

宇宙放射線の 火星大気・ 月面環境への影響

京大・理・地物

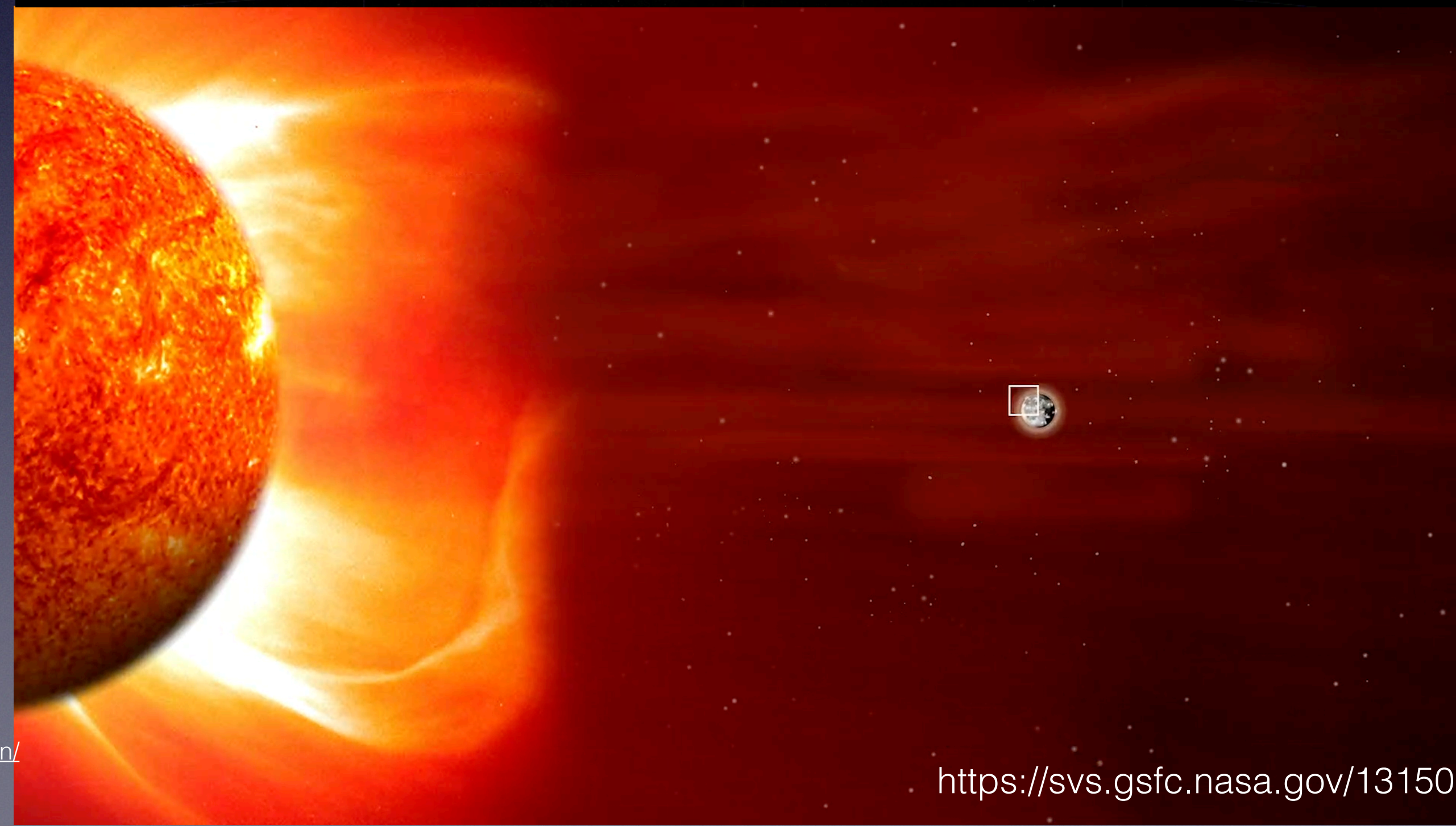
原田裕己 (haraday@kugi.kyoto-u.ac.jp)



<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/kaguya.html>, <https://artemis.igpp.ucla.edu/>, <https://lasp.colorado.edu/home/maven/>,
https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Mars_Express_operations,
<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/current/mmo.html>, <https://science.nasa.gov/get-involved/toolkits/spacecraft-icons>



<https://svs.gsfc.nasa.gov/4370>



<https://svs.gsfc.nasa.gov/13150>

太陽放射線の 火星大気・ 月面環境への影響

京大・理・地物

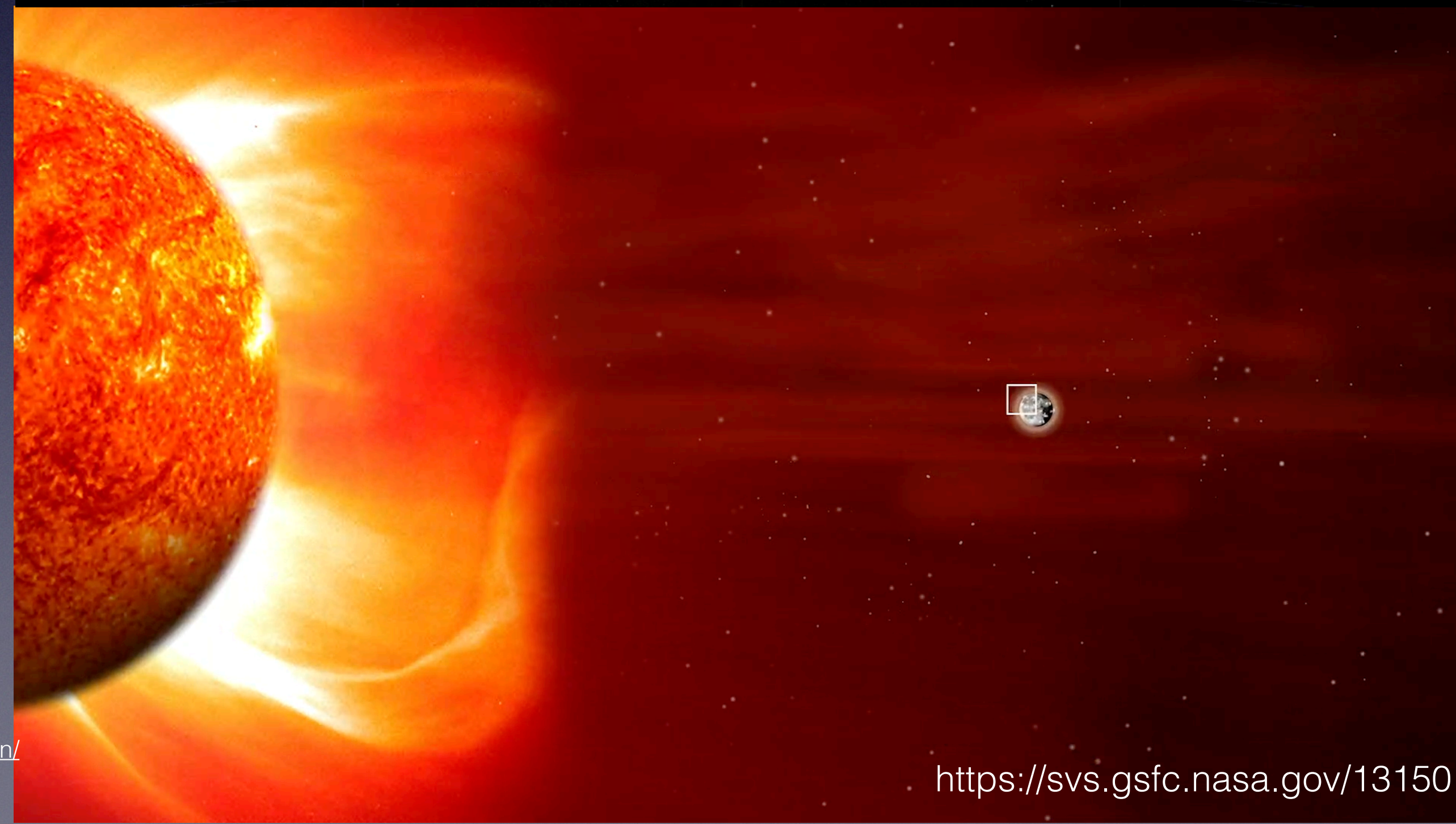
原田裕己 (haraday@kugi.kyoto-u.ac.jp)



<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/kaguya.html>, <https://artemis.igpp.ucla.edu/>, <https://lasp.colorado.edu/home/maven/>,
https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Mars_Express_operations,
<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/current/mmo.html>, <https://science.nasa.gov/get-involved/toolkits/spacecraft-icons>



