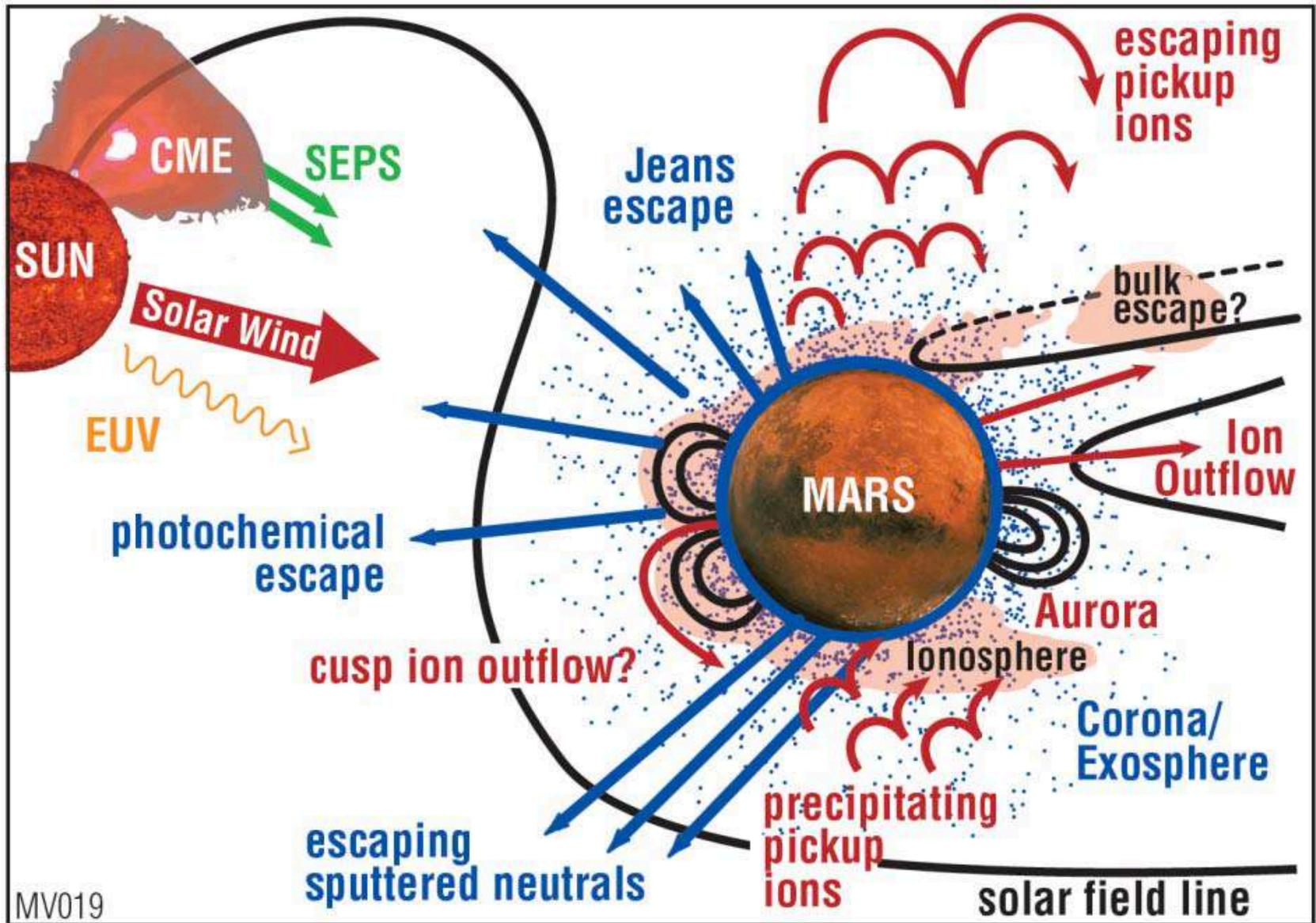


火星勉強会

1. Lundin et al. (2009). Atmospheric origin of cold ion escape from Mars.
2. Inui et al. (2018). Cold Dense Ion Outflow Observed in the Martian-Induced Magnetotail by MAVEN.

東京大学 M2 乾彰悟

Introduction



Introduction

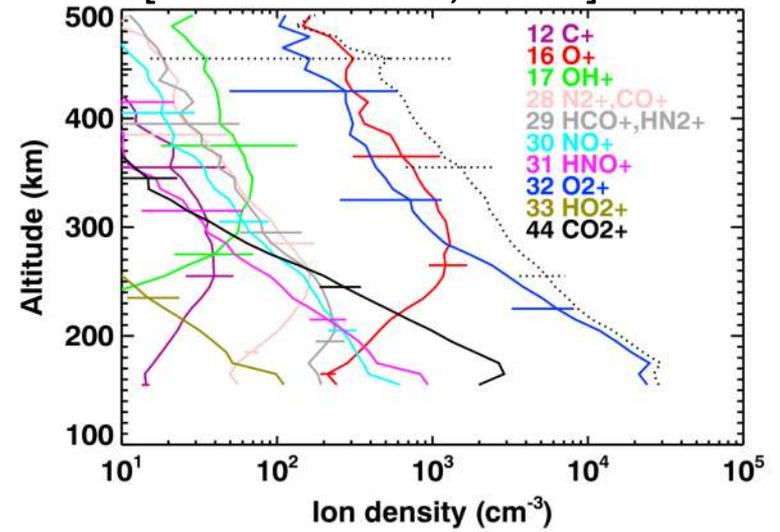
重イオン流出

- 主成分： O^+ 、 O_2^+
- 流出のソースは電離圏
- イオン比 → ソース高度

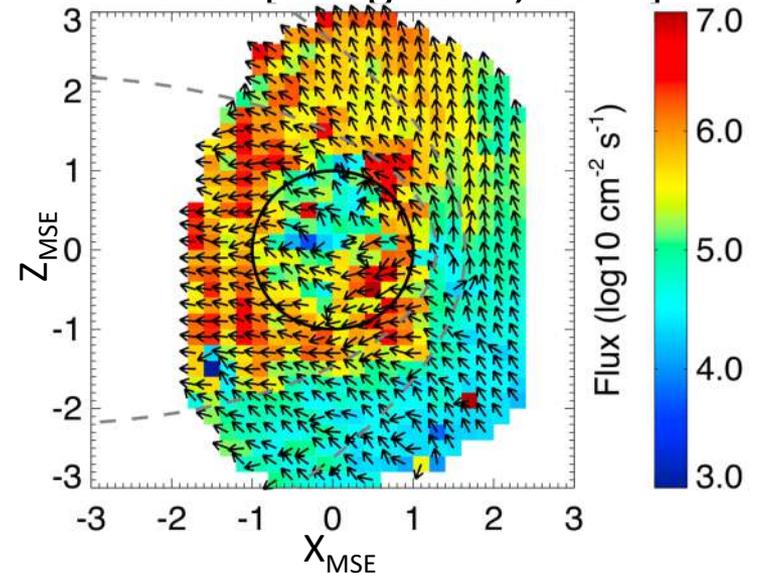
イオンの流出経路

- Tail flux
 - 低エネルギー
- Polar plume
 - 高エネルギー

Ion density profile
[Withers et al., 2015]



