



Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN (MAVEN) Mission

MAVEN observations of the response of Mars
to an interplanetary coronal mass ejection

Jakosky (+92 coauthors) [2015, Science]

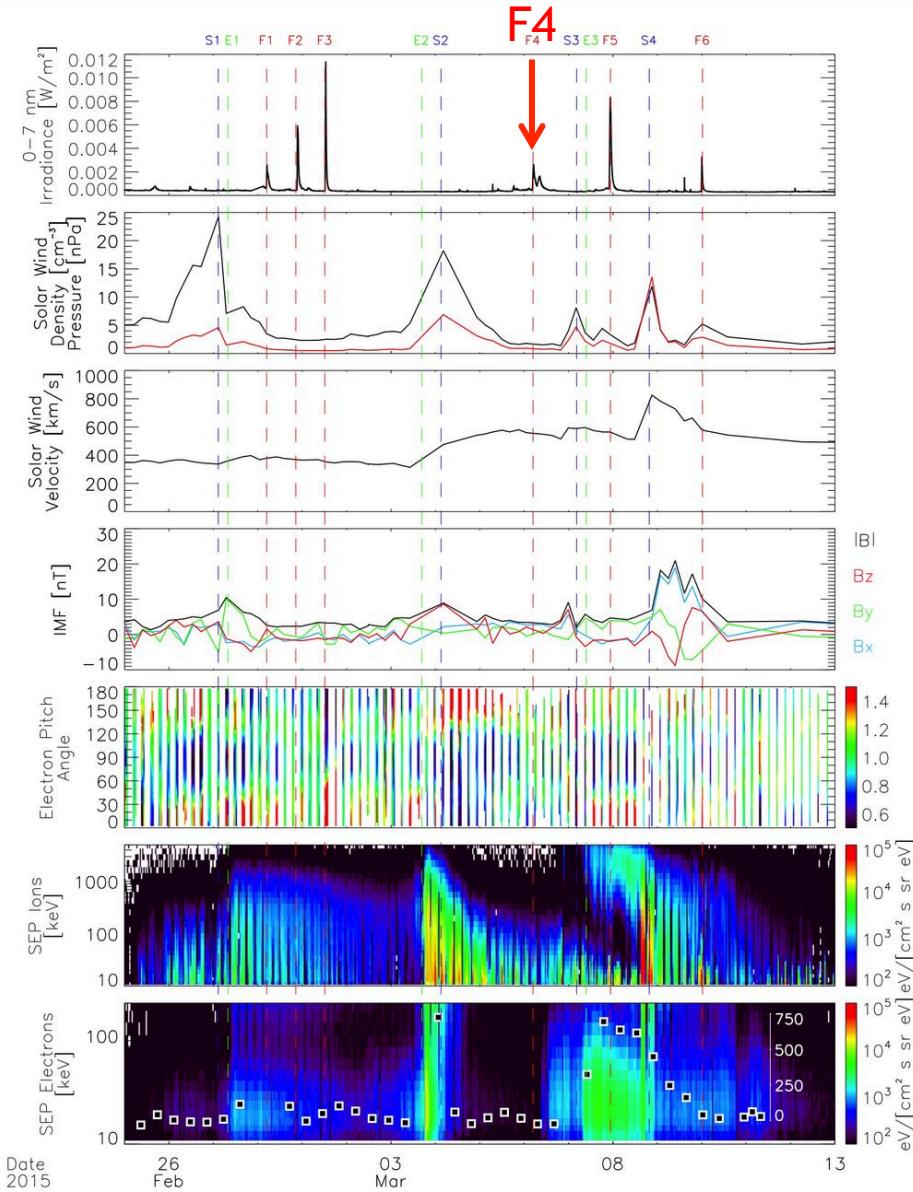
原 拓也 (UCB-SSL)