<https://svs.gsfc.nasa.gov/4370>



<https://svs.gsfc.nasa.gov/13150>

太陽放射線・太陽風の 火星大気・ 月面環境への影響

京大・理・地物

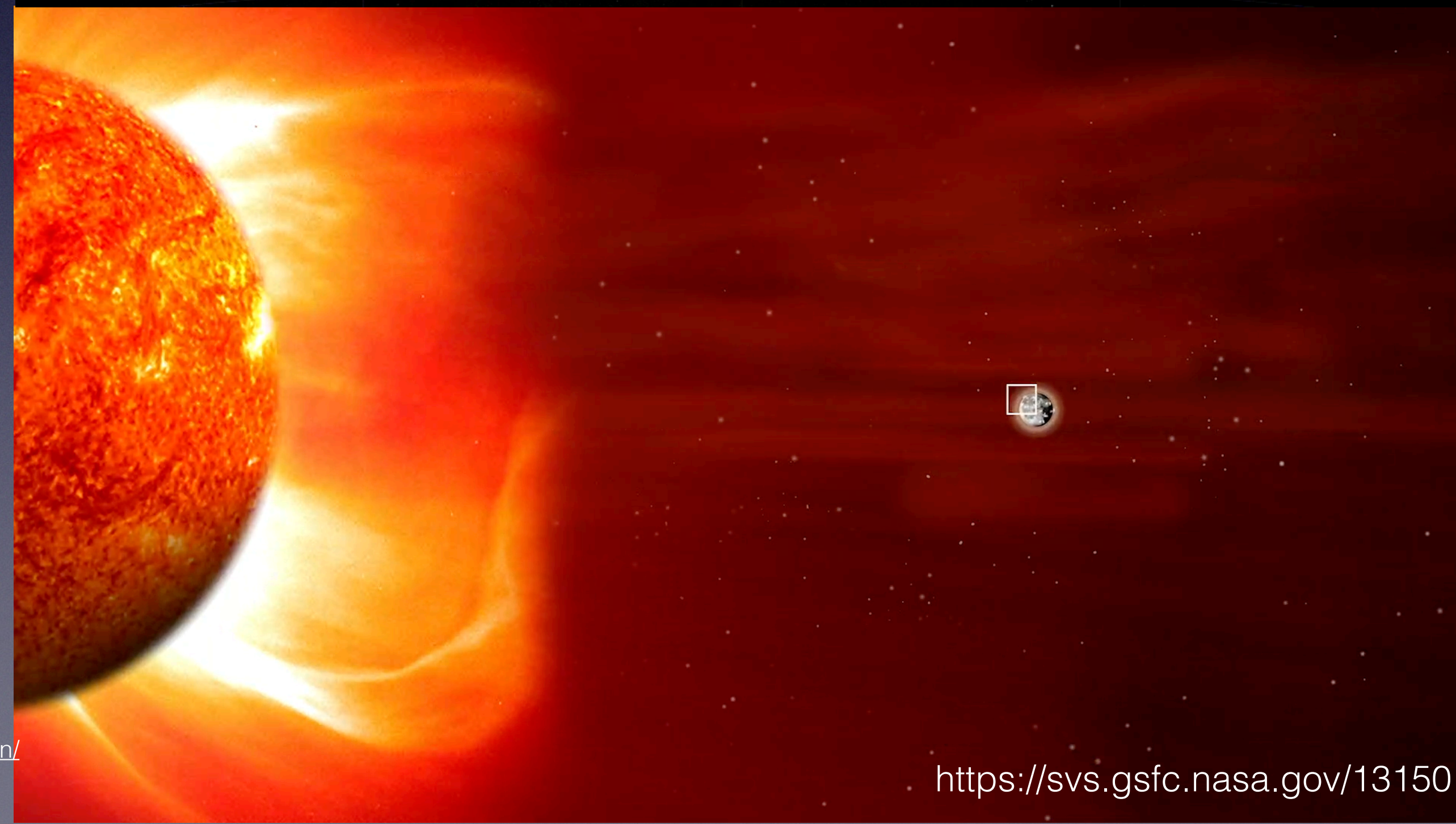
原田裕己 (haraday@kugi.kyoto-u.ac.jp)



<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/kaguya.html>, <https://artemis.igpp.ucla.edu/>, <https://lasp.colorado.edu/home/maven/>,
https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Mars_Express_operations,
<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/current/mmo.html>, <https://science.nasa.gov/get-involved/toolkits/spacecraft-icons>