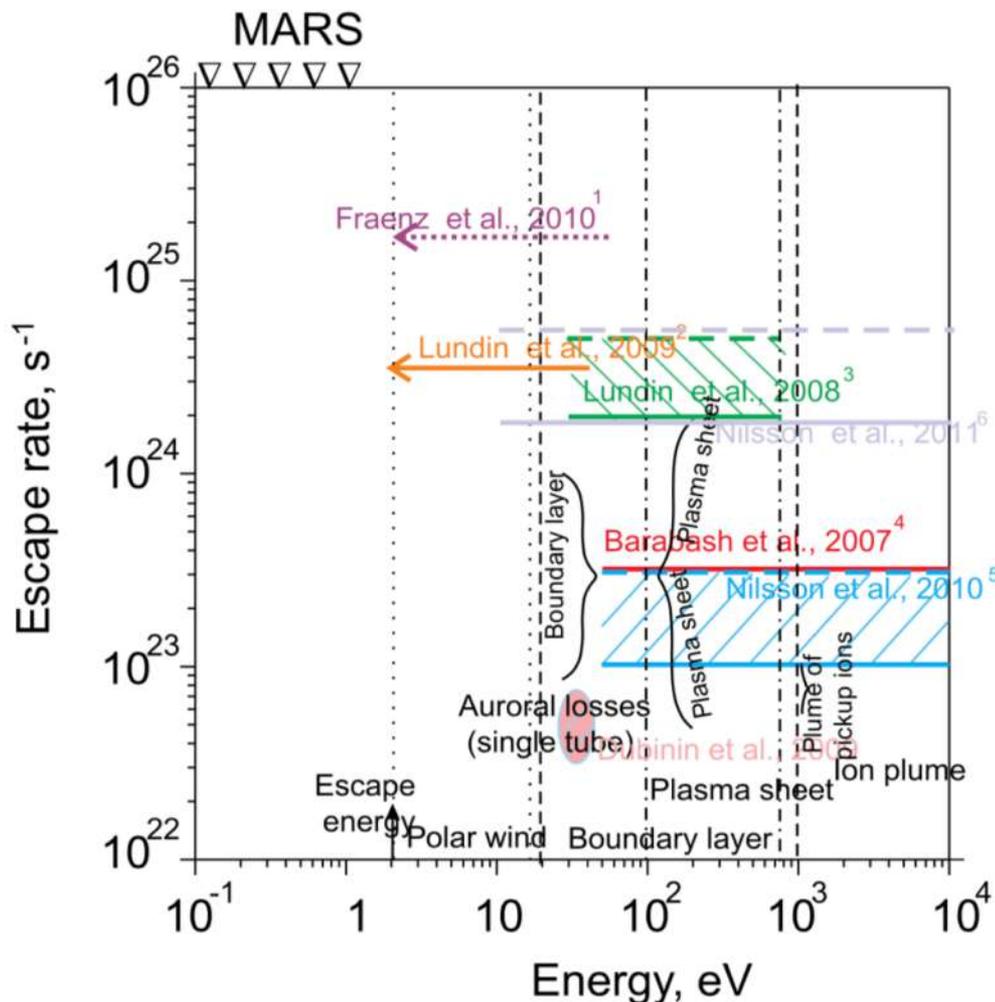
O^+ fluxes [Dong et al., 2015]



Introduction

- Cold ionを含めると、観測される流出量が大きくなる。
- イオンの流出に対して、Cold ionが重要な役割を果たす。

Summary of oxygen loss on Mars
[Dubinin et al., 2011]

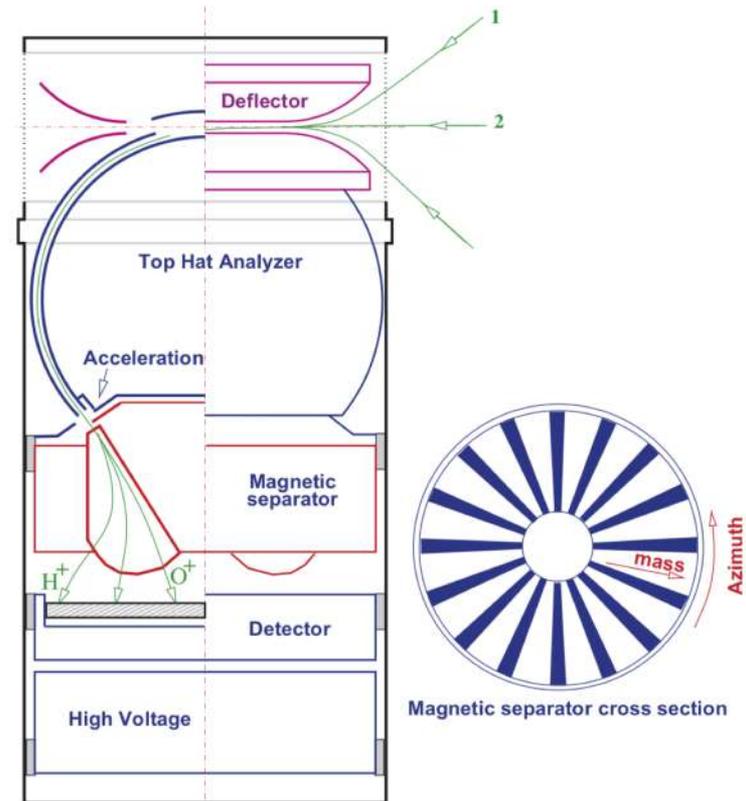
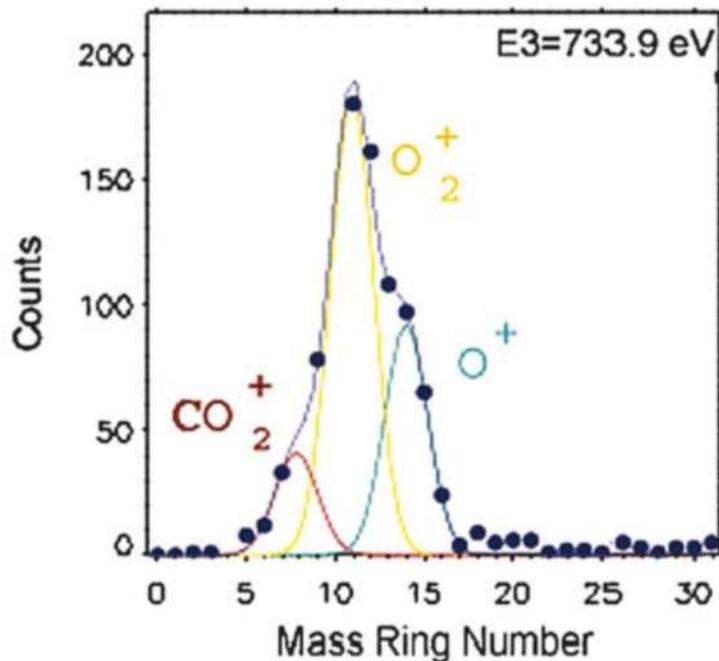