論文概要



- 2015年3月上旬にコロナ質量放出(ICME)に伴う太陽風擾乱構造をMAVENが火星周回軌道上で観測した。
- そのうち3月8日のイベントが最も激しく、太陽風速度は~825km/s, 動圧は~15nPa, 磁場強度は~20nTに達した。
- これらの太陽風パラメータもいづれもこれまでのMAVENによる観測で最大規模の値である。
- 本論文は、MAVENによる観測データを総合的に用いて、火星プラズマ環境のコロナ質量放出に対する応答特性を調べた結果をまとめたものである。
 - プラズマ境界の変化、ディフューズオーロラ(紫外発光)、イオンピックアップによるイオン流出量の増加
- 共著者としてMAVENの主要サイエンスチームメンバー全員が含まれた形で出版され、2015年11月のNASAのプレスリリースにて紹介された主内容の1つでもある。

Energetic input into the system: MAVENが観測した上流太陽風環境

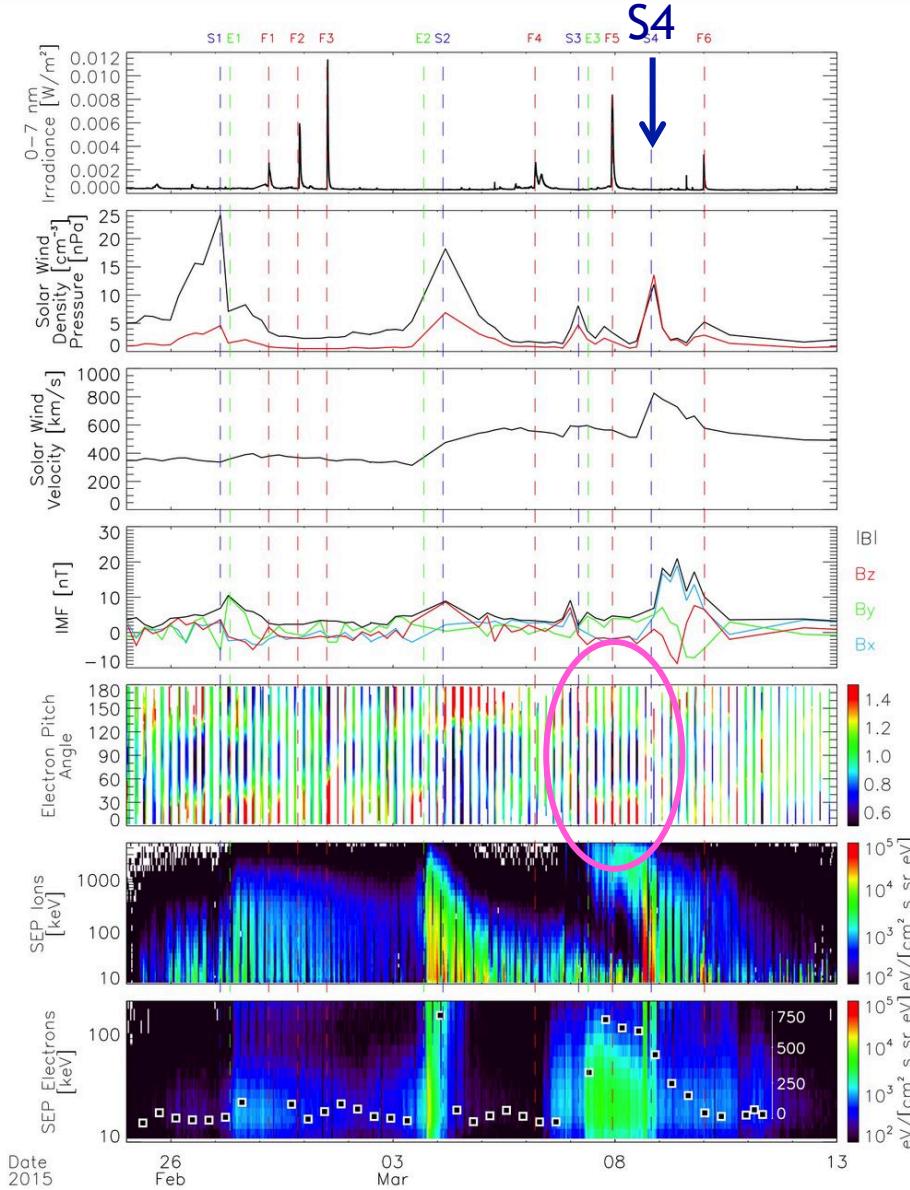


- 2015年2月25日~3月13日のMAVENが観測した上流太陽風環境.
- 3月6日5時UT頃に発生したフレア(F4)が当該期間で最も激しい太陽風擾乱を発生させた.
- フレア(F4)に伴うコロナ質量放出によって、ピーク時には速度~825km/s, 動圧~15nPa, 磁場強度~20nTという太陽風が火星に到来した(S4イベント).

c.f.

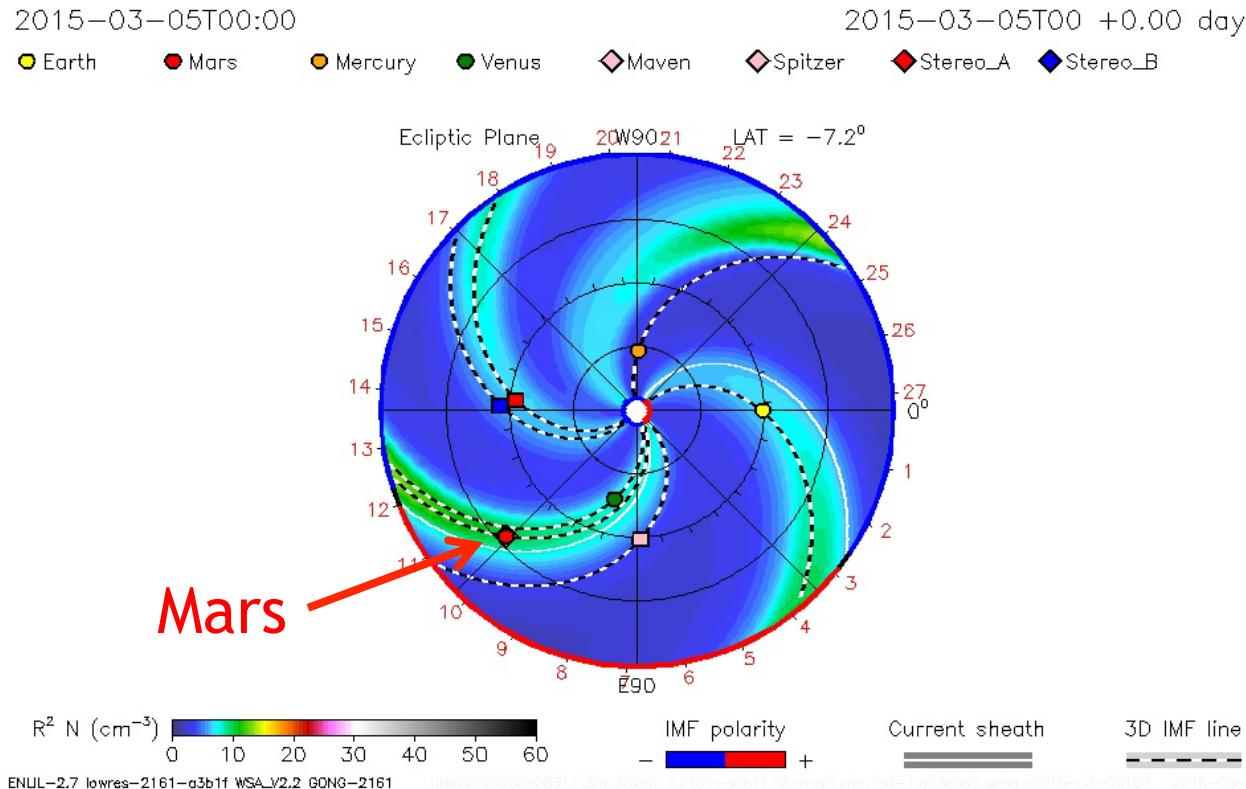
- 2003年ハロウィンイベント(MGS動圧プロキシに基づく):
 - ~33nPa(ピーク時), ~7nPa(平均)
- MAVEN観測に基づく平均太陽風(14年11月下旬~15年3月下旬):
 - ~1nPa, ~4nT.

