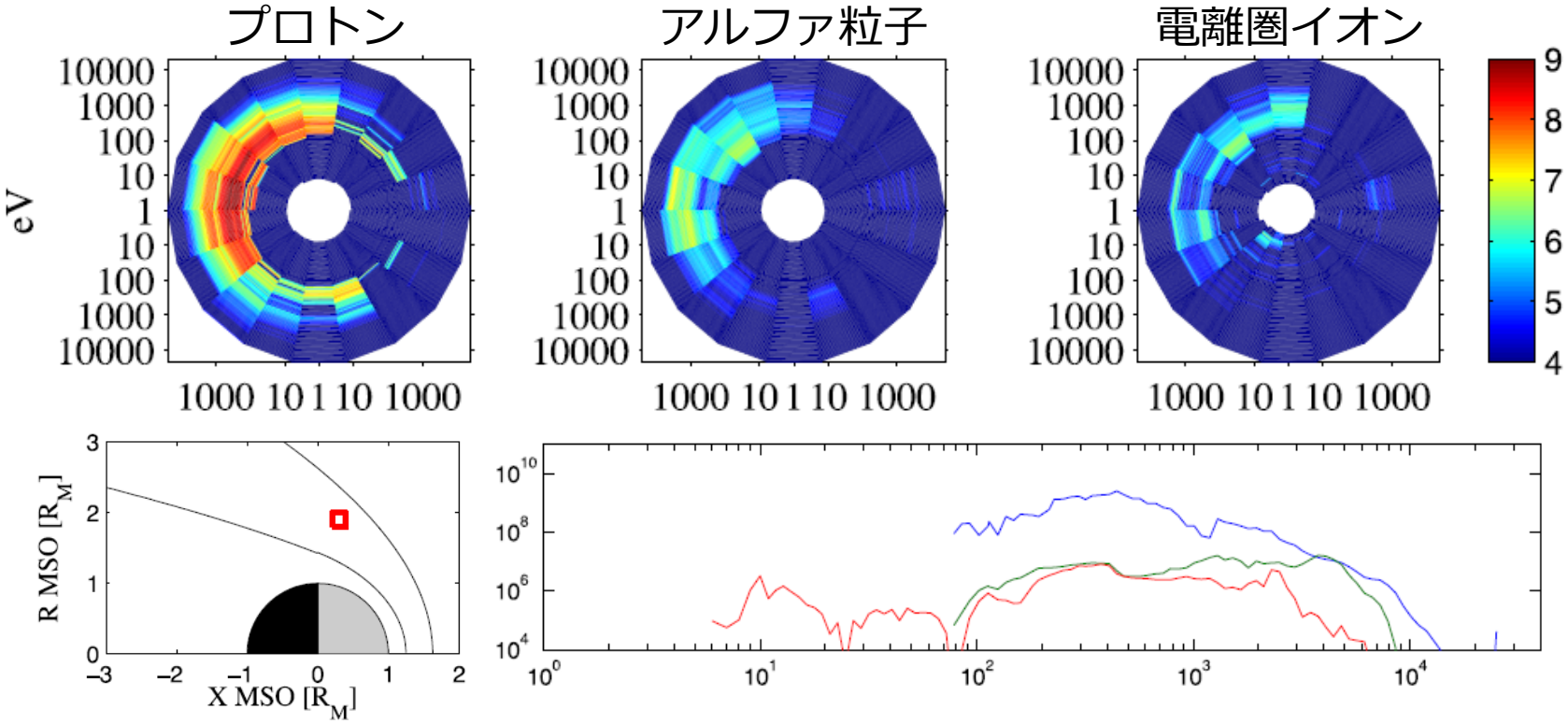
- 電離圏イオンはcoldな成分が支配的だが，加速された成分もほんの少し見られる．フィッティングから求めた温度は4eV.
- アルファ粒子もフラックスも比較的大きい．運動方向はややinward？太陽風起源のアルファ粒子が降り込んでる？