[Lundin et al., 2009]

Atmospheric origin of cold ion escape
from Mars

Instrument

- Mars Express (MEX)
 - ESAが打ち上げた衛星
- Imaging ion Mass Analyzer (IMA)
 - FOV: $90^\circ \times 360^\circ$
 - Energy range: 10eV - 30keV
 - Mass/Charge (m/q)で分解
 - m/q=1,2,4,16,32,64を詳細に解析



Ion mass analyzer
[Barabash et al., 2007]

Peak-fitting technique
[Carlsson et al., 2006]

Observation

- ~50eV以下のイオン
- 衛星電位-9Vを仮定

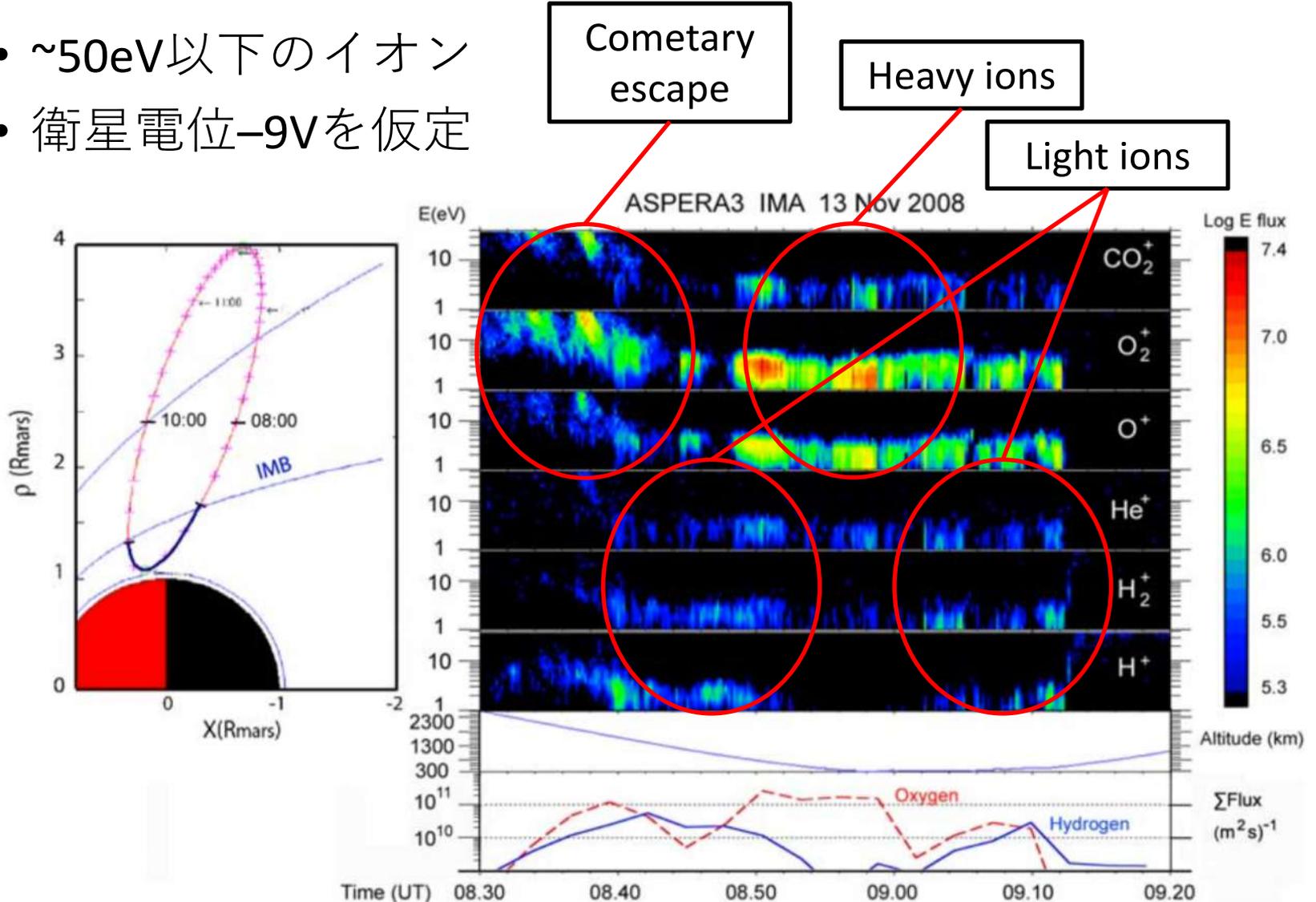


Figure 1. Energy time spectra

Observation

- 質量が大きいほどピークエネルギーは大きい。
- Mass/Charge=2にもピーク。
- H_2^+ は存在する。

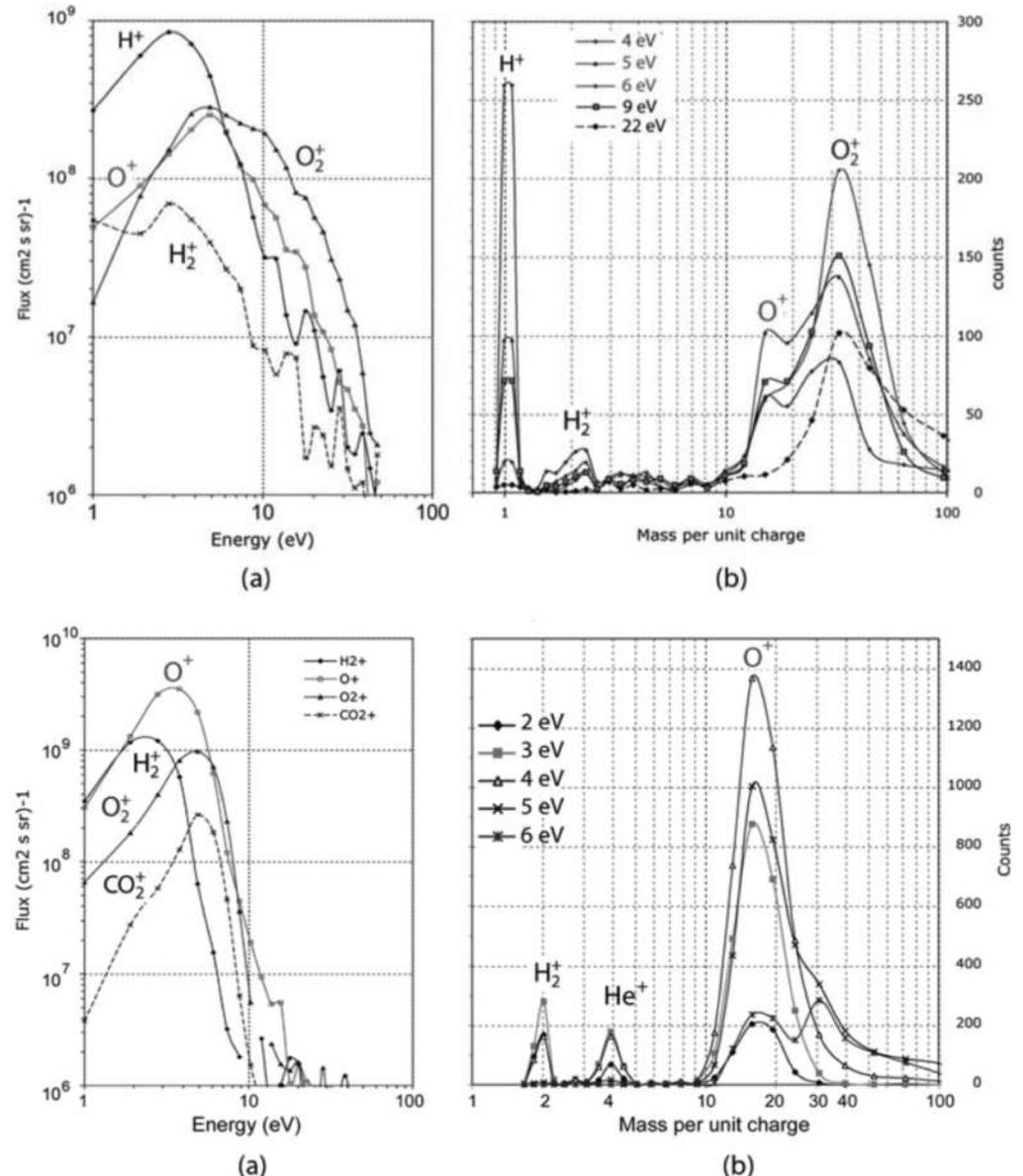


Figure 3&4. (a) Energy spectra and (b) mass per charge spectra

Observation

- $m/q=2$ の候補
 - D^+ , He^{++} , and H_2^+
- 密度比($N_{H^+}/N_{m/q=2}$)がH/D比より十分小さい。
→ D^+ ではない。
- Cold ion
→ He^{++} ではない。
- $m/q=2$ は H_2^+
- Cold ion outflowの主成分は H^+ , H_2^+ , O^+ , and O_2^+

Minimum H/D ratio ≈ 1000