Energetic input into the system: MAVENが観測した上流太陽風環境



- S4イベントについて、
3月8日15:20UT頃にCMEに伴う
IP Shockを観測する(MAG).
- 電子(SWEA)のピッチ角分布は
S3-S4の間にcounterstreaming
の成分を観測した
→ 磁力線の両端が太陽に
接続している.
- 当該期間のCMEに呼応して、
SEP フラックスの増加が3度確
認された(E1~E3).

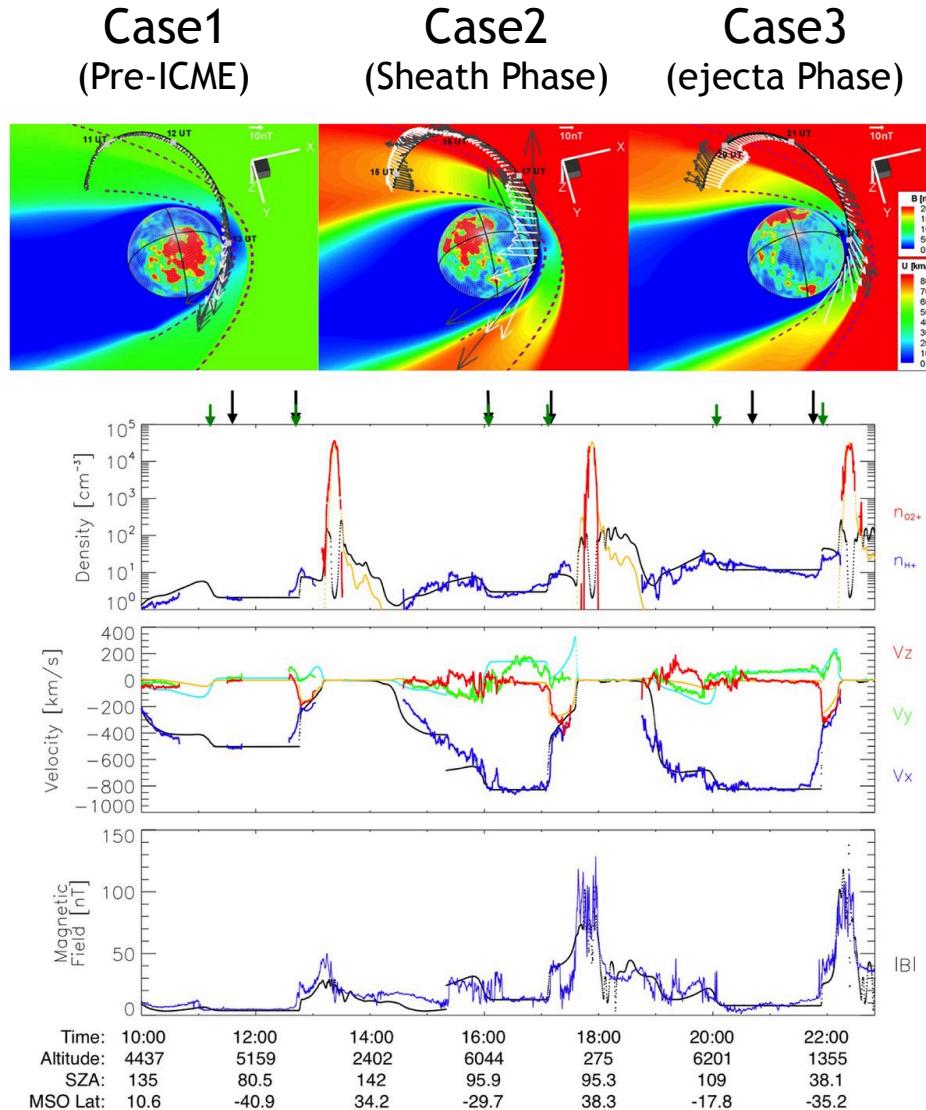
Energetic input into the system: WSA-ENLIL(太陽圏モデル)による予測