<https://svs.gsfc.nasa.gov/4370>



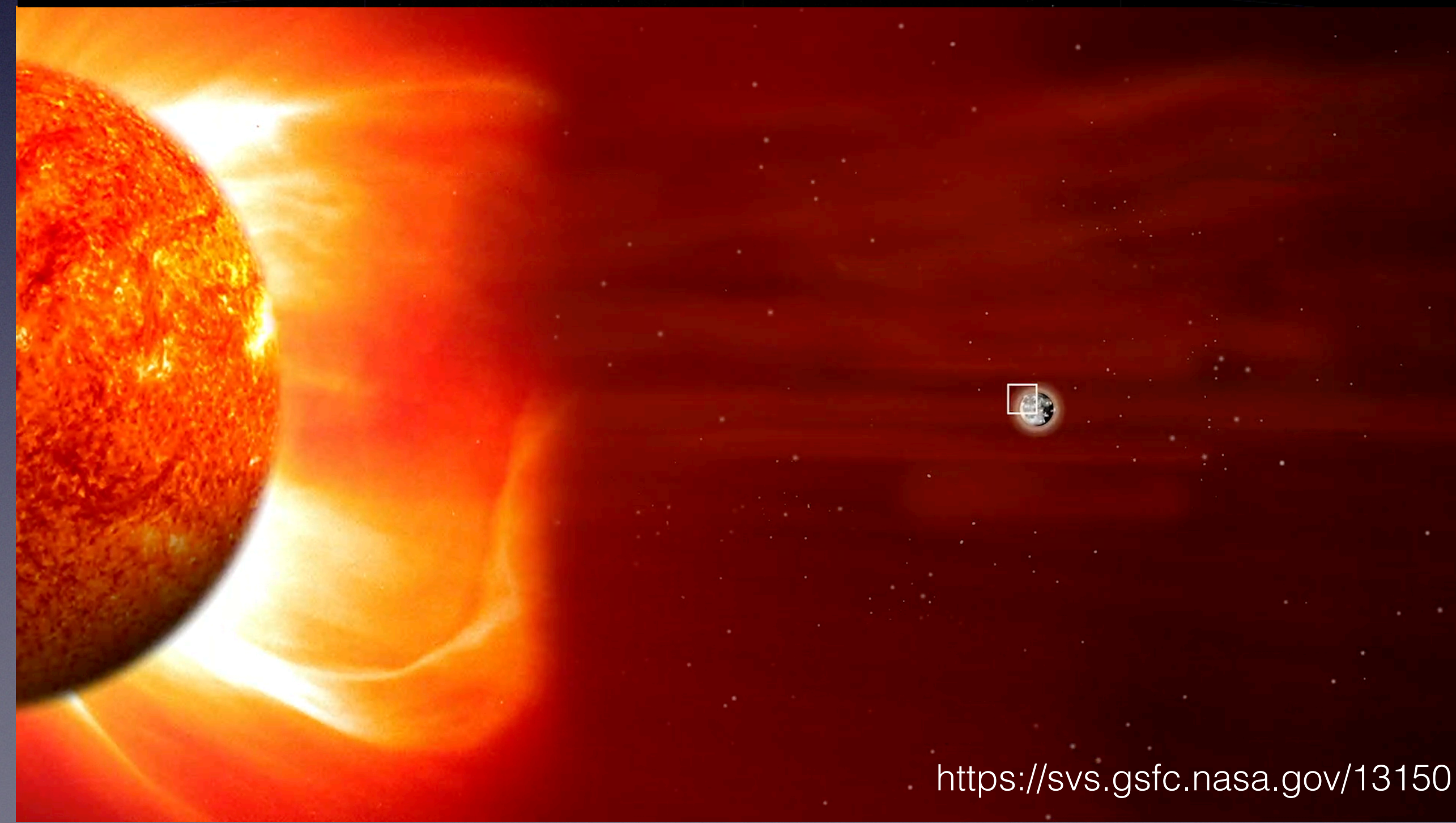
<https://svs.gsfc.nasa.gov/13150>

目次

- 太陽風惑星相互作用
- 火星大気への太陽高エネルギー粒子の影響
- 月面への太陽高エネルギー粒子の影響
- まとめ



<https://svs.gsfc.nasa.gov/4370>



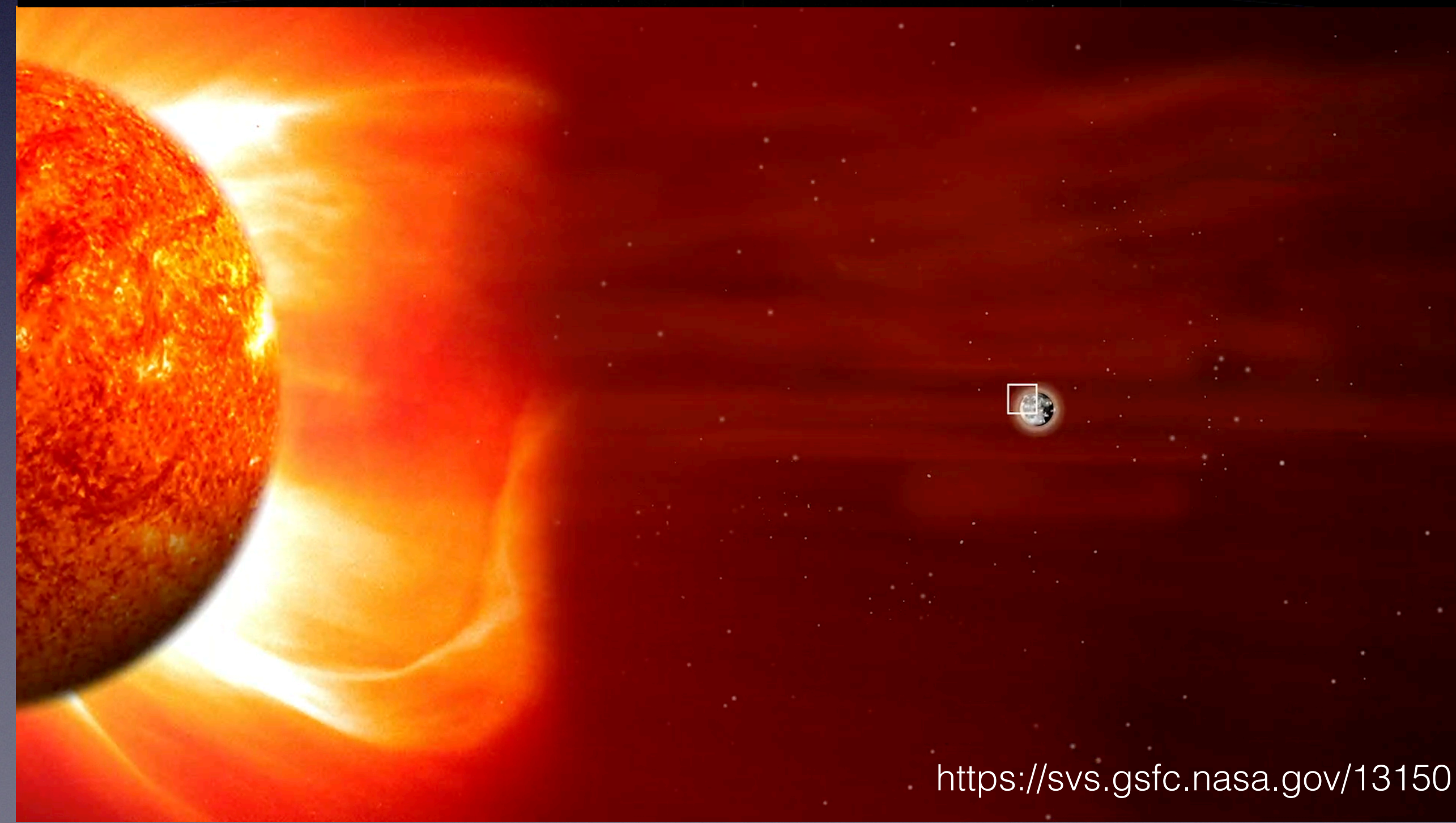
<https://svs.gsfc.nasa.gov/13150>

目次

- 太陽風惑星相互作用
- 火星大気への太陽高エネルギー粒子の影響
- 月面への太陽高エネルギー粒子の影響