4.2 Average distribution functions Point 4.



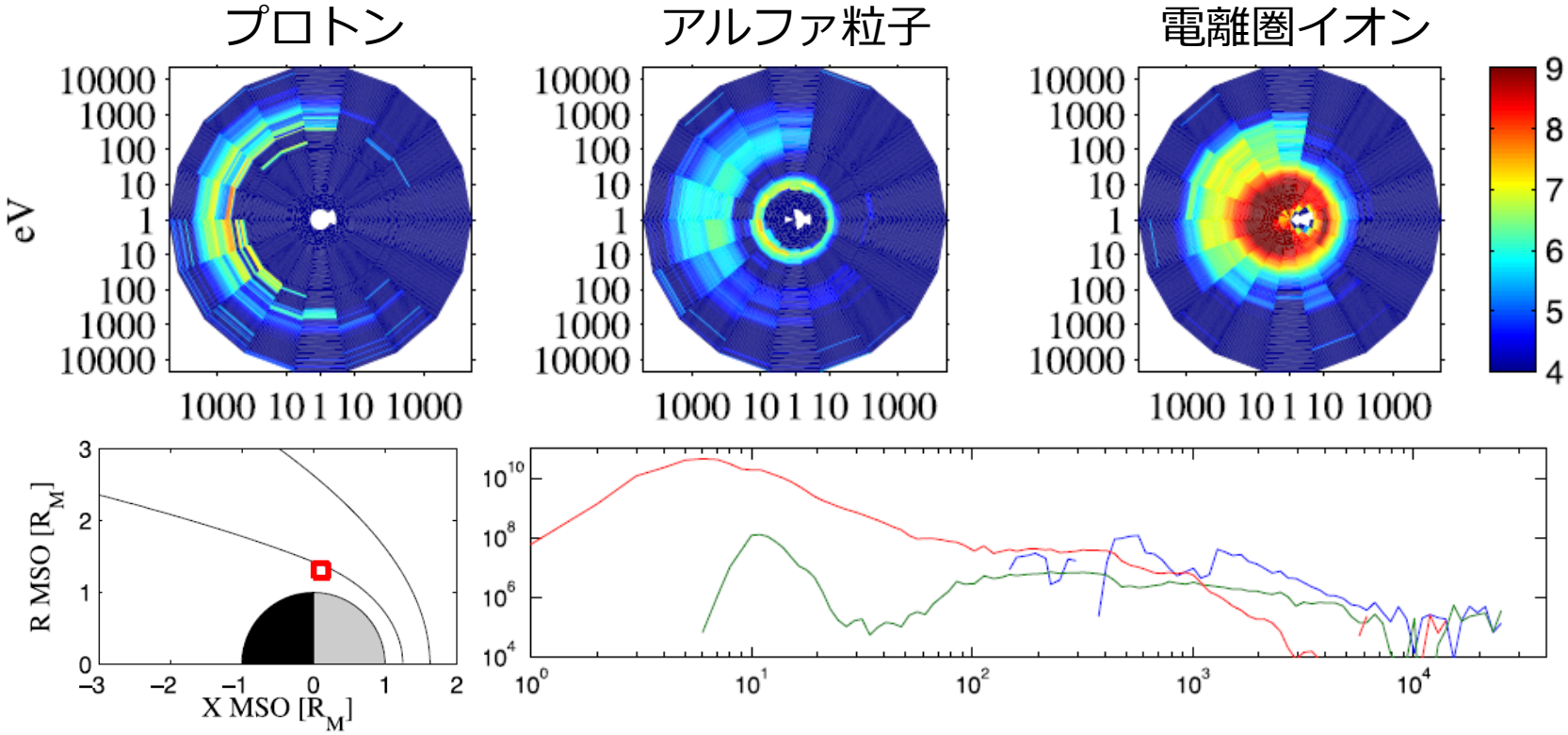
- 太陽風と電離圏イオンが混在した領域.
- 電離圏イオンはやや加速された成分が多い. フィッティングから求めた温度は8eV.
- 太陽風イオンのエネルギーは上流よりもnarrow.