※
この火星方向のCMEを引き起こした活動領域は、後に現在の太陽サイクルで最大規模の磁気嵐(St. Patrickイベント)も発生させた。

- 3月8日のイベントでは、2つ独立したCMEが火星に到達する途中で合体するような様相が見られる。
- 先行するCMEは3月6日 4:49UTに発生し、初速が~900km/sで、後続のCMEが3月6日 7:12UTに発生し、初速は~1500km/sと推定される。
- モデルでは、3月8日 11:40UT頃に火星に到達すると予測された。

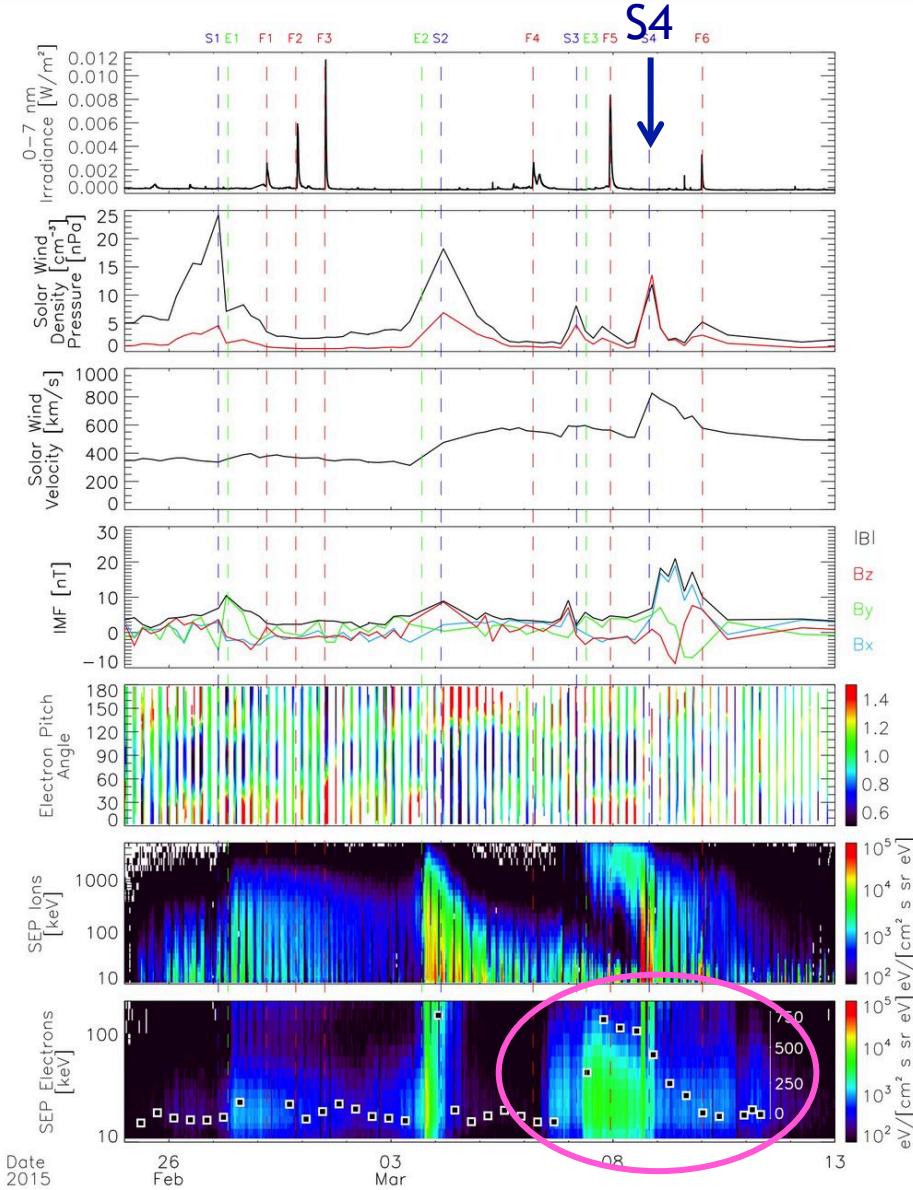
Response of the system: グローバルMHDシミュレーションとの比較