- まとめ



<https://svs.gsfc.nasa.gov/4370>



<https://svs.gsfc.nasa.gov/13150>

太陽風惑星相互作用の分類

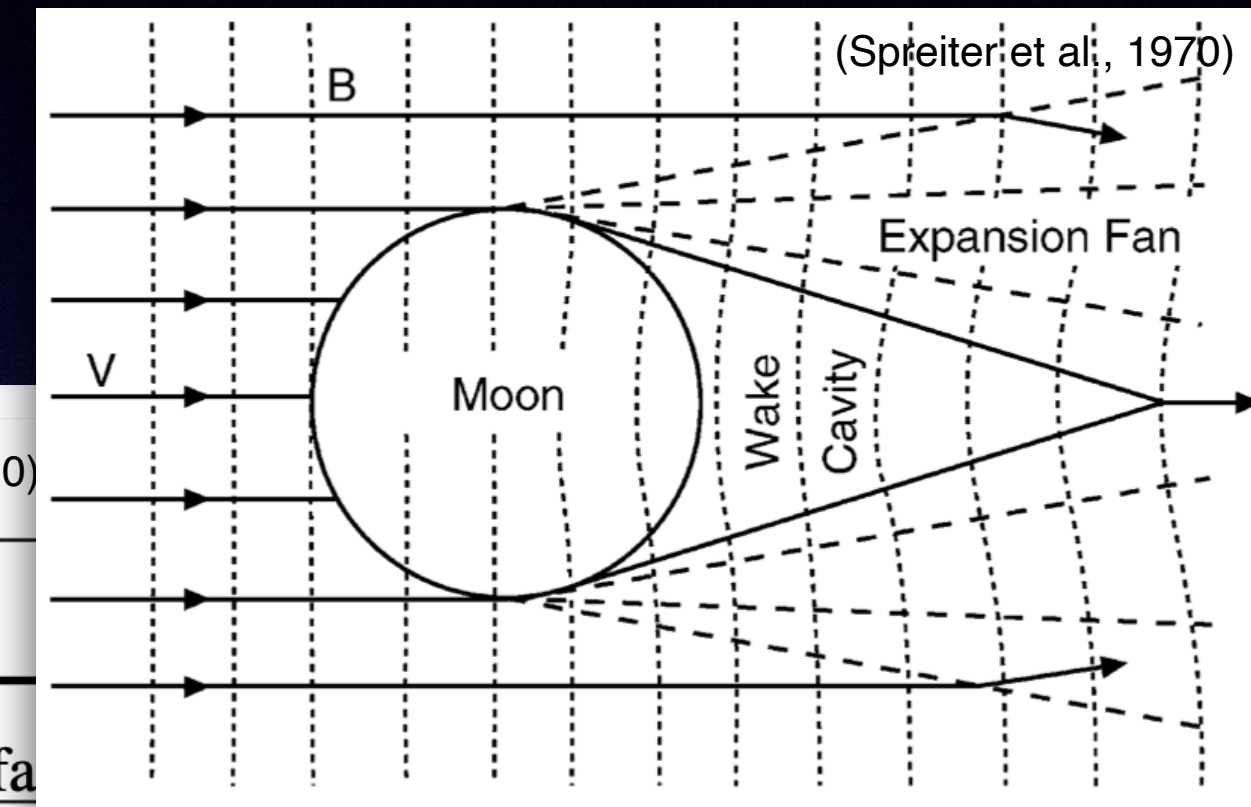
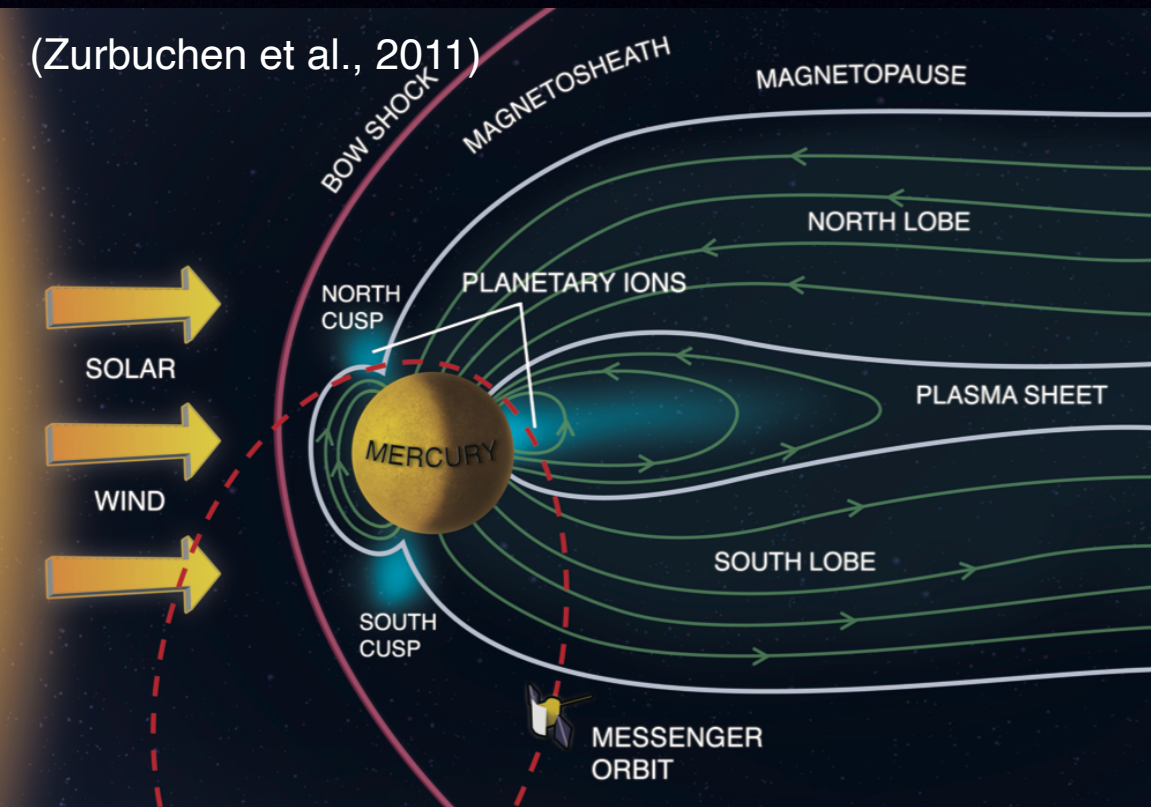


Table 1 Classification scheme of planetary magnetospheres

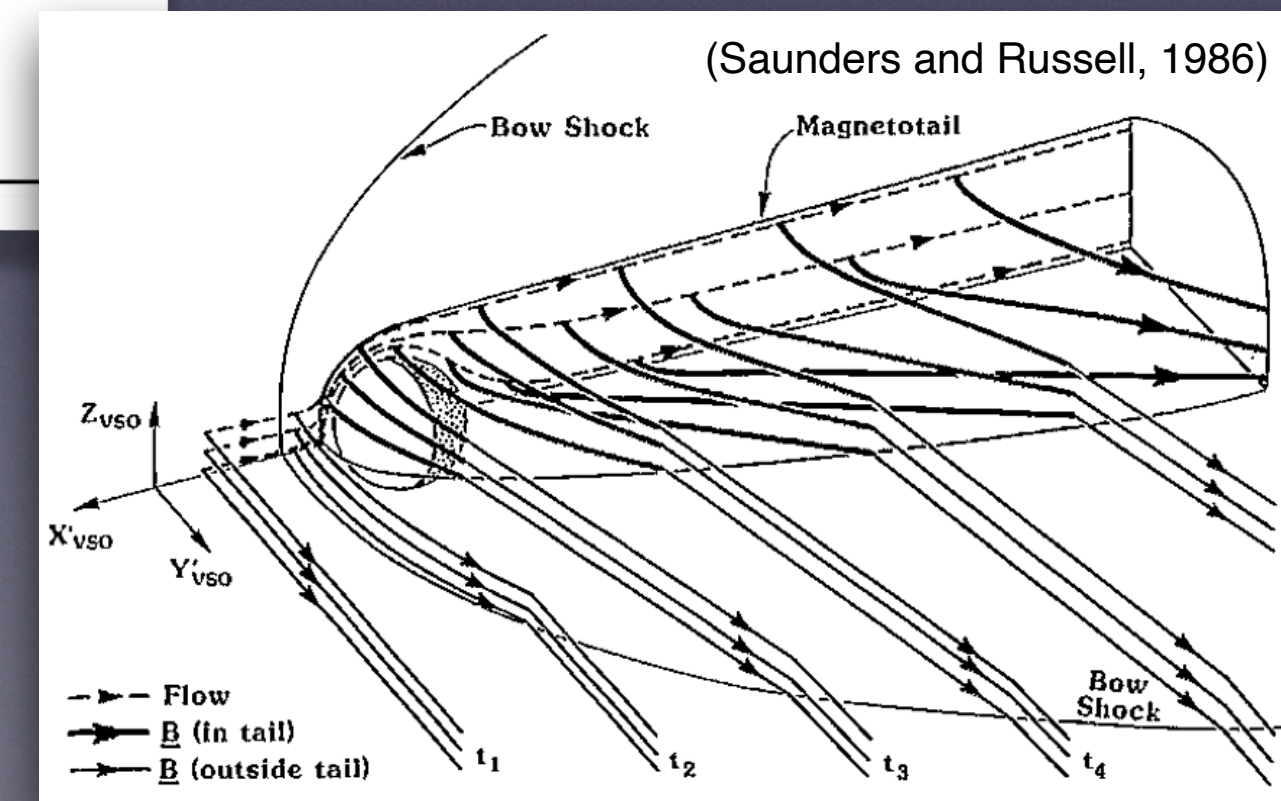
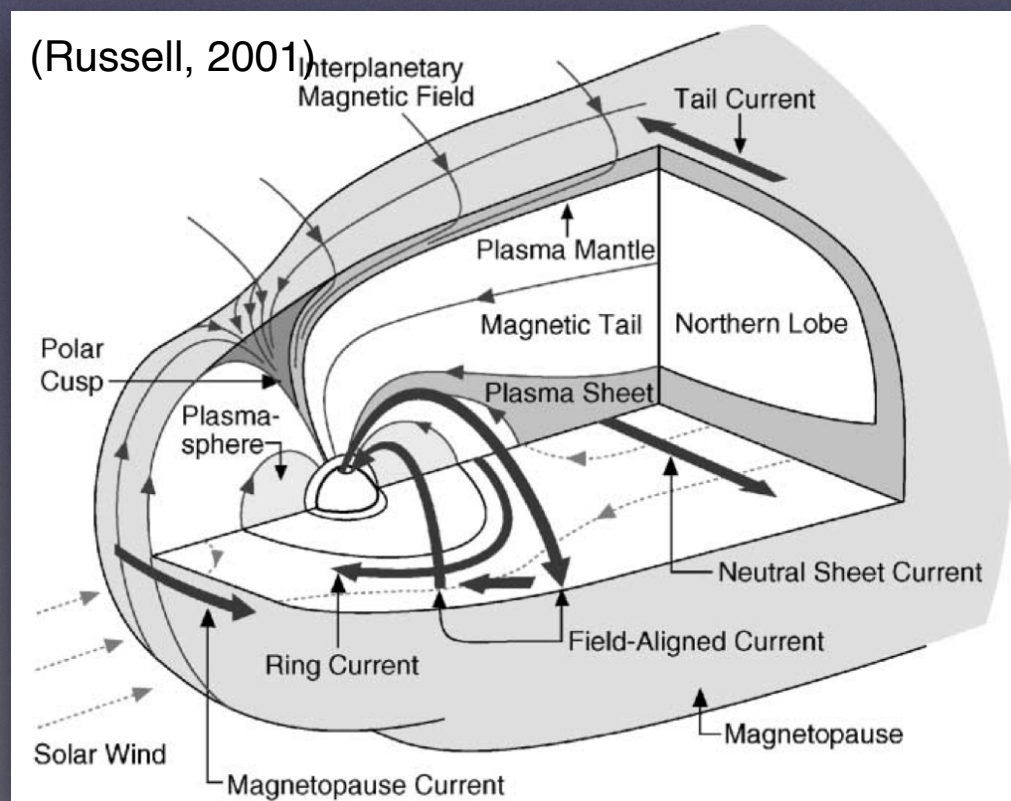
(Baumjohann et al., 2010)

