- Halekas, J. S., & McFadden, J. P. (2021).
- Using solar wind helium to probe the structure and seasonal variability of the Martian hydrogen corona.
- Journal of Geophysical Research: Planets, 126, e2021JE007049.
 - https://doi. org/10.1029/2021JE007049





紹介論文:

- 京大・理
- 原田裕己



要旨

Abstract We utilize measurements from instruments on the Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN (MAVEN) mission to investigate singly ionized helium formed by charge exchange between solar wind alpha particles and neutral hydrogen in the region upstream from Mars. We show that the observed helium ion signal varies with solar wind speed and spatial location in a manner consistent with expectations for a charge exchange source. We find that the ratio of singly to doubly ionized helium varies with Martian season, with a peak in the southern summer season. The inferred neutral hydrogen column density and the seasonal variation thereof agree with the results of previous studies based on other measurement techniques. The MAVEN helium ion measurements provide a new method of probing the hydrogen corona, with nearly continuous coverage of the Martian seasonal cycle across the entire mission, enabling study of the interannual variability of the Martian exosphere.

• 太陽風アルファ粒子と火星外圏大気の中性水素原子が電荷交換し、He+が生成される:

MMX/MSAでも可能?

 $He^{++} + H \rightarrow He^{+} + H^{+}$

上流太陽風・マグネトシースでのHe++・He+観測を使えば、火星水素コロナの継続的なモニタリングができる!→

背景:太陽風中のHe++・He+

- 太陽風のイオン組成:
 - 平均的にはH+~95%, He++~4%, その他重イオン~1%。
 - He++の割合は、太陽周期・太陽緯度・太陽風速 度などに応じて<1%から~10%の間で変動する (Aellig et al., 2001; Kasper et al., 2007)。
 - 太陽風中のHe+は、CMEなど非常に冷たい太陽 プラズマに少量含まれることがある(Gosling et al., 1980; Schwenn et al., 1980) ほか、星間物質 の中性ヘリウムの電離・ピックアップ起源のもの も含まれる(Möbius et al., 1985)。

From Gosling et al. (1980)

"The very high He⁺/He⁺⁺ abundance ratio of 0.3 measured during this event suggests that this was solar prominence material only partially ionized by its passage through the corona."





Fig. 1. Solar wind proton density, temperature, and speed and the He^{++}/H^+ abundance ratio before and during the shock wave disturbance of July 28, 29, 1977.

Fig. 3. A mass/charge spectrum obtained by assuming that all ionic species travel at the same speed as H^+ . The background is produced by penetrating cosmic ray particles and is 2 1/2 orders of magnitude lower than the peak at m/q = 4.

背景:太陽風He++と中性粒子との電荷交換

 He+は、太陽風He++と中性粒子との電荷交換によっ ても生成される:

$He^{++} + H \rightarrow He^{+} + H^{+}$

- 例えば、He+/He++比観測から彗星コマの中性密度分 布を推定できる(Burch et al., 2015; Fuselier et al., 1991; Shelley et al., 1987; Wedlund et al., 2016) 。
- 火星でも同様の過程で、太陽風He++の最大30%が He+またはHe⁰となり取り除かれ、火星大気へのヘリ ウムの供給源の1つとなる(Chanteur et al., 2009; Stenberg et al., 2011) 。



Fig. 3. Panel A): RPC-ICA derived He⁺/He²⁺ ratios as gathered in 45 reference events between Sept. 2014 and Apr. 2015. Ratios calculated by the forward analytical model, with $Q = Q_{S13}$ from Snodgrass et al. (2013) and $v_0 = 700 \text{ m s}^{-1}$ as input are displayed in red. Panel B): cometocentric distance in km. Panel C): heliocentric distance in AU.

背景:火星水素コロナ

- 複数の手法 (Lyman-α, penetrating H+, PUI, upstream waves)により、火星水素コロナの大き な季節変動が観測されている。
- この季節変動は、(おそらくは)ダスト活動に伴う 水の上層大気への輸送に起因する(Chaffin et al., 2017; Fedorova et al., 2020; Stone et al., 2020) 。



https://lasp.colorado.edu/home/maven/2017/01/25/maven-detects-steep-drop-in-hydrogen-escape-at-mars/

MAVEN Detects Steep Drop in Hydrogen Escape at Mars





(1) Clarke et al. (2) Halekas et al. (3) Rahmati et al. (4) Romanelli et al. (JGR MAVEN Special Issue, 2016)