[Krasnopolsky and Feldman, 2001]

$N_{H^+}/N_{m/q=2} \approx 57$

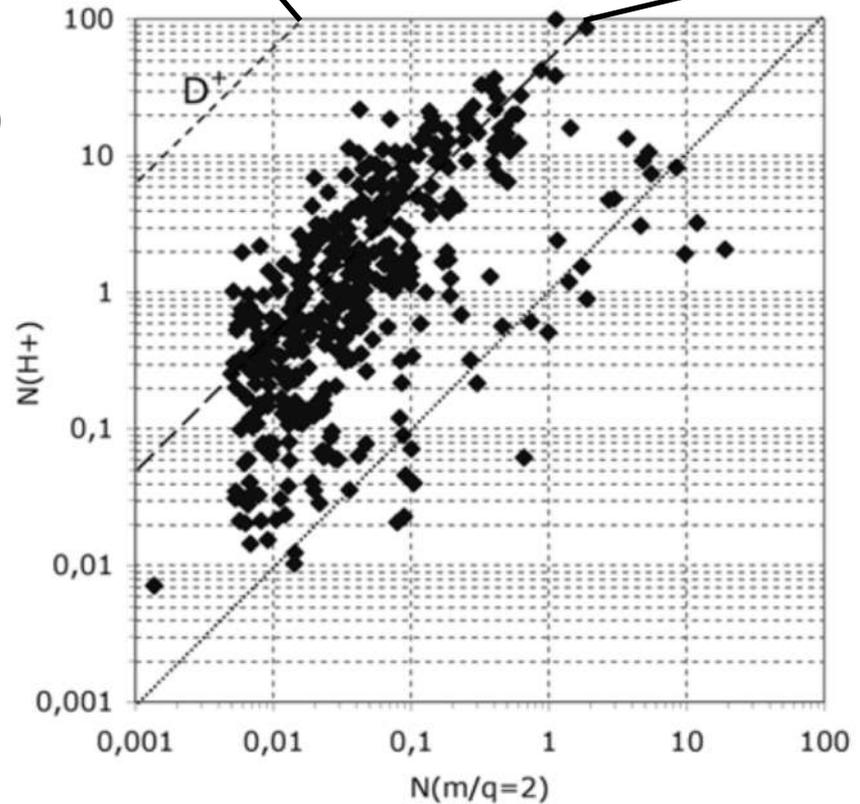


Figure 5. Scatter plot of low-energy H^+ and $m/q = 2$ ion number densities

Observation

フラックスが
大きい時のみ

Table 1. Average ion fluxes and ion escape from Mars

	O ⁺	O ₂ ⁺	O, O ₂	H ⁺	H ₂ ⁺	CO ₂ ⁺	H/O Average	H/O Simult.
Flux (m ⁻² s ⁻¹)	5.0·10 ¹⁰	3.3·10 ¹⁰	8.4·10 ¹⁰	5.1·10 ¹⁰	2.9·10 ⁹	8.3·10 ⁹	0.64	1.3
Samples	768	768	768	768	768	377	743	377
Escape (s ⁻¹) ^a	2.1·10 ²⁴	1.4·10 ²⁴	3.5·10 ²⁴	2.0·10 ²⁴	1.2·10 ²³	3.5·10 ²³		

- Escape ratesはtailでの $r=1.15R_M$ の領域を仮定して計算している。
- H/O比はおよそ1
- 酸素イオンの流出の起源はH₂O

Discussions

- H_2^+ フラックスを観測 ← New observation
- 酸素イオンの流出の起源は？
 - H_2O の分離によりHとOが生成され、Hは熱的に散逸する。
→酸素イオンの散逸は水の散逸の指標となりうる。
 - CO_2 が起源なら大量のCが残ってしまう。
 - H_2^+ と O_2^+ の相関は大きい。
→どちらも低高度から引き抜かれ加速された。
- 水素、酸素イオンの流出の起源は水である。
- この研究で得られたH/O比がおよそ1であることから、分離した水は大部分がイオンの形で流出している。
- ただし、土壌の酸化も考えると、水素の流出は多いかもしれない。