Planet's or satellite's envelope:	$R_{CF} \gg R_P$	$R_{CF} \ll R_P$
Solid surface	薄い Obstacle = planetary field Mercury (Ganymede)	Obstacle = solid surface Moon (Europa, Callisto, Saturnian icy satellites)
Dense atmosphere	大気の濃さ Obstacle = planetary field Earth Giant planets	Obstacle = planetary atmosphere/ionosphere Venus (Io, Titan)

強い ← 磁場の強さ → 弱い

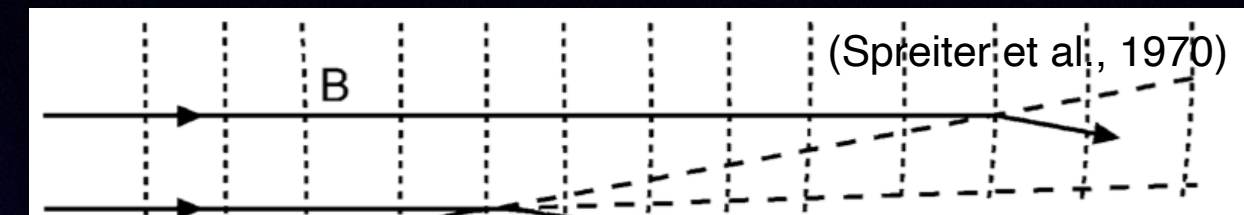
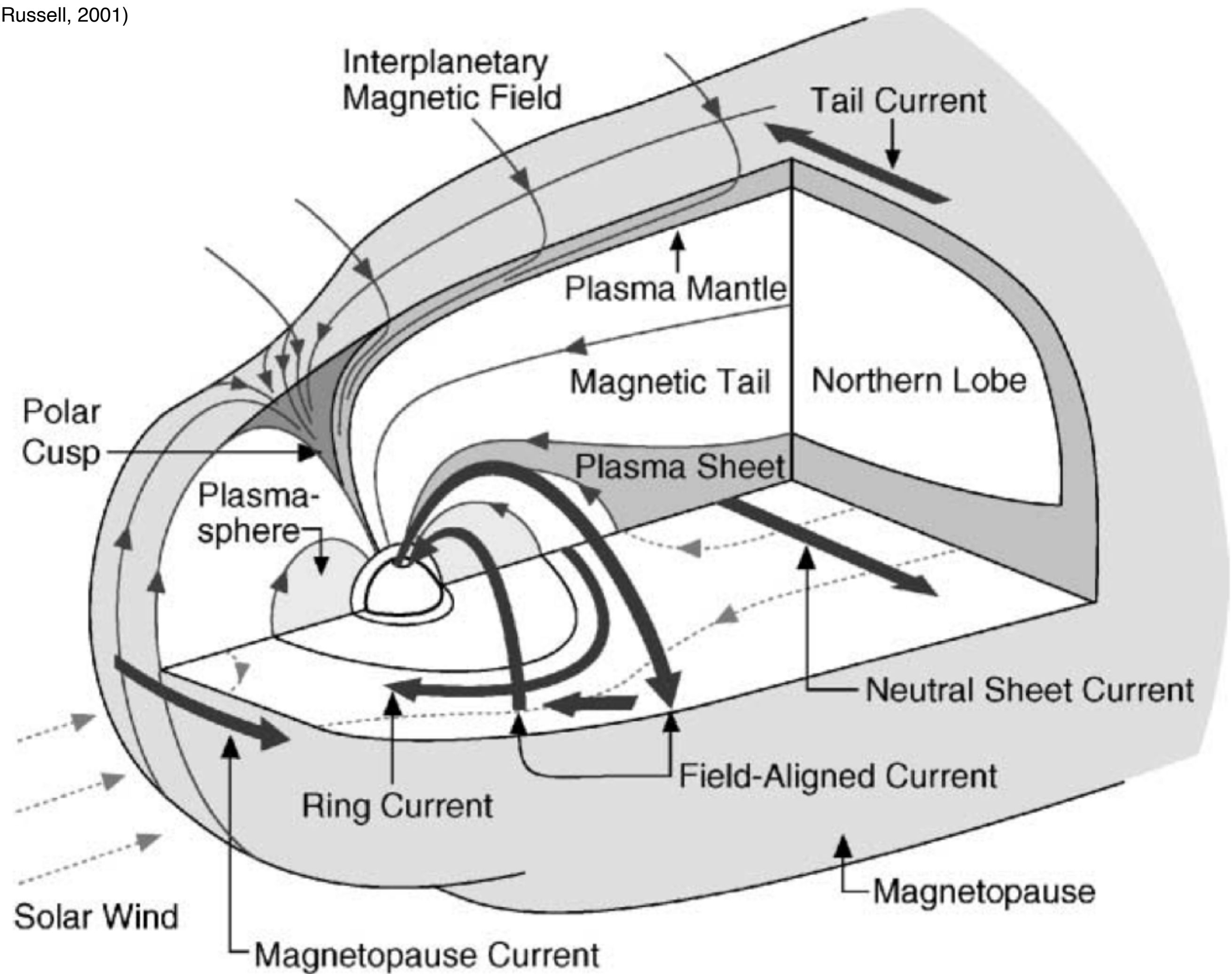
大気の濃さ

濃い

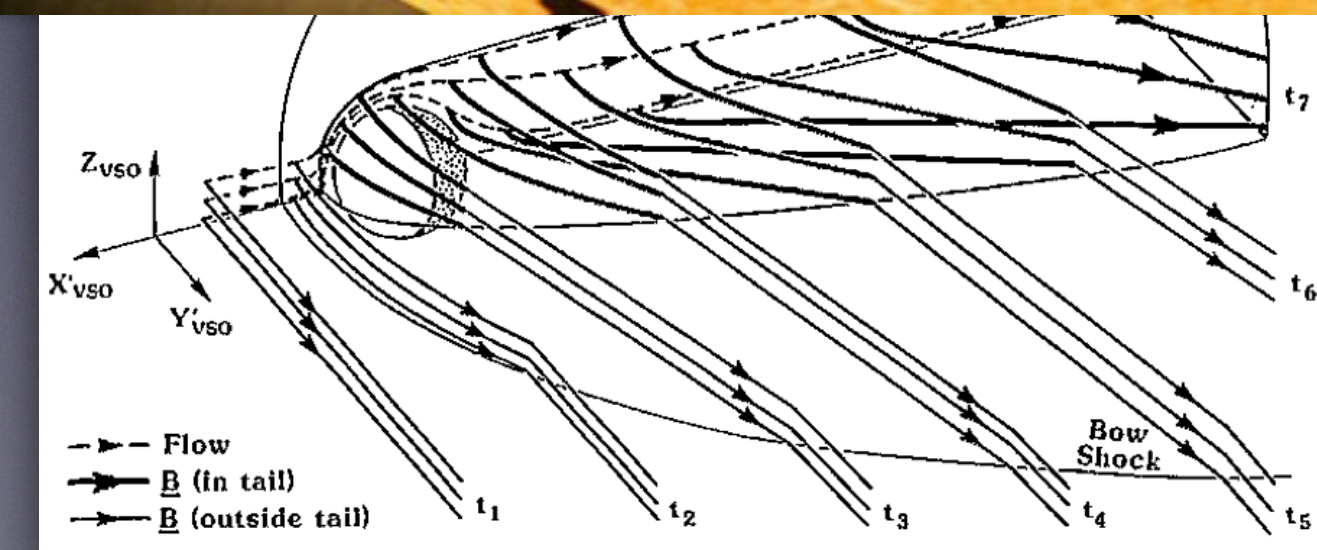


太陽風惑星相互作用の分類

(Russell, 2001)