Multispecies MHD model [Ma+ 2004, 2015]

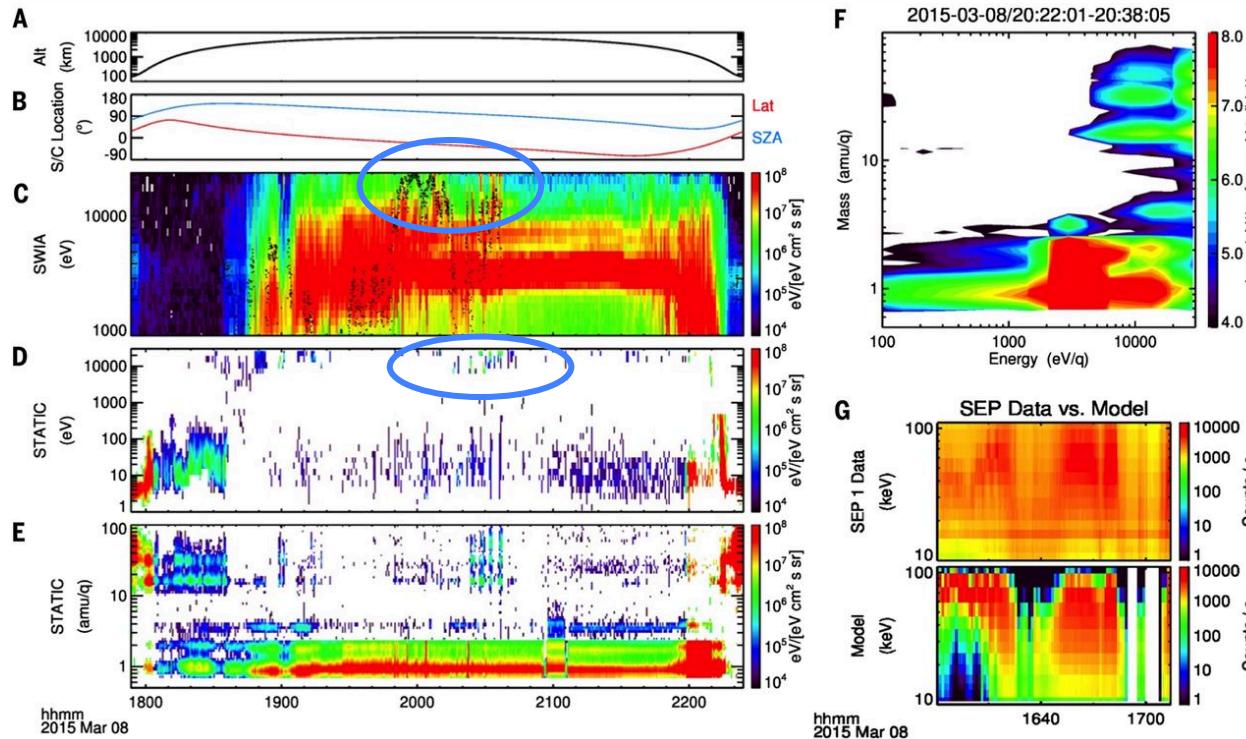
- シミュレーション結果は MAVENのその場観測データと概ね一致している。
- Case3では、動圧が通常よりも1桁程度大きいため、バウショック・誘導磁気圏境界が通常より圧縮されている。
- シミュレーションは太陽風条件に入力として与えた静的モデルであるため、観測の細かな時空間変動の特徴までは再現できていない。
- このイベントに関するシミュレーション結果の論文は、他に2本GRLに出版されている。
 - C. Dong+ [2015], 多流体MHD
 - Curry+ [2015], テスト粒子