Conclusions

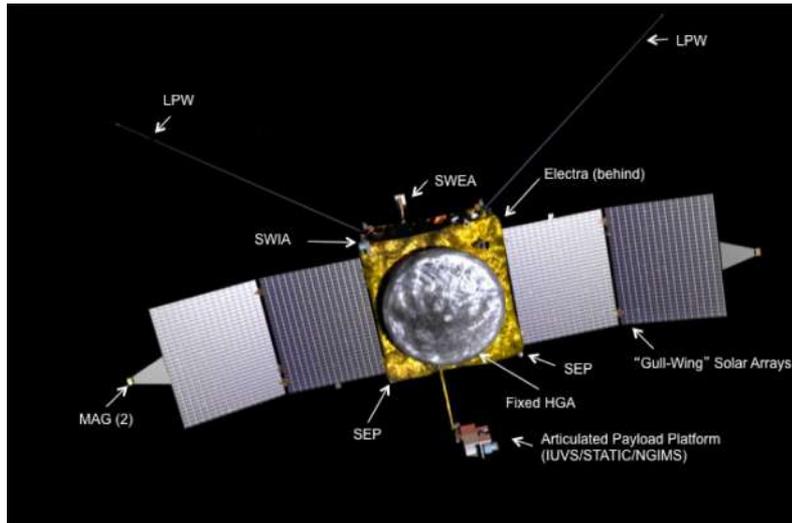
- 大きな H^+ と H_2^+ のフラックスが観測された。
 - 水素散逸の大部分をイオン流出が占めるときもある。
 - 金星では $\text{H}/\text{O}\approx 2$ より、水の散逸の大部分はイオン流出。
 - 分子イオンも散逸に大きく寄与する。
 - イオン散逸の主成分は H^+ , H_2^+ , O^+ , and O_2^+
 - 起源は水の光分解
-
- 太陽の活動が惑星からの水の散逸にとって重要。
 - 過去の火星からは、多くの水が散逸したと考えられる。

[Inui et al., 2018]

Cold Dense Ion Outflow Observed in
the Martian-Induced Magnetotail by
MAVEN

Instrument

MAVEN: Mars Atmosphere and Volatile Evolution



- NASAが打ち上げた探査機
- 2014年11月～
- 軌道傾斜角：75°
- 近火点：～150km
- 遠火点：～6200km
- 周期：～4.5時間

MAVENミッションの目的

- 上層大気や電離圏の理解
- 火星からの大気流出の理解
- 過去から現在までのtotal escapeの理解

Instrument

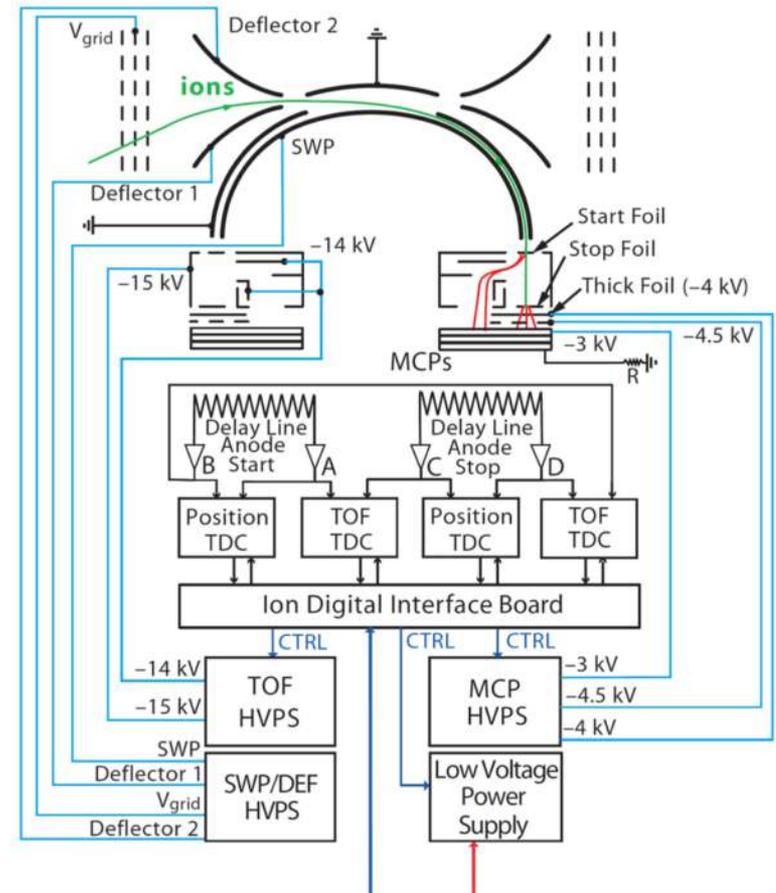
STATIC: Supra-Thermal And Thermal Ion Composition

- FOV: $90^\circ \times 360^\circ$
- Energy range: 0.1eV - 30keV
- Mass/Charge で分解
- Used data: 32E×64M
- イオンの組成や密度を計算する。

MAG: Magnetometer

SWIA: Solar Wind Ion Analyzer

- 太陽風の条件やTailでの磁場構造を調べる。



STATIC instrument
[McFadden et al., 2015]