<https://svs.gsfc.nasa.gov/20097>



太陽風惑星相互作用の分類

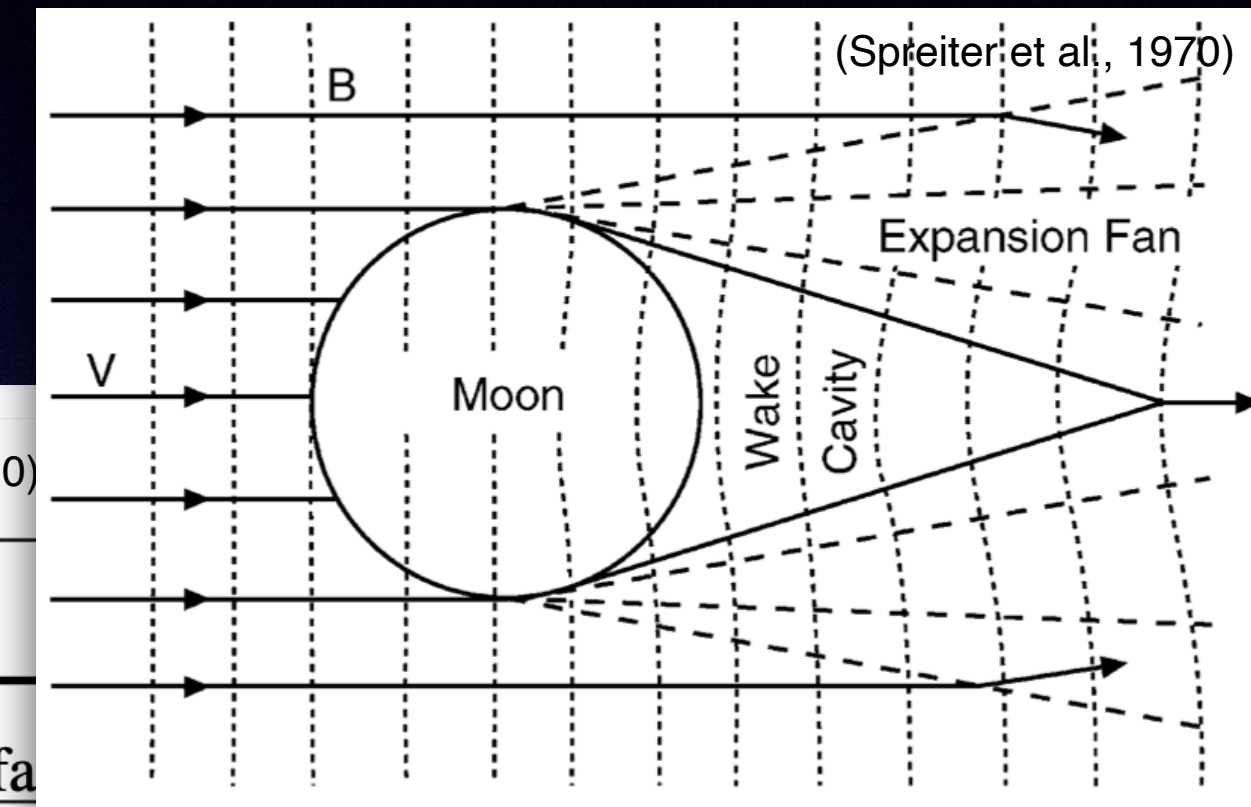
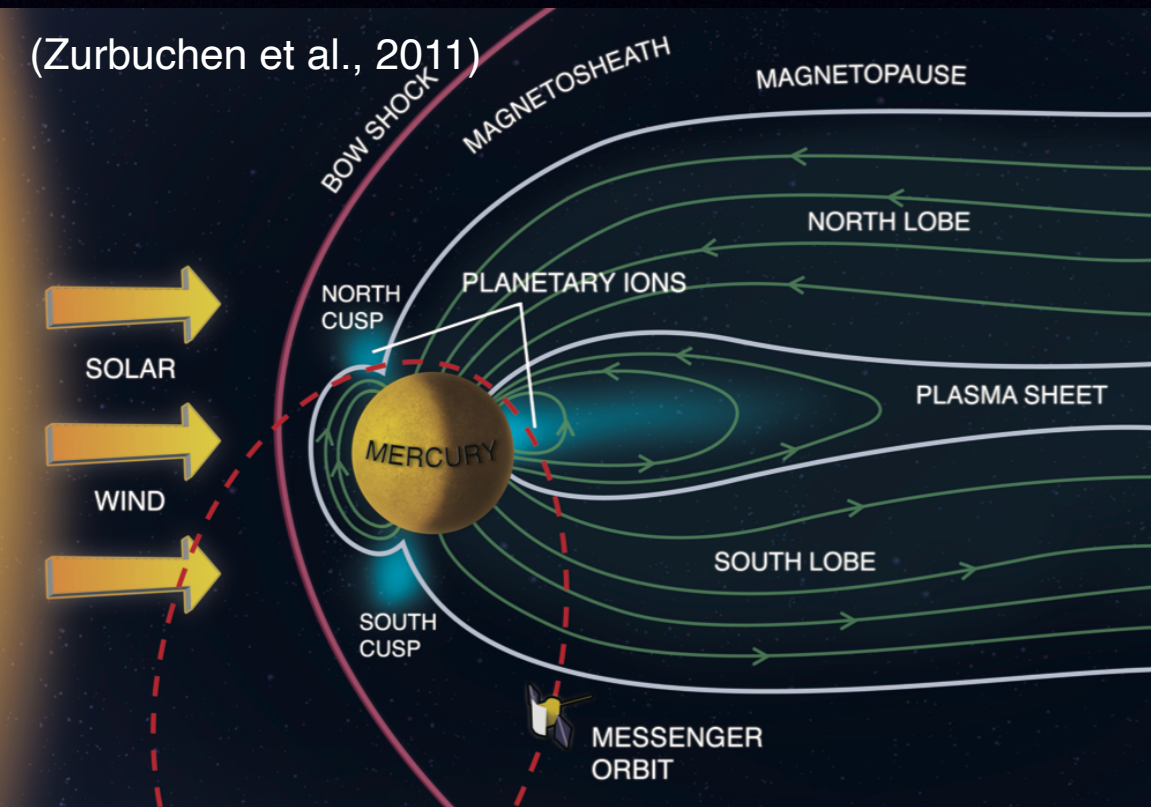


Table 1 Classification scheme of planetary magnetospheres

(Baumjohann et al., 2010)

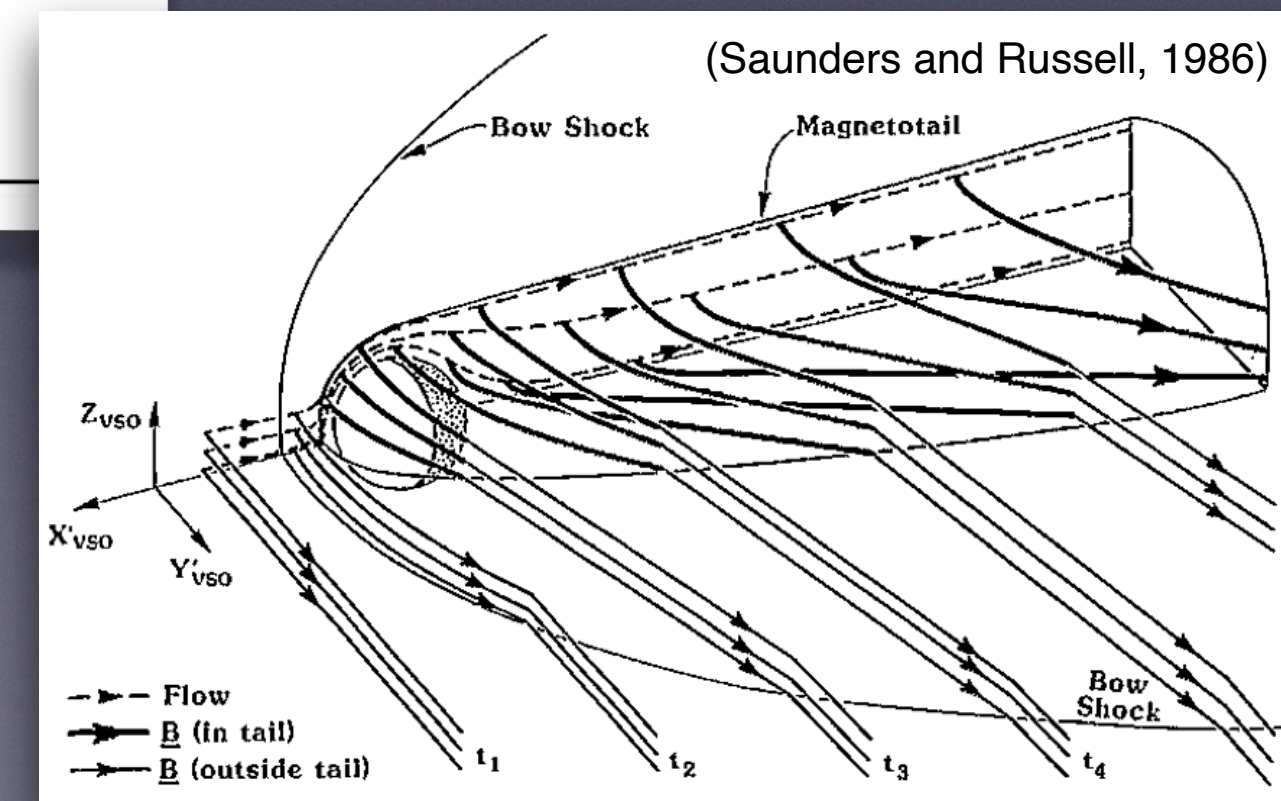
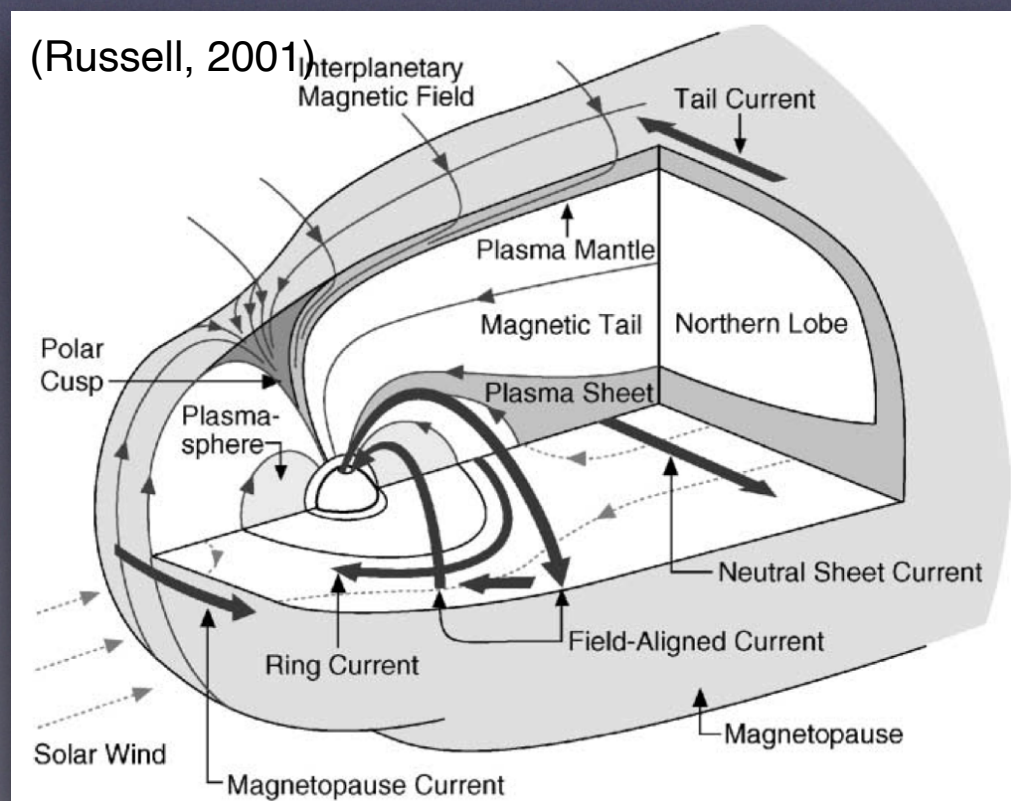
Planet's or satellite's envelope:	$R_{CF} \gg R_P$	$R_{CF} \ll R_P$
Solid surface	薄い Obstacle = planetary field Mercury (Ganymede)	Obstacle = solid surface Moon (Europa, Callisto, Saturnian icy satellites)
Dense atmosphere	大気の濃さ Obstacle = planetary field Earth Giant planets	Obstacle = planetary atmosphere/ionosphere Venus (Io, Titan)