4.2 Average distribution functions Point 5.



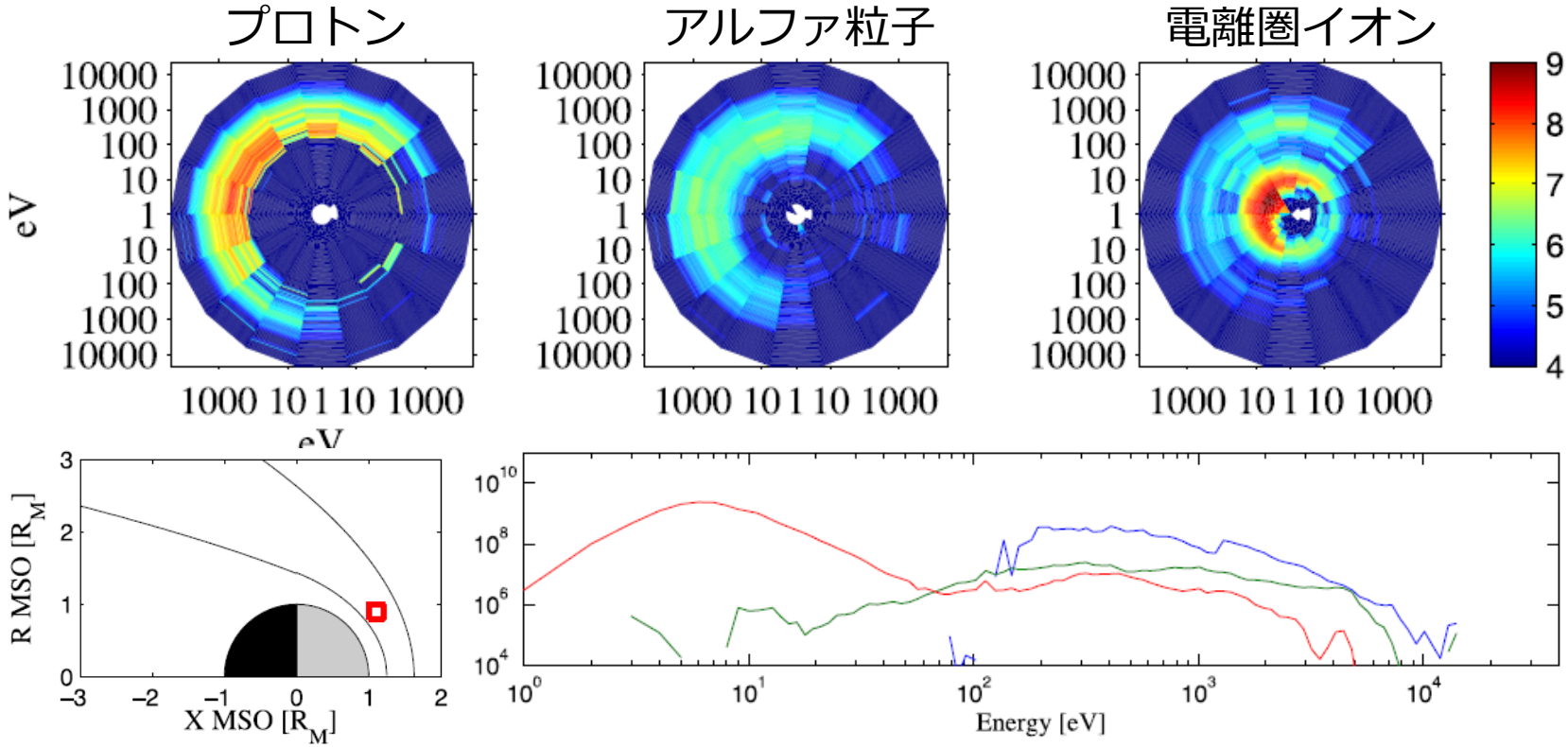
- シース領域で見られるような100eV--10keVまでの太陽風イオンが支配的に観測される.
- 電離圏イオンはradialに広がる方向に運動し，太陽風とまではいかないが数keVまで加速. エネルギー分布は似た形.

4.2 Average distribution functions Point 6.



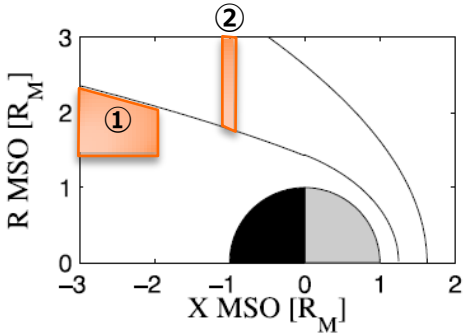
- シース領域で見られるような100eV--10keVまでの太陽風イオンが観測されるが，フラックスは5より小さい.
- 電離圏起源のcoldなイオンが観測され，radial/tailwardに運動する.
- アルファ粒子はシース起源に加えて，H_2^+と思われるcoldな成分も.