- SWIAの上流太陽風・penetrating H+観測から 太陽風速度を導出。(両者を組み合わせる と、ほぼ連続的な太陽風速度データとな る。) → Barnett et al. (1990)に従い、電荷交 換の衝突断面積 $\sigma_{21}(E_{SW})$ を決定。
- 128秒積分したSTATIC C6プロダクト(32E x) 64M)から、E/qとm/qでフィルタリングし、 He++とHe+の密度を計算(次以降のスライド で実演)。

テーク処理









Figure 2.













strea

0.0001

0.000

Upstred

Sheat

Mars Ls

Month

- 個々の計測の変動が大きい(考) えられる要因:統計的揺らぎ、 太陽風変動、観測ジオメトリの 違い、複数イオン成分、、、)。
- 季節変動(Ls = 270°付近の極) 大)がはっきりと見てとれる。
- He+/He++密度比を取ると、変動 が抑えられている。(太陽風 He++の密度変動の影響を取り除 くことができる。)





色付き四角:太陽風速度範囲別の24日中央値。上流/シース判定は平均的なBS/MPB形状(Trotignon et al., 2006)に基づく。



太陽風速度依存性

He++と中性水素原子の電荷交換を考えると、

 $dn_{He^+}/dx = \sigma_{21}n_{He^{++}}n_H$

• いくつか仮定を置いて(入射He++エネルギーは一定、変換率は小さい、逆反応・他のHe+ソースは無視)、近似 的に解くと、

$$n_{He^+}/n_{He^{++}} \sim \sigma_{21}(E_{SW}) \int n_{He^{++}}$$

- Figure 4: Ls区分毎の、 $n_{He^+}/n_{He^{++}}$ の太陽風速度依存性
- 南半球夏(L_s: [240, 300])には、n_{He+}/n_{He++}が太陽風速度と共に上昇している。
 - <u>定常な0.004のバックグラウンド</u>を仮定すると、Barnett et al. (1990)に基づく $\sigma_{21}(E_{SW})$ のエネルギー依存と 一致する(破線)。
 - バックグラウンドの起源は不明だが、火星の位置(季節)に依存していないので、星間物質起源のピック アップHe+ではなさそう。上流・シースで一定なので、外圏大気の他の中性原子との電荷交換でもなさそ う。残るは、太陽風の他のイオン種(e.g., 多価重イオン)や、未考慮の計測機器バックグラウンドの寄与?

Figure 4.

太陽風 0.020 Barnett 1990: 1.6-2.2 x 10¹³ cm⁻ 0.015 0.010 eam Upstre 0.00 0.00 200 400 600 800 Solar Wind Speed [km/s] dx = dxシース 0.03 Barnett 1990: 2.8-3.3 x 10¹³ cm⁻ 300-360 eath He⁺∕He 240 - 3000.02 E 180 - 240120-180 60-120 Ls 0-60 0.01 S 0.0 200 800 400 600 Solar Wind Speed [km/s]

Figure 4. Helium ion density ratios measured by STATIC over the entire MAVEN mission, from locations outside of the nominal bow shock (upstream) and between the nominal magnetic pileup boundary and bow shock (sheath), with median ion density ratios as a function of upstream solar wind speed (measured by SWIA, in 25 km/s bins) for six $L_{\rm s}$ ranges. Black lines show expected ion density ratios given measured cross sections for charge exchange between He⁺⁺ and neutral hydrogen (Barnett et al., 1990) and inferred neutral hydrogen column densities for the southern summer solstice L_s range, assuming no background (solid lines, upper range of column densities), and a constant background level of 0.004 (dashed lines, lower range of column densities).

- $\sigma_{21}(E_{SW})$ が大きく、水素コロナ観測に有利な、高速太陽風時 $(V_{SW} > 500 \text{ km/s})$ のデータを用いる。
- Barnett et al. (1990)の $\sigma_{21}(E_{SW})$ を使ってHe+/He++密度比 $n_{He^+}/n_{He^{++}}$ をH柱密度 $n_H(x)dx$ に変換。
- 上流太陽風と比べて、シースの方が経路が長いので柱密度も高 い。
- Penetrating H+観測から導出された季節変動(Halekas, 2017) よく一致する。大小関係も予想通り。

水素コロナの季節変動

Figure 5.



Figure 5. Helium ion density ratios measured by STATIC over the entire MAVEN mission, for the highest upstream solar wind speed range (>500 km/s), as a function of Mars solar longitude (in 10° bins). The top panel shows median helium ion density ratios for measurements made outside of the nominal bow shock (upstream) and between the nominal magnetic pileup boundary and bow shock (sheath). The middle panel shows median inferred neutral hydrogen column densities, with (dashed lines) and without (solid lines) subtraction of a constant background helium ion density ratio of 0.004. The bottom panel shows the same hydrogen column density estimates derived from helium ions (dashed lines, with background subtraction), together with a previous estimate (purple lines) derived from byproducts of charge exchange between solar wind protons and Martian hydrogen (Halekas, 2017).