強い ← 磁場の強さ → 弱い

薄い

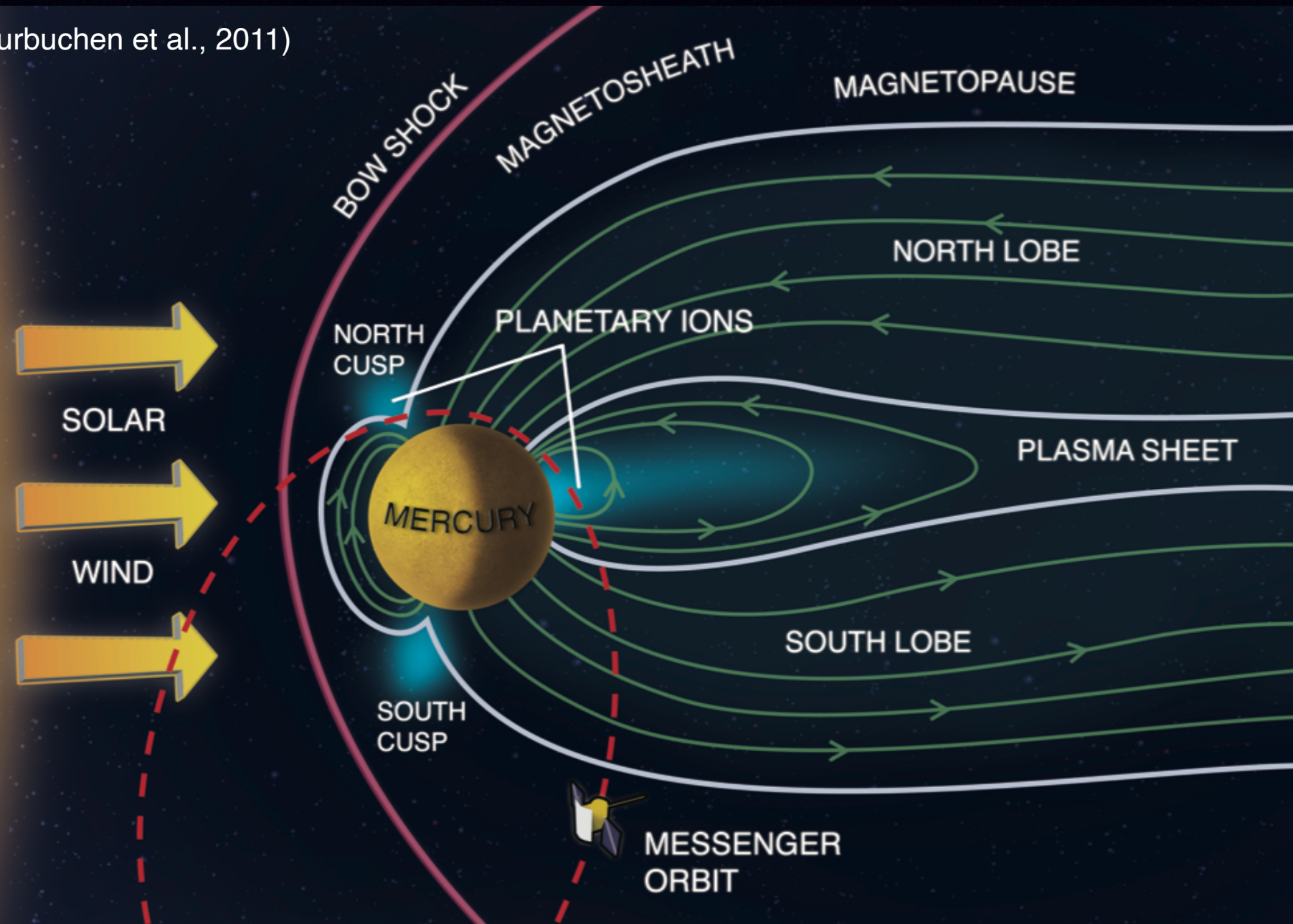
大気の濃さ

濃い

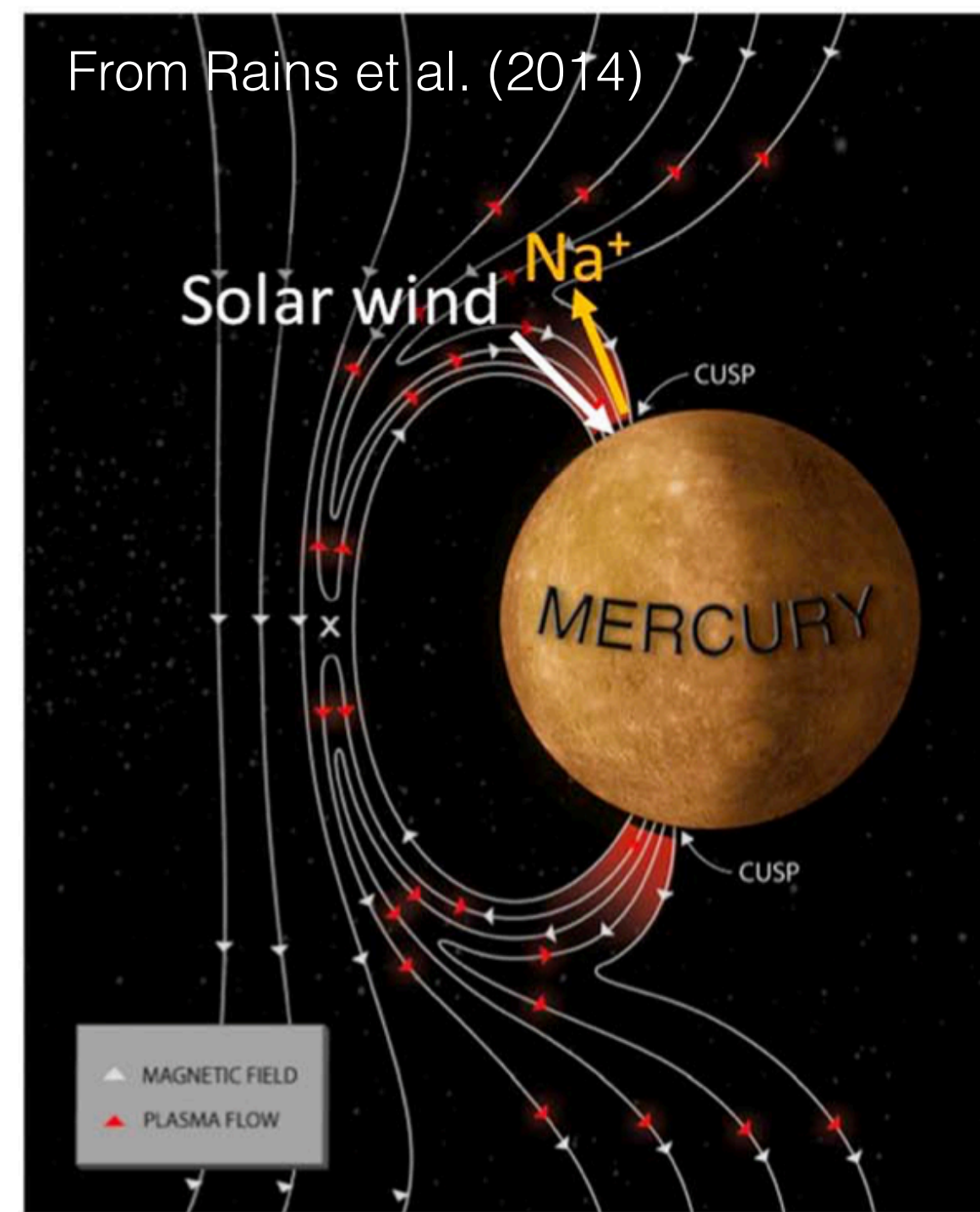


太陽風惑星相互作用の分類

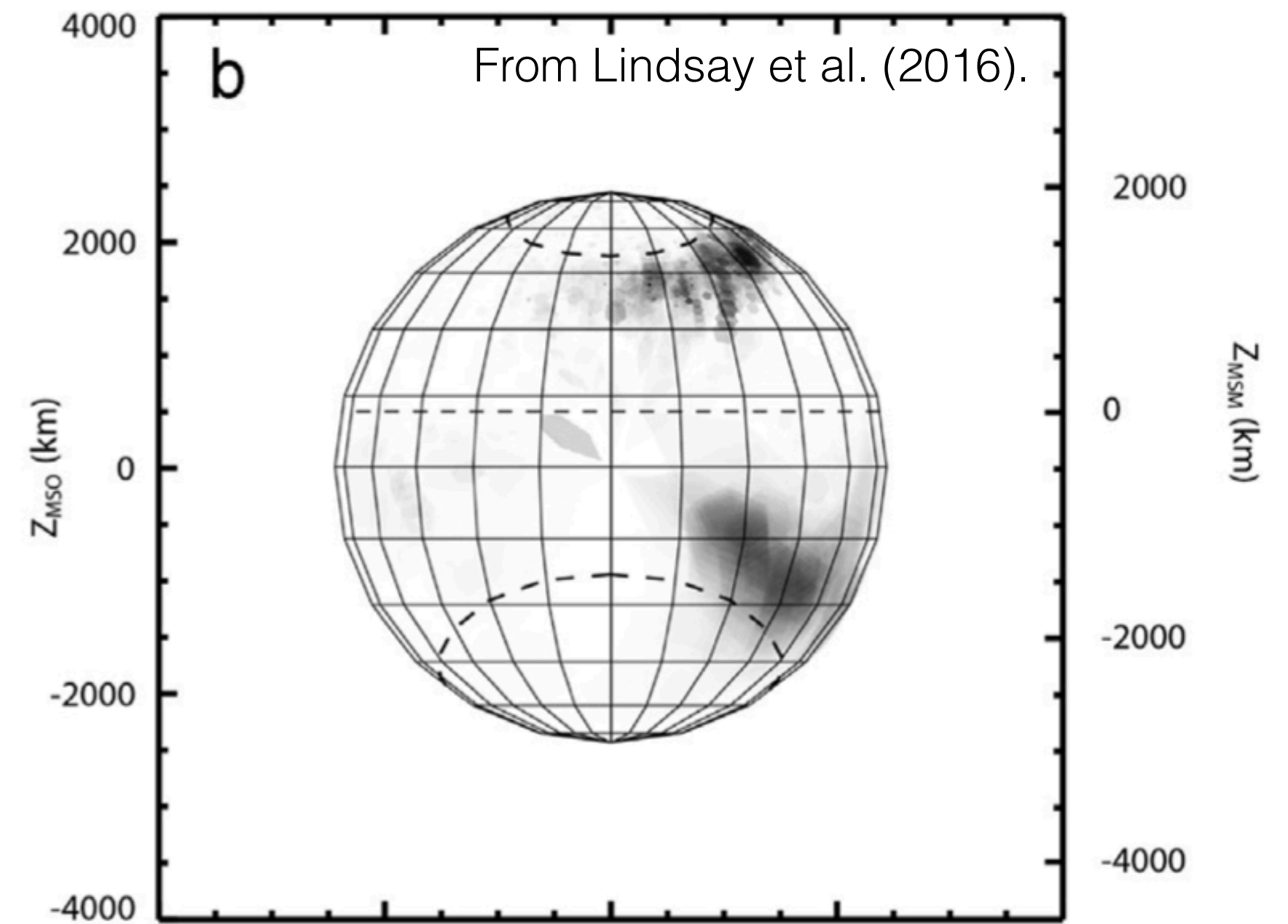
(Zurbuchen et al., 2011)



From Rains et al. (2014)

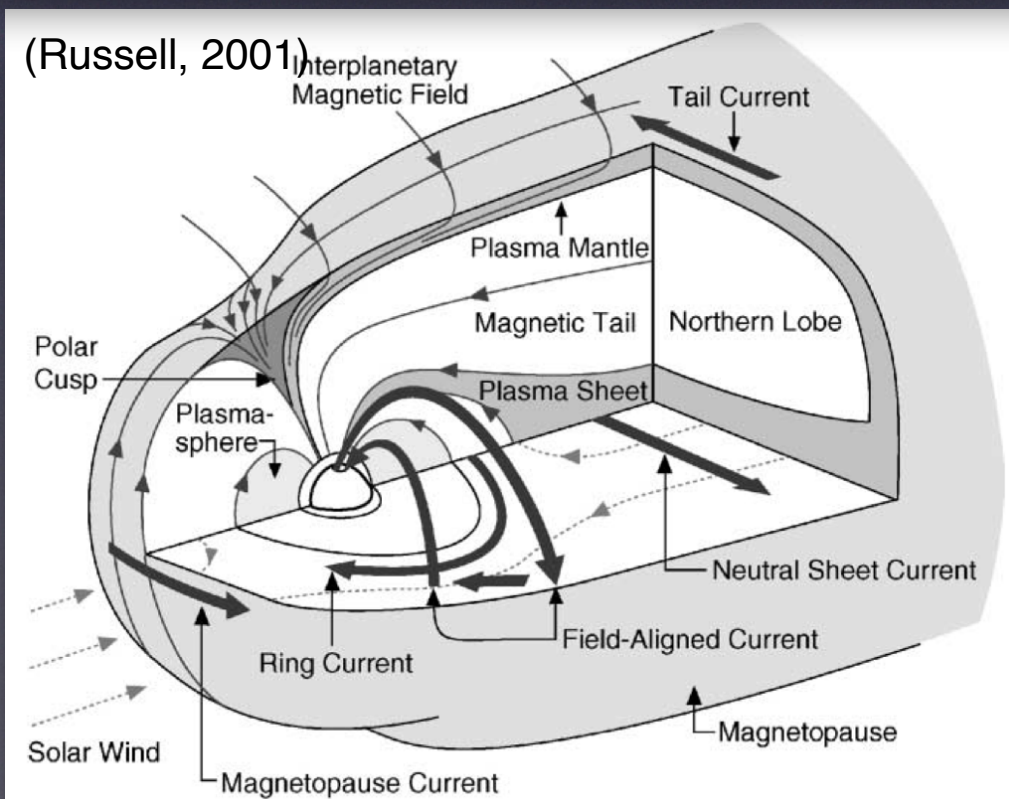


From Lindsay et al. (2016).

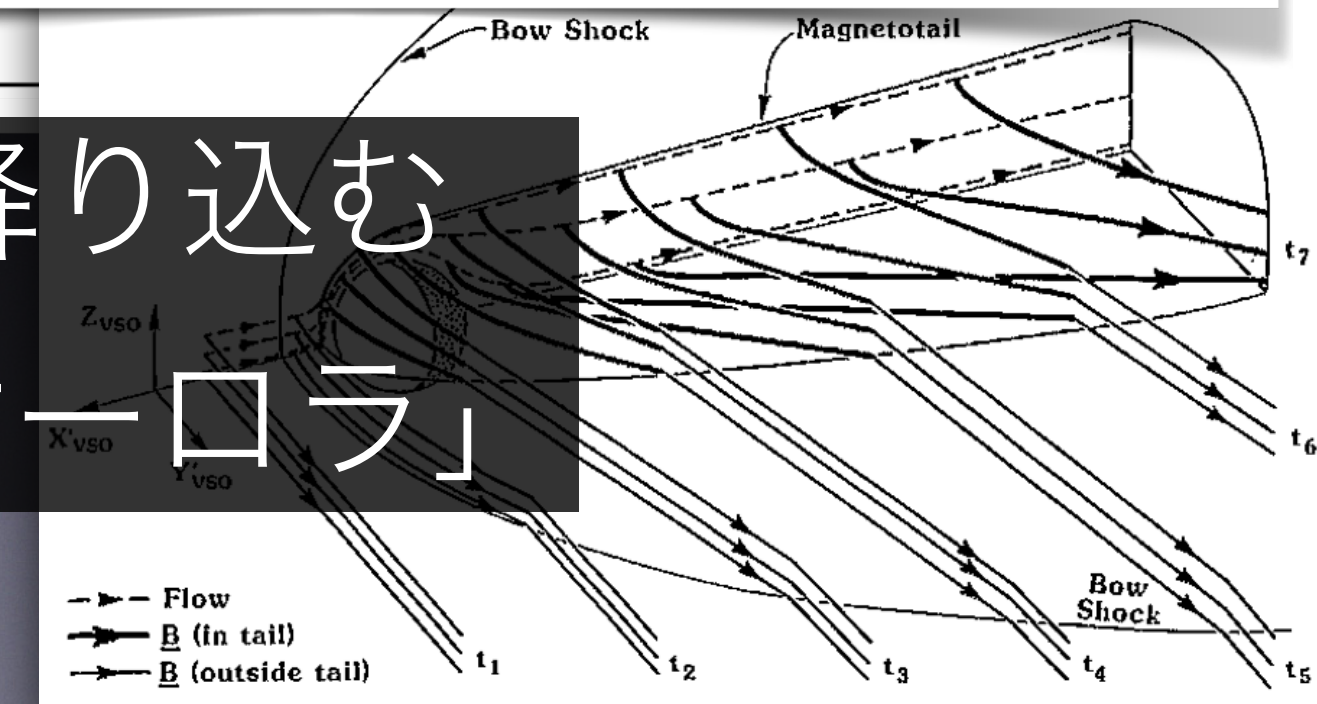


(Io, Titan)

(Russell, 2001)