4.2 Average distribution functions Point 7.



- どの粒子種も火星の前面に衝突し，radial方向に広がっている.
- 電離圏イオンの流れる向きは火星と太陽を結ぶ線に対して，ほぼ垂直である.
- 電離圏イオンの一部は惑星に降り込んでおり，その大きさは平均で 0.4×10^{23} #/s.

4.3 Co-occurrence of heavy and solar wind origin ions

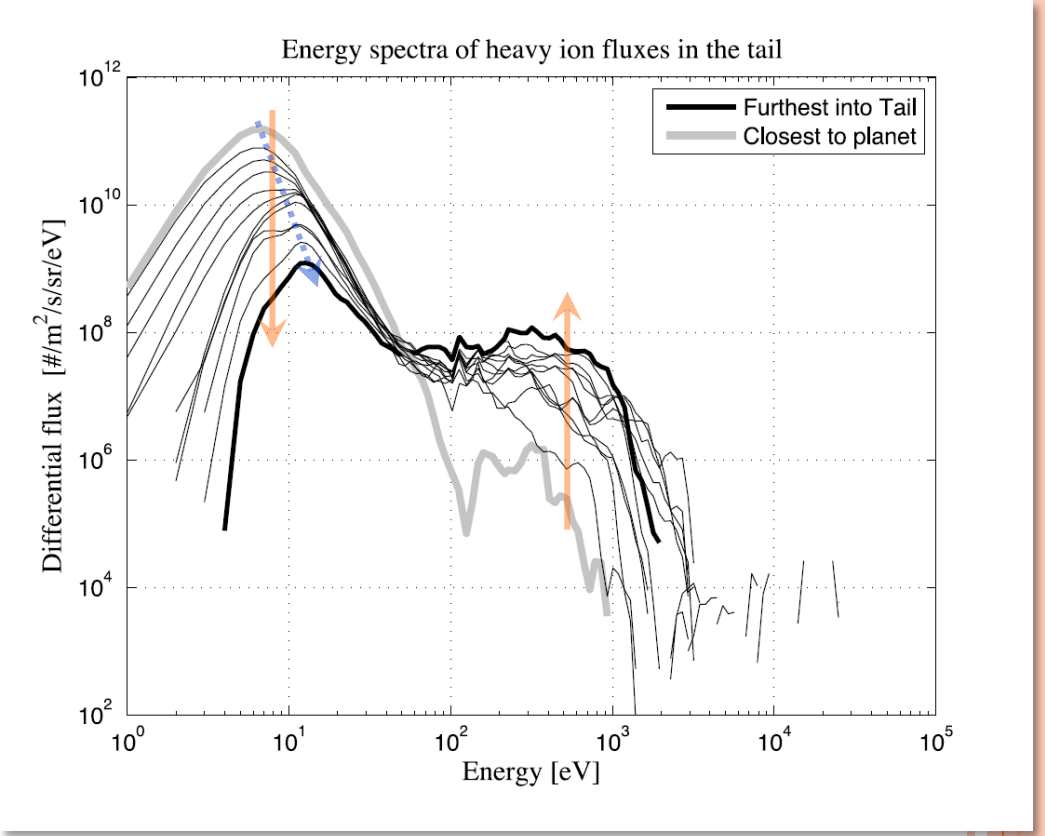


	プロトンのみ	重イオンのみ	両方
Outer tail ①	45 %	23 %	32 %
X=-1 ② sunward シース領域	57 %	5 %	37 %

- イオン質量分析器の時間分解能とプロトンのコンタミ問題が原因で，outer tail領域でIMBの位置が時間的に変動しているのか，定常的にモデルよりも低いのかはわからない.
- 太陽活動極小期においては，IMBの全体的な位置は比較したモデルよりも低高度に位置する.
- IMBの位置は太陽風条件によって変動に富む.