Estimation of CO_2^+ density

概要

- O_2^+ のコンタミにより、 CO_2^+ の密度を正確に求めることができない。
- O_2^+ を対数正規分布で評価し、 O_2^+ の影響を取り除く。

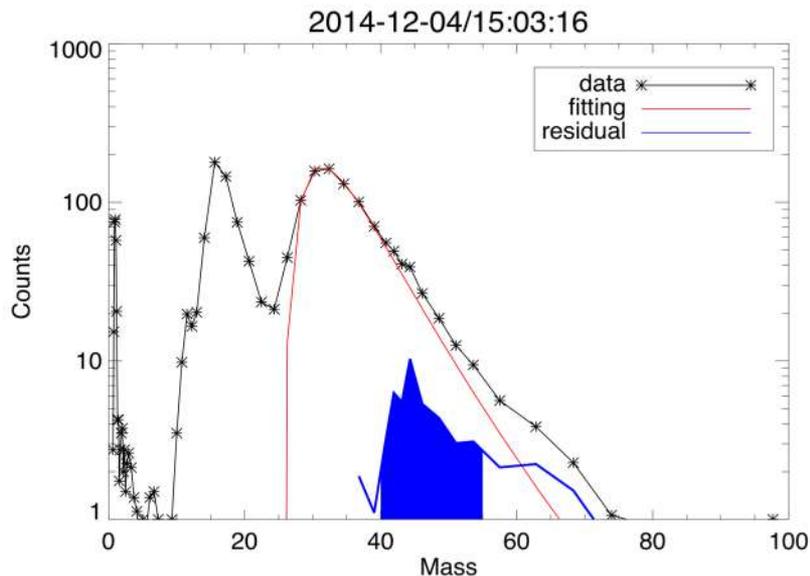
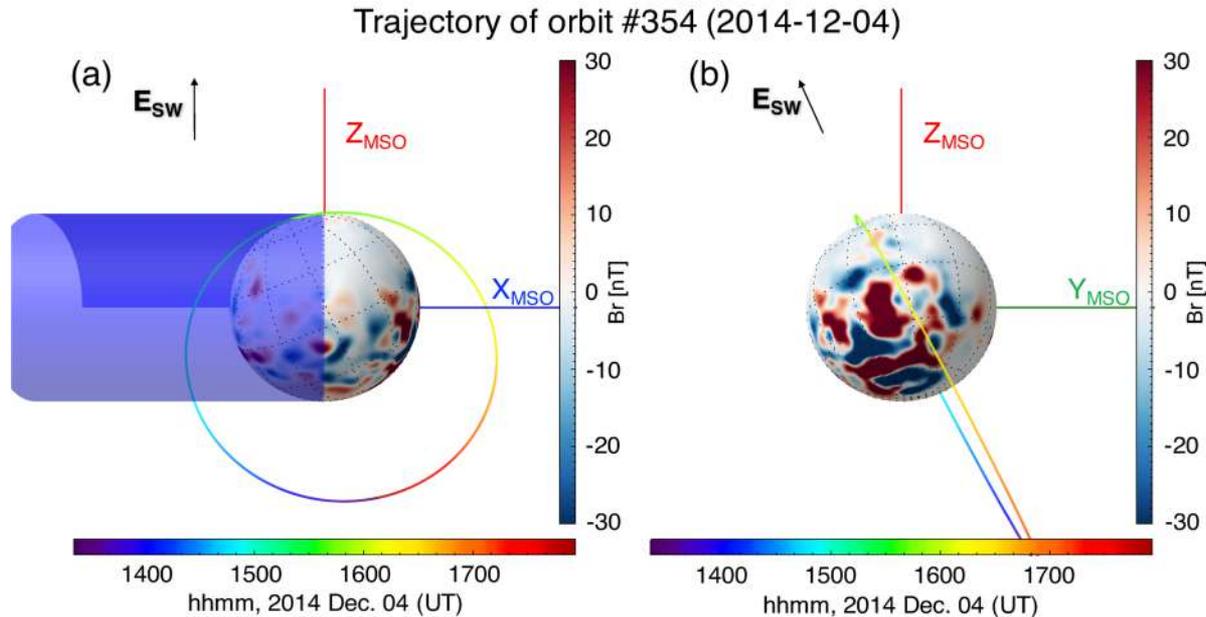


Figure 1. Example of derivation of CO_2^+ number density

手法

1. 2015年7月から2017年3月までのデータから、 CO_2^+ の寄与が小さいものを選ぶ。
2. 選ばれたデータをエネルギー毎に分けて足し合わせ、エネルギー毎の質量スペクトルを作る。
3. 対数正規分布でフィッティングを行い、エネルギー毎の O_2^+ の応答関数を決定する。
4. 得られた応答関数をデータから引くことで、 O_2^+ のコンタミを除いた CO_2^+ の密度を計算する。

Observation



- IMF [nT]

- $B_x = -0.9$

- $B_y = 2.9$

- $B_z = 1.9$

- E_{sw} と Z_{MSO} のなす角は 24°

- 北半球 $\approx +E$

- 南半球 $\approx -E$

Figure 2. Trajectory map of MAVEN orbit #354

- Wake領域におけるCold ion outflowに着目。
- Wake領域では、MAVEN探査機は南半球Dusk側から北半球Dawn側へ動いている。
- 強い地殻磁場は太陽側に存在している。