(星間He起源かも: Ls ~ 349°付近のはず)

空間分布

- 推定されたH柱密度の空間分布は、予
 想通りシース内側ほど柱密度増加。
- 簡単なモデル分布(Chamberlain
 (1963)外圏モデルをX_{MSO}に沿って直線
 積分)とよく一致する。
- BSで明瞭な不連続は見られない。→
 上流太陽風でもシースでも、今回の手
 法は適用可能。

Figure 6.



Figure 6. Inferred neutral hydrogen column densities derived from STATIC helium ion measurements (with background subtraction) for the southern summer solstice L_s range and the highest solar wind speed range (>500 km/s), as a function of location, in Mars-Solar-Orbital (MSO) coordinates. For comparison, the bottom panel shows hydrogen column densities computed from a collisionless Chamberlain exospheric model (Chamberlain, 1963) for a plausible exobase density of 2×10^6 cm⁻³ and temperature of 200 K, utilizing straight-line integrations along tangents parallel to the MSO *X* axis. The green and blue lines show the nominal positions of the magnetic pileup boundary and bow shock (Trotignon et al., 2006).

He+観測を使う利点・欠点

- 欠点:He+のシグナルが弱い。
 - 十分なカウントを得るには長い時間積分が必要となる。
 - バックグラウンド(計測器・自然由来)引きの処理が必要。
- 利点:
 - He+/He++比からH⁰柱密度への変換が、比較的単純な処理で実現可能。密度比を衝突断面積で割るだけ!
 - 原理的には水素コロナの3次元構造も調査可能。



• マグネトシース・上流太陽風の広い領域で観測可能。MAVEN軌道でも継続的に観測できる(ただし太陽風速度の情報が必要)。

Pickup H+や上流波動は 上流太陽風でのみ観測可能。 From Rahmati et al. (2018). (ただし益永さん結果も参照。



粘論

- 示した。
- 荷交換から期待される特性と一致する。
- 火星水素コロナの季節変動を、ほぼ切れ目なく観測できる。
- モデリングが必要である。

ヘリウムイオン計測を利用した火星水素コロナ観測が、実現可能であると

• 観測された太陽風速度依存性や空間分布は、太陽風He++と火星外圏Hの電

• 将来的には、シース内のイオン軌道や他のHe+ソースをきちんと考慮した



- MMX/MSA観測にも十分適用可能な手法であると思われる。
- \bullet しあれば)を調査できる点がユニーク。

MMX/MSAでは、ほぼ同じ軌道・季節・太陽風条件下で、朝夕非対称(も

Backup

Interstellar He Focusing Cone

From Möbius et al. (2004)



Fig. 1. Perspective view of the inner heliosphere with the interstellar He flow and the resulting focusing cone, as modeled by J. Raymond (Michels et al. 2002; Lallement et al. 2004a), based on a hot model of the interstellar gas. A line-of-sight through the near-Sun cone, as obtained with SOHO UVCS in December, is indicated in orange. Also shown is a scan across the focusing cone in the He I 58.4 nm line glow from a February location with EUVE, as an example for the determination of the He parameters from the cone shape (Vallerga et al. 2004). A typical location of Ulysses during the neutral He observations is shown together with a sample of a sky image of the inflowing He distribution, from which the physical parameters were derived (Witte 2004). Finally, the dark blue line that extends from the Earth to the Sun indicates a sample accumulation of He⁺ pickup ion spectra in the ecliptic plane with ACE SWICS, and the green line shows the corresponding accumulation with Ulysses SWICS (Gloeckler et al. 2004).



Fig. 1. Traversals of the gravitational focusing cone of interstellar helium at and near 1 AU for 1984, 1985, and 1998–2002, as observed with pickup ions. Shown is the phase space density of He⁺ pickup ions obtained with three different instruments. The observations with AMPTE SULEICA a) were made from Earth orbit, and with ACE SWICS b), c) from L1. The AMPTE observations were limited by the orbit, telemetry coverage and instrument sensitivity to high solar wind speeds only, thus not allowing any averaging over consecutive days. The cone position in longitude, $\lambda = 74.6^{\circ}$ corresponds to DOY 339.75 (Earth crossing of the cone center). c) Observations of the 2000 cone with ACE and Nozomi. These observations are contiguous and have been averaged over 9 and 15 days, respectively. Nozomi is on an interplanetary trajectory just outside 1 AU. (See text for further explanation).