4.4 Acceleration of ions in the tail and the total flux in the tail

- 2成分が存在する.
- 電離圏のcoldなイオンのフラックスは惑星から離れると減少し，反対に加速された成分は徐々に増加する(オレンジ線).
- 低エネルギー成分のフラックスのピーク位置が高エネルギー側にシフトする(青線).
- X=-1Rm程度の位置で，エネルギー分布が平均的な分布の形状になる.

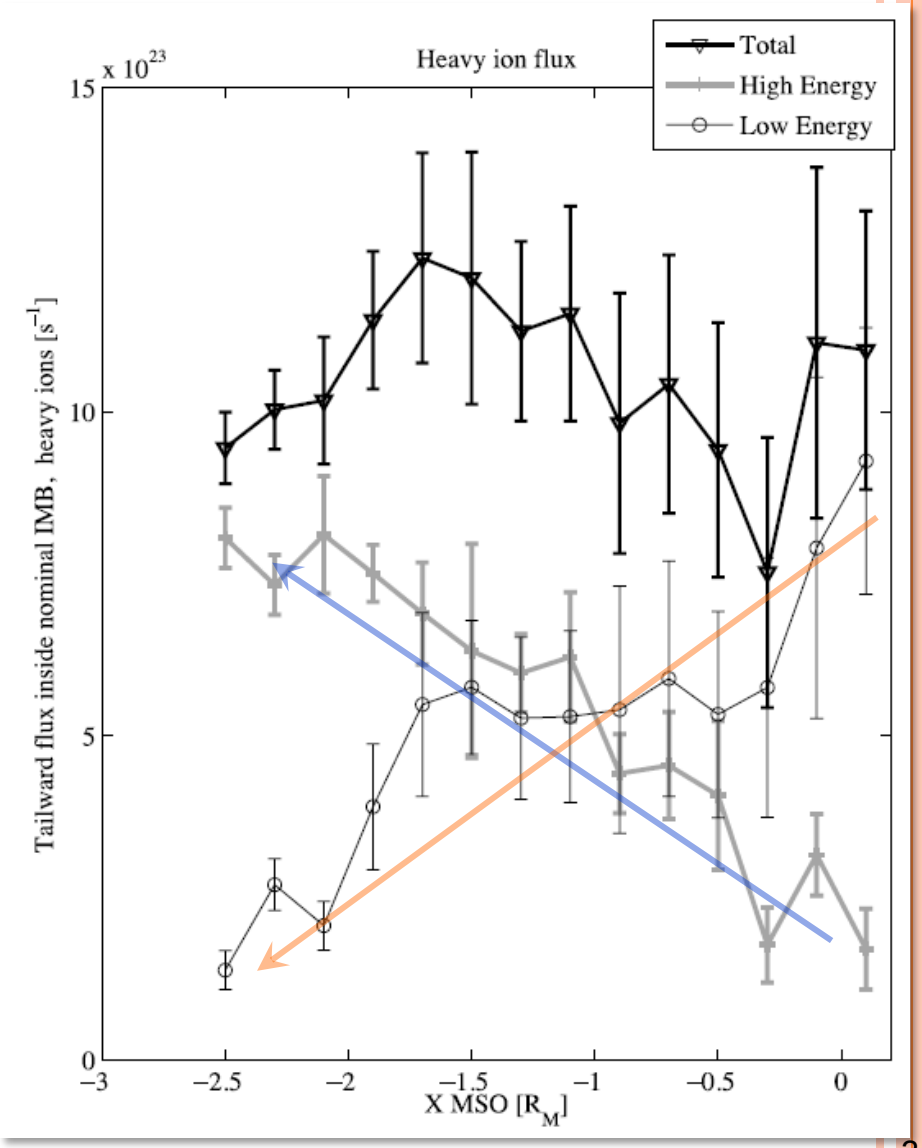