Observation

- 近火点付近において重イオンが多く観測される。
- 15:00付近では、高高度にも関わらず重イオンが観測されている。

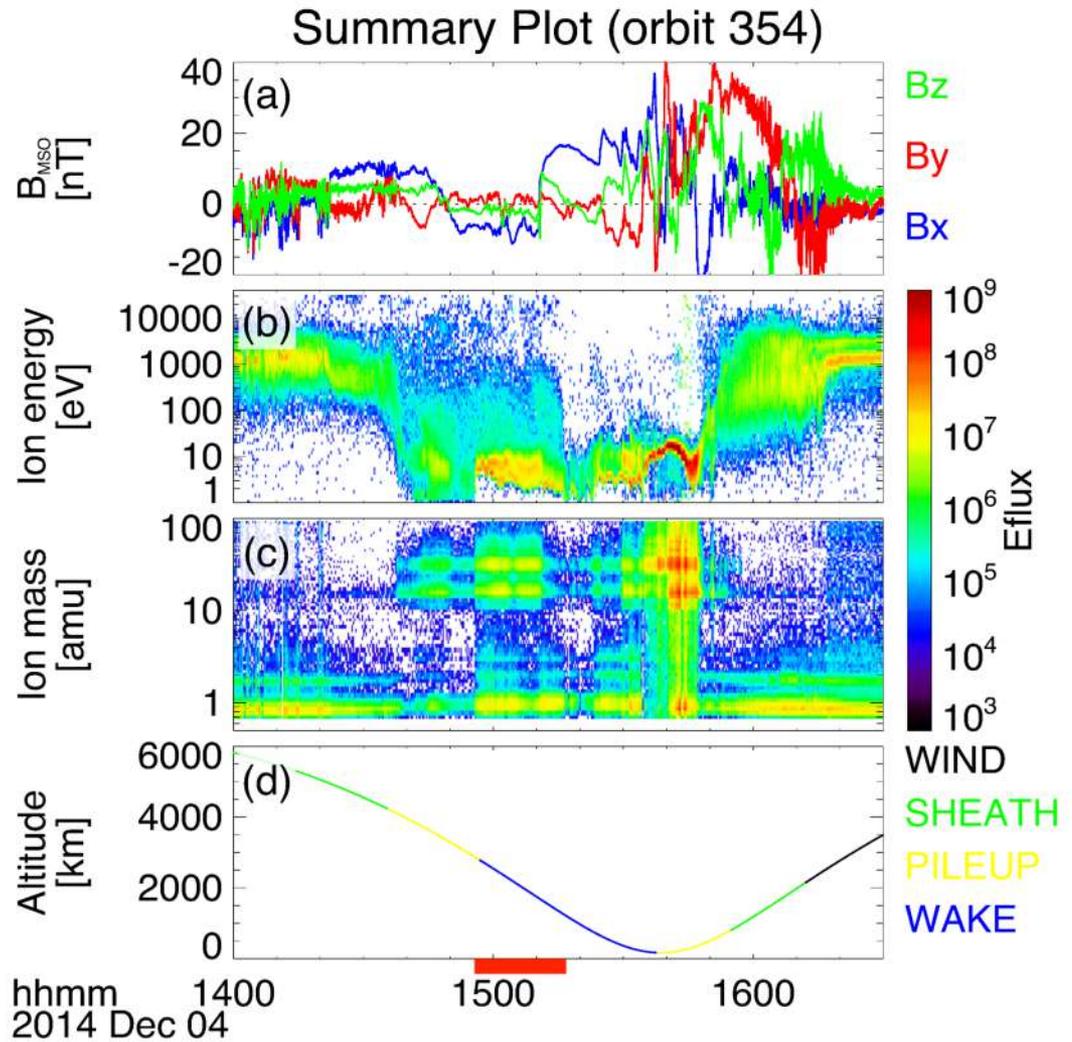
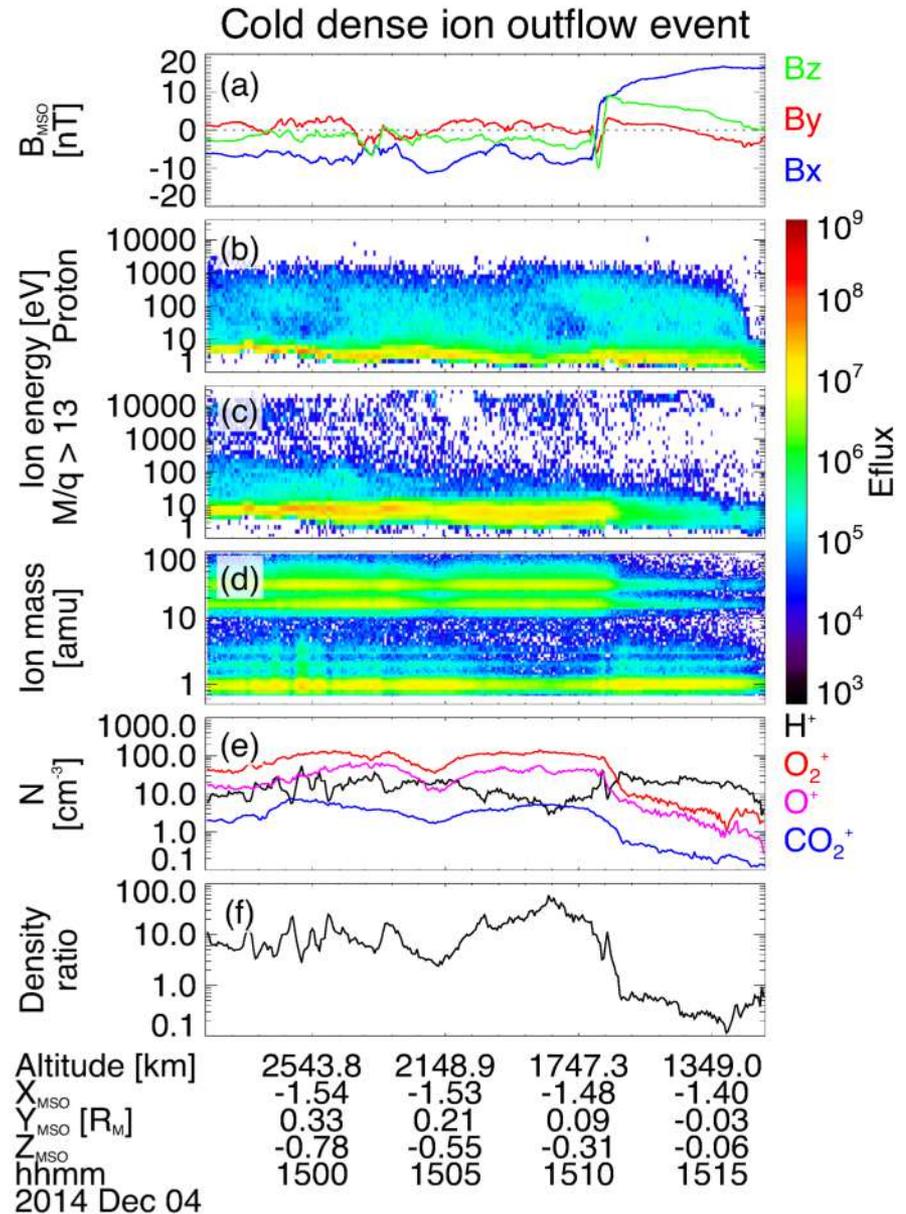


Figure 3. Summary plot of MAVEN observations

Observation

- Current sheetの通過と南半球から北半球、 $-E$ 半球から $+E$ 半球への移動がほぼ同時に起きている。
- 15:11頃に観測される重イオンが減少
 - Heavy ion dominant
→ H^+ dominant
- イベント時のイオン比
→ $O_2^+ : O^+ : CO_2^+ \approx 71 : 26 : 3$

Figure 4. Summary plot of cold dense ion outflow event



Discussions

- $O_2^+ : O^+ : CO_2^+ \approx 71 : 26 : 3$
 - 流出のソースは高度260kmかそれ以下の電離圏。
 - 低高度から重たいイオンを流出させる必要がある。

Possible scenario

- カस्प状の領域から、磁場に沿って上方に輸送され流出。

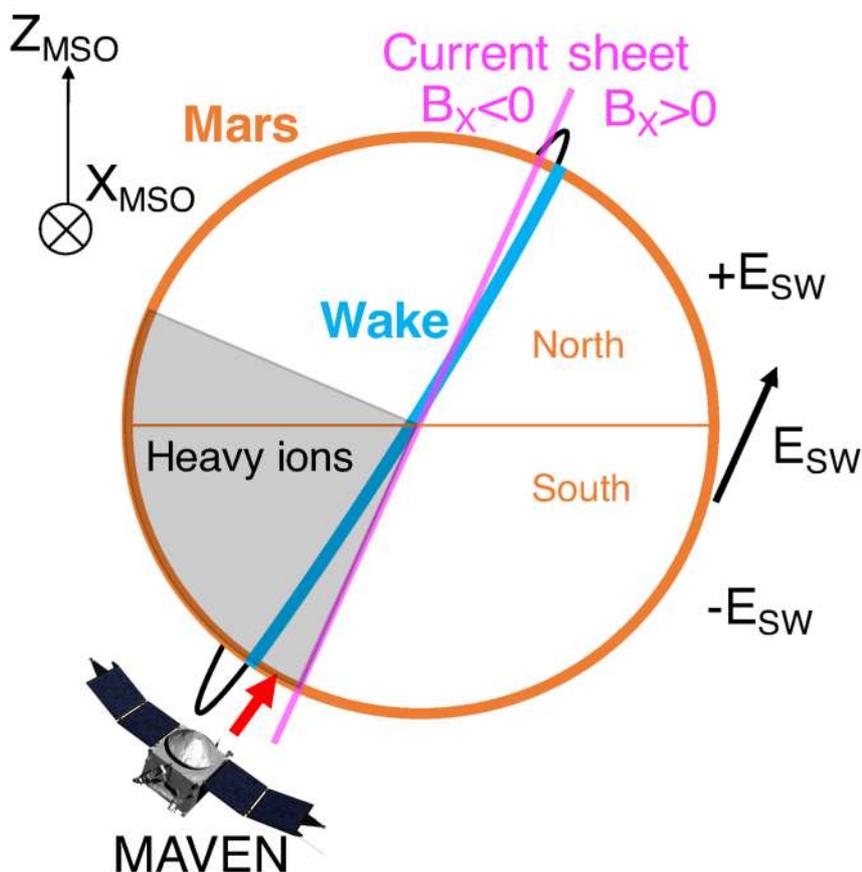


Figure 5. Schematic summary of cold dense ion outflow event

Discussions

- 15:11頃に低エネルギーの重イオンが減少。
- MAVENが-E半球から+E半球に移動。
- +E半球では
 - 流出経路がplume状。
 - イオンが加速される。
- -E半球から+E半球への移動により観測される低エネルギー重イオンが減少したと考えられる。