Response of the system: リモート観測結果



- SEP計測器によって観測された高エネルギー電子フラックスの増加に伴って、火星夜側で紫外発光(CO_2^+ UV doublet; 289nm)の増加がIUVSによって観測された。
- S4イベント時にはMAVENが火星夜側の近火点を通過するたびに、紫外発光の増加が継続的に検出された。
- 残留磁場近傍でMEX/SPICAMで観測されたディスクリートオーロラではなく、高エネルギー電子の降り込みに伴う広範囲で見られたディフューズオーロラである可能性が高い [Schneider+, 2015, Science].

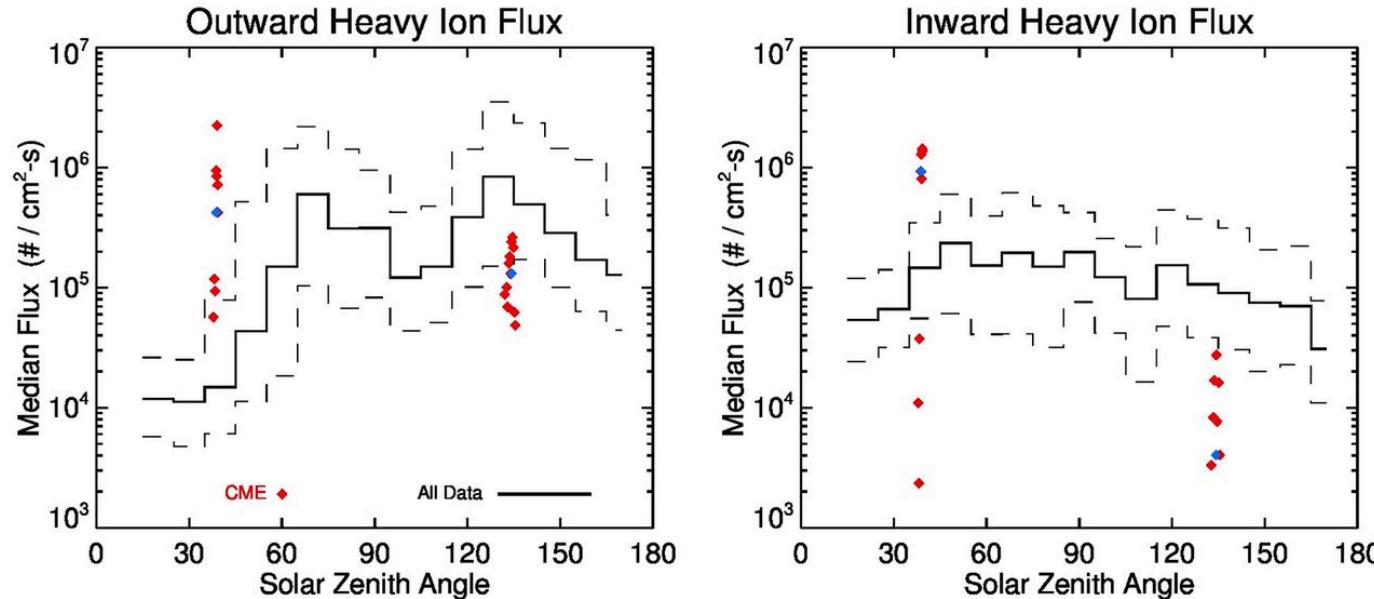
Response of the system: その場観測結果(ピックアップイオンの増加)