4.4 Acceleration of ions in the tail and the total flux in the tail

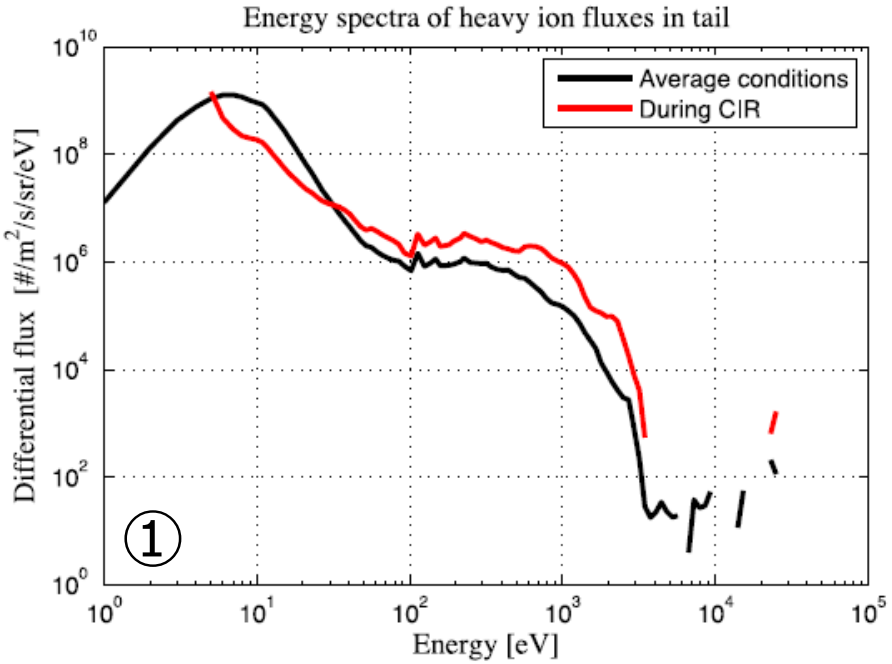
- Tailward fluxの積分量の変化.
- 惑星から離れるにつれて, coldな成分は減少し(オレンジ), 加速された成分は徐々に増加する(青).
- Total fluxはおよそ**Const.**

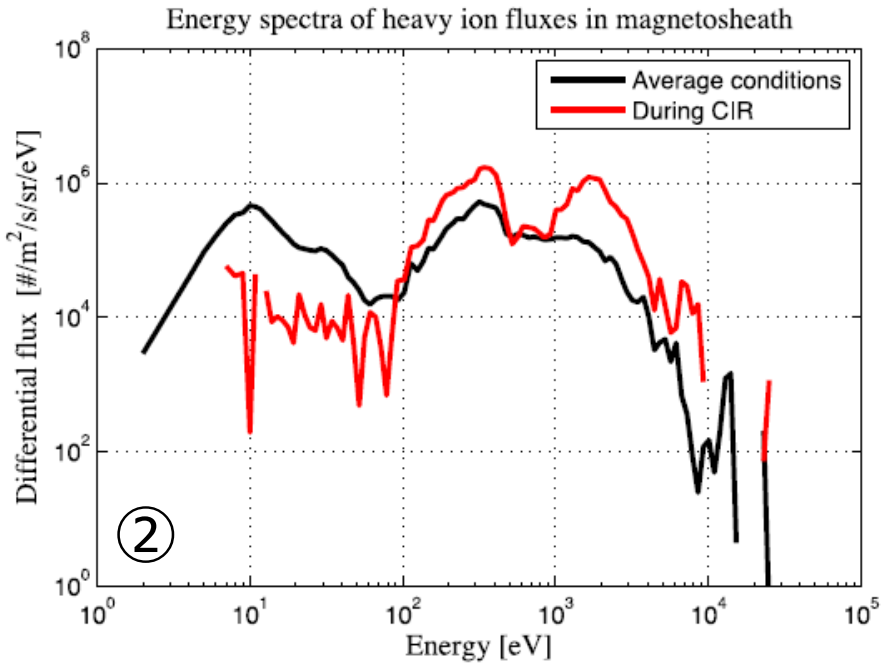
  X=-0.3Rmでフラックスが減少するのは統計量の問題.