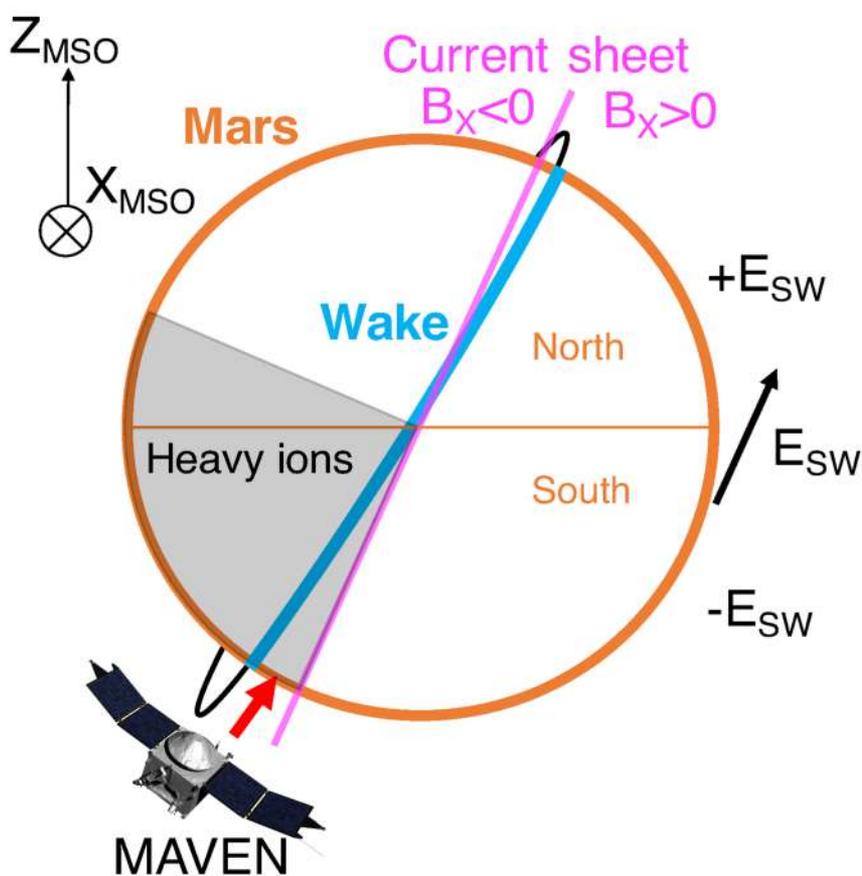


Figure 5. Schematic summary of cold dense ion outflow event

Discussions

重イオン(O_2^+ , O^+ , CO_2^+)の散逸

- Flux = $5.4 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - Escape velocityを仮定。
- Escape rate = $5 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$
 - 流出が観測された領域において、同じfluxが得られると仮定。
- 地殻磁場や太陽風電場の影響が低エネルギーイオンの流出を促進している可能性。

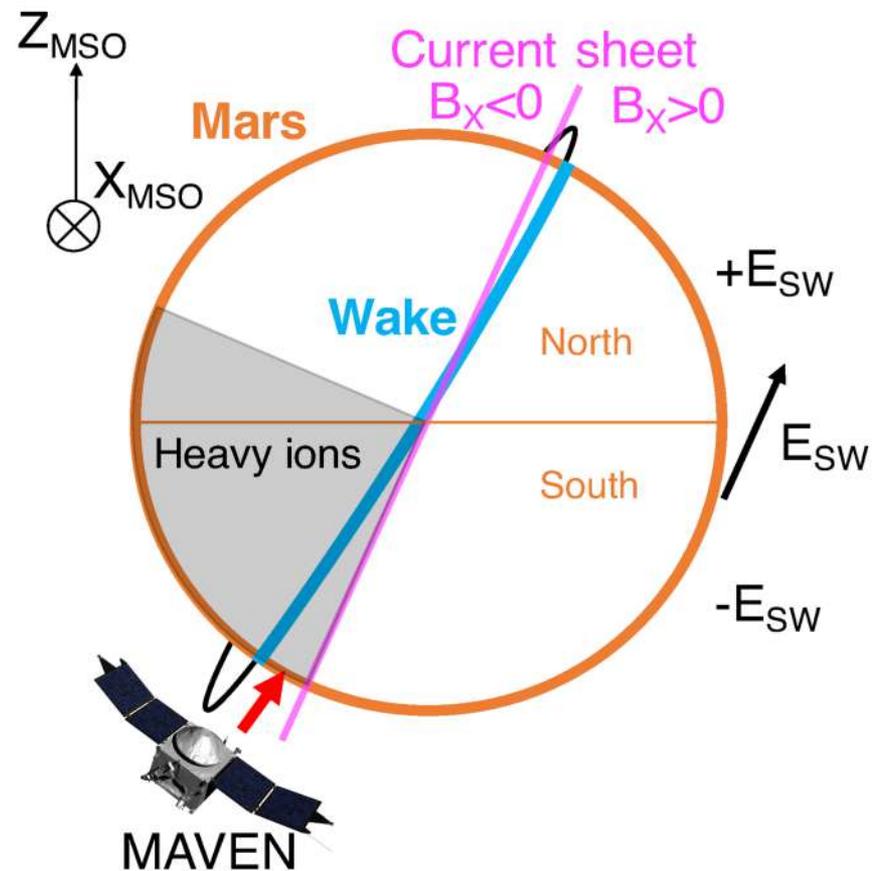


Figure 5. Schematic summary of cold dense ion outflow event

Conclusions

- MAVENによって、cold dense ion outflowが観測された。
 - Fitting methodにより O_2^+ の応答関数を求め、 O_2^+ の影響を取り除くことで、 CO_2^+ の密度をより正確に推定した。
- CO_2^+ の密度も含めることで流出ソースの高度について議論することができる。
- 地殻磁場や太陽風電場により、流出の様相が大きく変化する。