※
CMEに伴うIP Shock
通過直後の
outbounding pass
における
MAVENのプラズマ観測

- ーカルの-VxB電場によって加速されたピックアップイオン(O^+ , O_2^+)が通常の太陽風条件下よりも多くSWIA/STATICで観測された。
- エネルギーが~70keVを超えるピックアップ酸素イオンがSEP計測器によって検出された。
- Rahmati+ [2014, 2015]のシミュレーションとよく一致している(panel G).

Loss to space: 衛星観測に基づくイオン流出フラックスの推定



- 衛星が1.25-1.45Rmを飛行した期間のSTATICのデータを用いて、惑星起源イオン(25eV以上)の正味の流出フラックスを計算した(基本的なアイディアはBrain+ [2015]と同じである).
- CME通過中は、昼側での流出フラックスが平均よりも増加し、夜側では平均よりも減少しているように見える。
- CME通過中の短期間の観測データからは、全イオン流出率を求めるには不確定性が大きい。

Loss to space: シミュレーションによる全イオン流出率の推定



	P_{SW} (nPa)	O^+ (s^{-1})	O_2^+ (s^{-1})	CO_2^+ (s^{-1})	Total (s^{-1})	Total (kg/s)
Case 1	0.9	6.4×10^{23}	7.7×10^{23}	4.9×10^{22}	1.46×10^{24}	0.06
Case 2	3.4	2.6×10^{24}	7.6×10^{24}	3.3×10^{23}	1.06×10^{25}	0.50
Case 3	13.4	1.96×10^{25}	1.32×10^{25}	6.3×10^{23}	3.34×10^{25}	1.27

- Ma+のMHDモデルによると, Case1(CME通過前)の通常時の全流出率は $1.5 \times 10^{24} s^{-1}$ で, 従来のMEXの推定[e.g., Lundin+, 2013]とも整合している.
- CMEが通過直後のCase2にでは $10^{25} s^{-1}$ まで増加し, Case1より動圧が15倍程度高くなったCase3では, $3 \times 10^{25} s^{-1}$ まで増加する.
→ この傾向は過去のMEX観測[Futaana+, 2008]とも整合的である.
(最近のMEXの統計解析では, イオン流出率が太陽風密度に
対して反相関するという結果もある[Ramstad+, 2015])
- 流出イオンの粒子種は, Case1, 2では O_2^+ , Case3では O^+ が最も多く,
このような傾向はMAVENの観測データからも見られる.
→ CME通過時は, O^+ の高高度での生成率が通常よりも増加した
ことが原因だと考えられる.

Conclusions and future observations: まとめ



- 2015年3月上旬にコロナ質量放出(ICME)に伴う太陽風擾乱構造を MAVENが火星周回軌道上で観測した.
- 3月8日15:20UT頃にICMEに伴うInterplanetary Shockを観測した後, 太陽風速度は~825km/sに上昇し, ピーク時には動圧は~15nPa, 磁場強度は~20nTに達した.
- ICME通過時には, プラズマ境界の圧縮, 高エネルギー電子によるディフューズオーロラ, ピックアップイオンの増加, イオン流出フラックスの増加がMAVENによって観測された.
- このような極端な太陽風条件下(Space Weather Event)における火星プラズマ環境を調べることは, MAVENミッションの主目的の1つである, 初期の火星における大気流出の形態を理解するための手がかりを与えてくれることが期待される.
- 太陽観測衛星(SOHO, SDO等), 太陽圏モデル(ENLIL)を組み合わせて, MAVENがICMEを観測したと結論付けられたイベントは現在までに, 全部で10例未満程度である. → We need more ICME events!