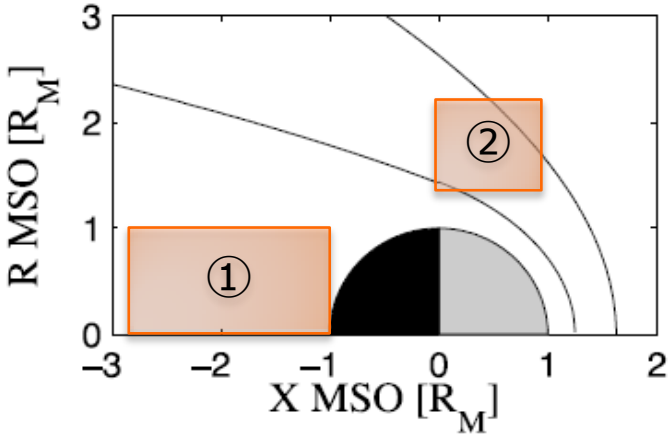
- Terminatorでのtailward fluxを測定すれば, 全流出量を見積もることが可能？
- Tras-terminator flowがtailで見られるイオンの主要なソース.



4.5 Acceleration of heavy ions during CIR events







- *Edberg et al.*, [2010]と同じイベントを使って比較.
- 平均的にはCIR通過時と通常時において，エネルギー分布の形に有意な変化は見られず．やや高エネルギー成分が多いか.

5. Discussion
5.1. Distribution functions

- 電離圏のcoldなイオンの速度分布関数はtailward drifting Maxweillanの形をしている.
- 一部のcold成分はsunwardを速度をもっているが，その原因は背景磁場による旋回運動や波動粒子相互作用によるheatingが考えられる. heatingにはAlfven波の寄与も考えられる.
- tailwardに運動するイオンのエネルギー分布の変化の特徴から，加速はtail全体で起きているが，YZ面の特定の領域で起きている.
- シース領域で見られた重イオンの生成機構については確定的なことは言えない.
- 今回の統計解析からは，tail領域においてsunward (Marsward) flowは見られなかった.

5. Discussion

5.2 Dynamics and mixing of ion populations

- IMBの位置について，解析を行った期間においては，X=-2Rmより遠いところでは*Trotignon et al.* [2006]のモデルは正しくない.
- BSの位置については，解析を行った期間においては，*Trotignon et al.* [2006]のモデルよりも低高度にありそう.
- いずれにしても火星のプラズマ境界の位置は，上流の太陽風条件や太陽活動度によって，大きく変動することが予想される.
- 電離圏起源の重イオンはIMBの外側の高高度の領域まで，ある程度存在している可能性がある.

5. Discussion
5.3 Trans-terminator flow

- 本論文でのtrans-terminator flowの大きさは，全流出フラックス程度の10^{24} #/sであったが，これは*Fraenz et al*. [2010] (第12回勉強会 金尾さん紹介)でのフラックスよりも1桁程度小さい.

  以下に，その原因を列挙する.

  - *Fraenz et al*. [2010]で紹介された7イベントが特殊.
  - *Fraenz et al*. [2010]では流出フラックスを求めるときにterminator領域全体で定常的に発生していることを仮定したが， trans-terminator flowは非定常・非対称的に起きる. 流出を非対称にさせる要因は容易に挙げられる(例えば太陽風電場，磁気異常帯， etc…).
  - 10eV以下のような低エネルギーイオンはMEXでは完全に観測できない.衛星電位も測定していない.

6. Conclusions
本論文のまとめ (+ 個人的な感想)

- 2007--2011年の4年弱に及ぶMars Express(MEX)衛星が観測した太陽風と惑星起源イオンの分布関数を統計的に調べることで，太陽活動極小期における火星プラズマ環境の典型的な描像を明らかにした.
- 火星近傍の電離圏で太陽風から運動量・エネルギーをもらった惑星起源イオンがtail方向に流出するという典型的な火星－太陽風相互作用の様相が確認された.
- 本研究がMEX衛星のプラズマ観測器群で得られたデータを使って踏み込むことのできる限界に近い.
  - 磁場観測なし.
  - 視野干渉によって一部が欠けた速度分布関数.
  - 衛星電位を測定していない.
- MEX衛星で踏み込むことのできない大気流出の物理機構の解明が火星－太陽風相互作用における研究の最重要課題であり，MAVENや我々のWSが計画しているミッションをはじめとした，次期火星探査ミッションの重要性は高い.

End