荷電粒子が固体表面へ降り込む
→希薄大気生成、「X線オーロラ」



太陽風惑星相互作用の分類

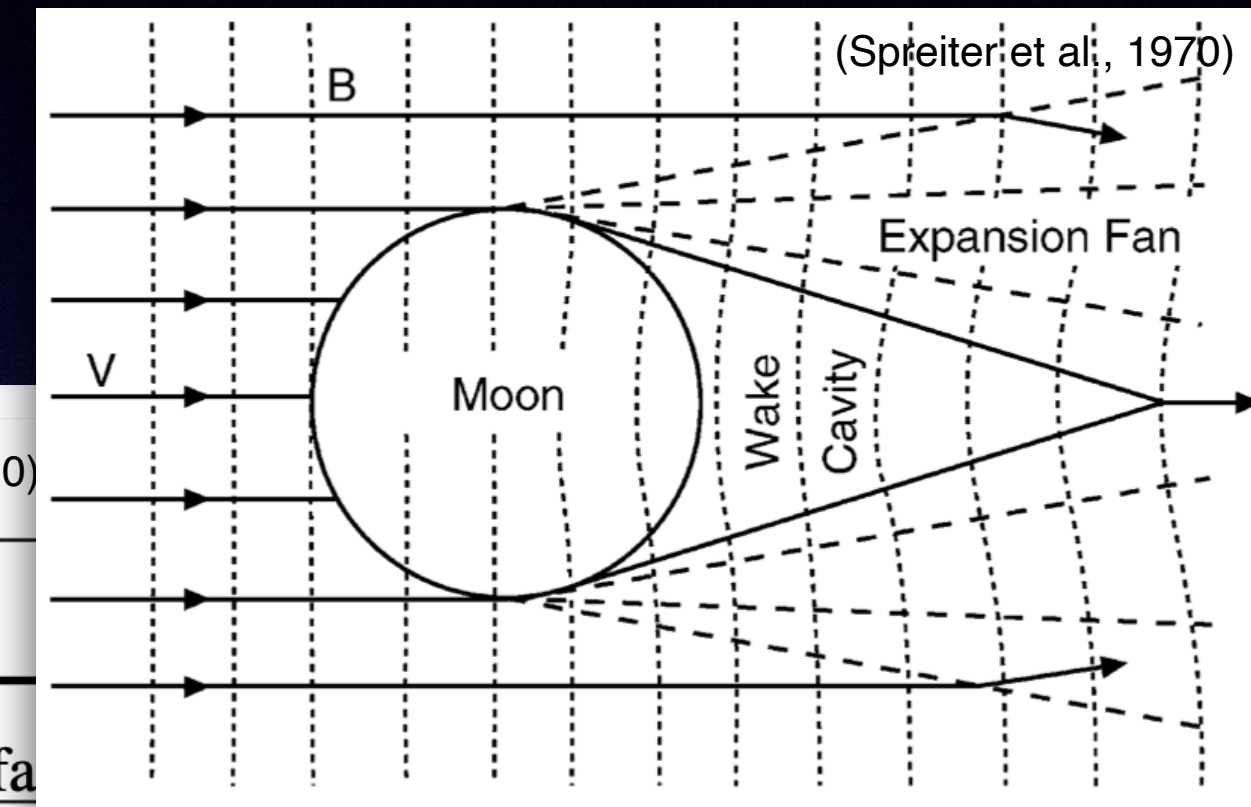
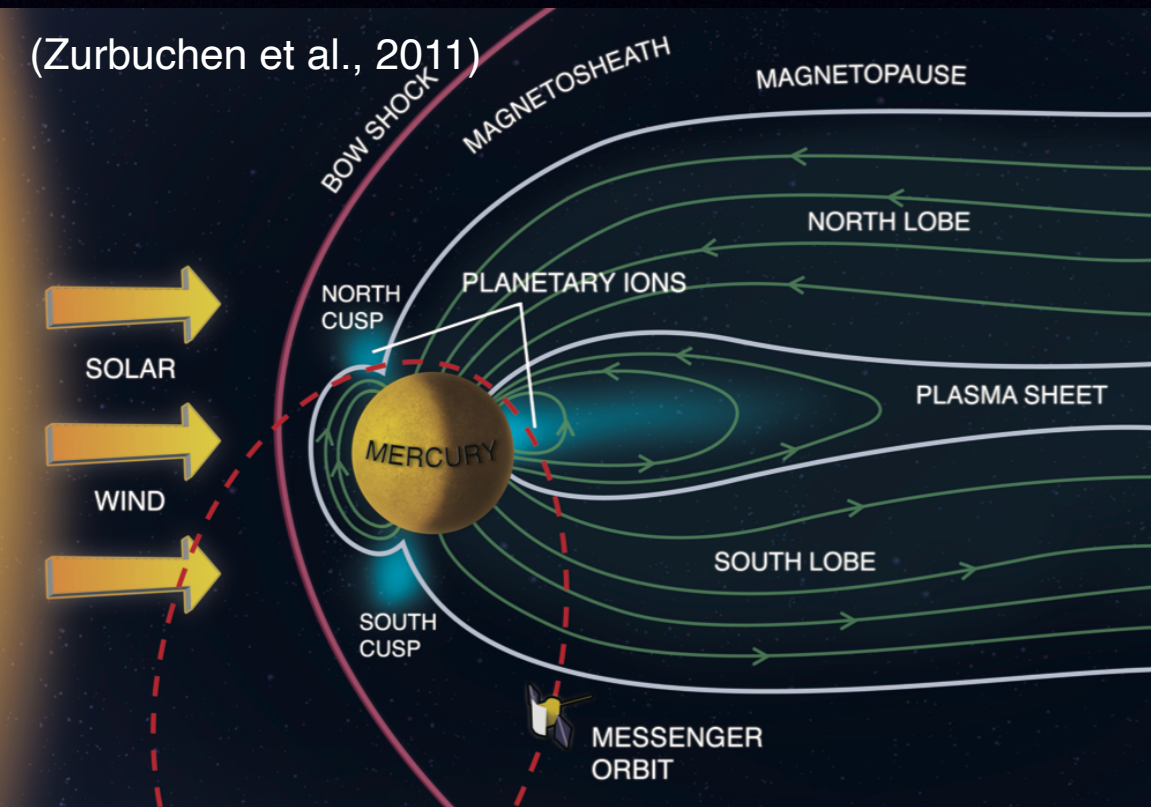


Table 1 Classification scheme of planetary magnetospheres

(Baumjohann et al., 2010)

Planet's or satellite's envelope:

$R_{CF} \gg R_P$

$R_{CF} \ll R_P$

Solid surface

薄い

Obstacle = planetary field

Mercury
(Ganymede)

Obstacle = solid surface

Moon
(Europa, Callisto,
Saturnian icy satellites)

Dense atmosphere

大気の濃さ

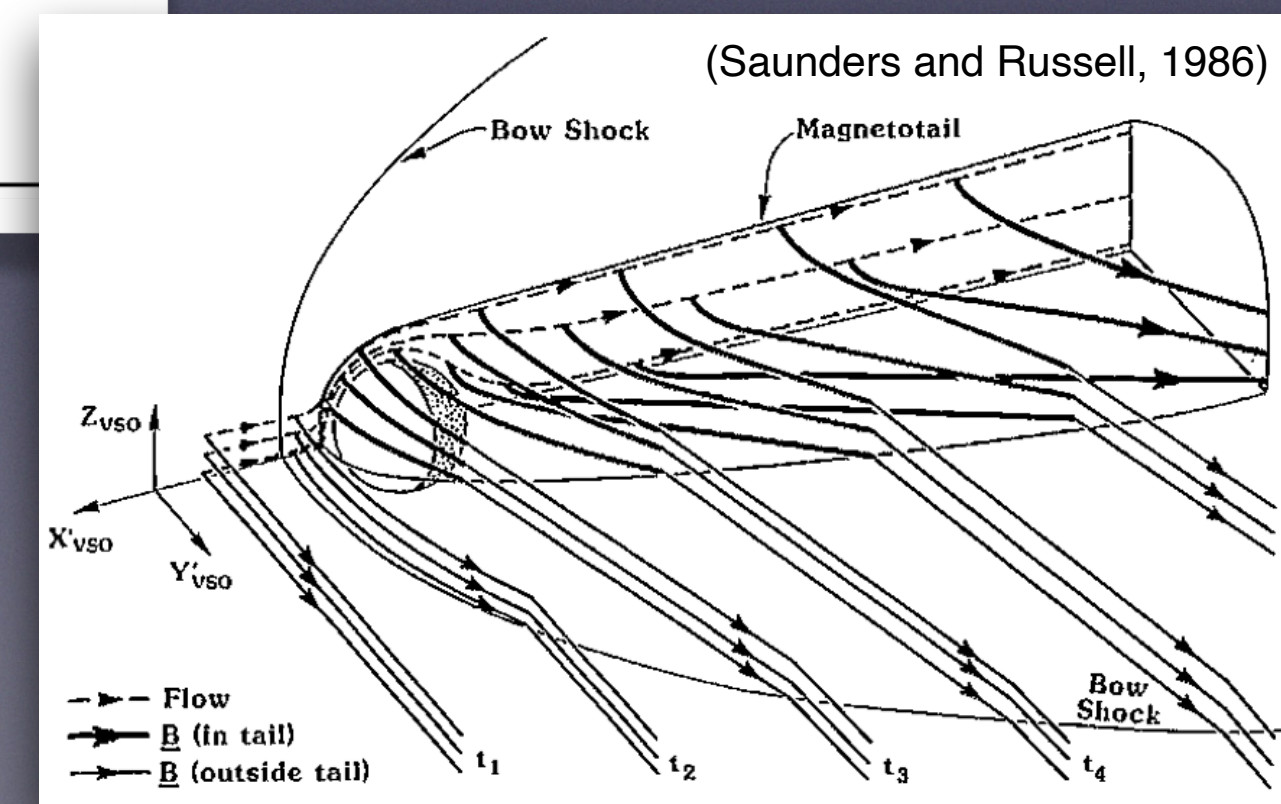
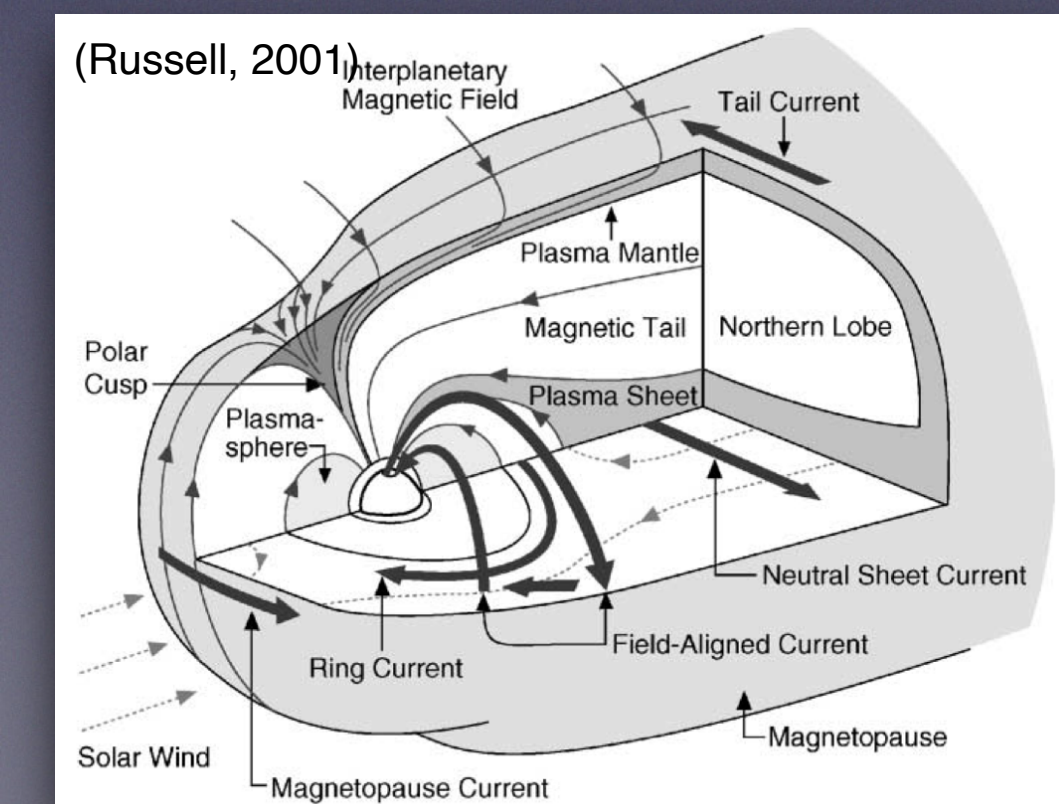
Obstacle = planetary field

Earth
Giant planets

Obstacle = planetary
atmosphere/ionosphere

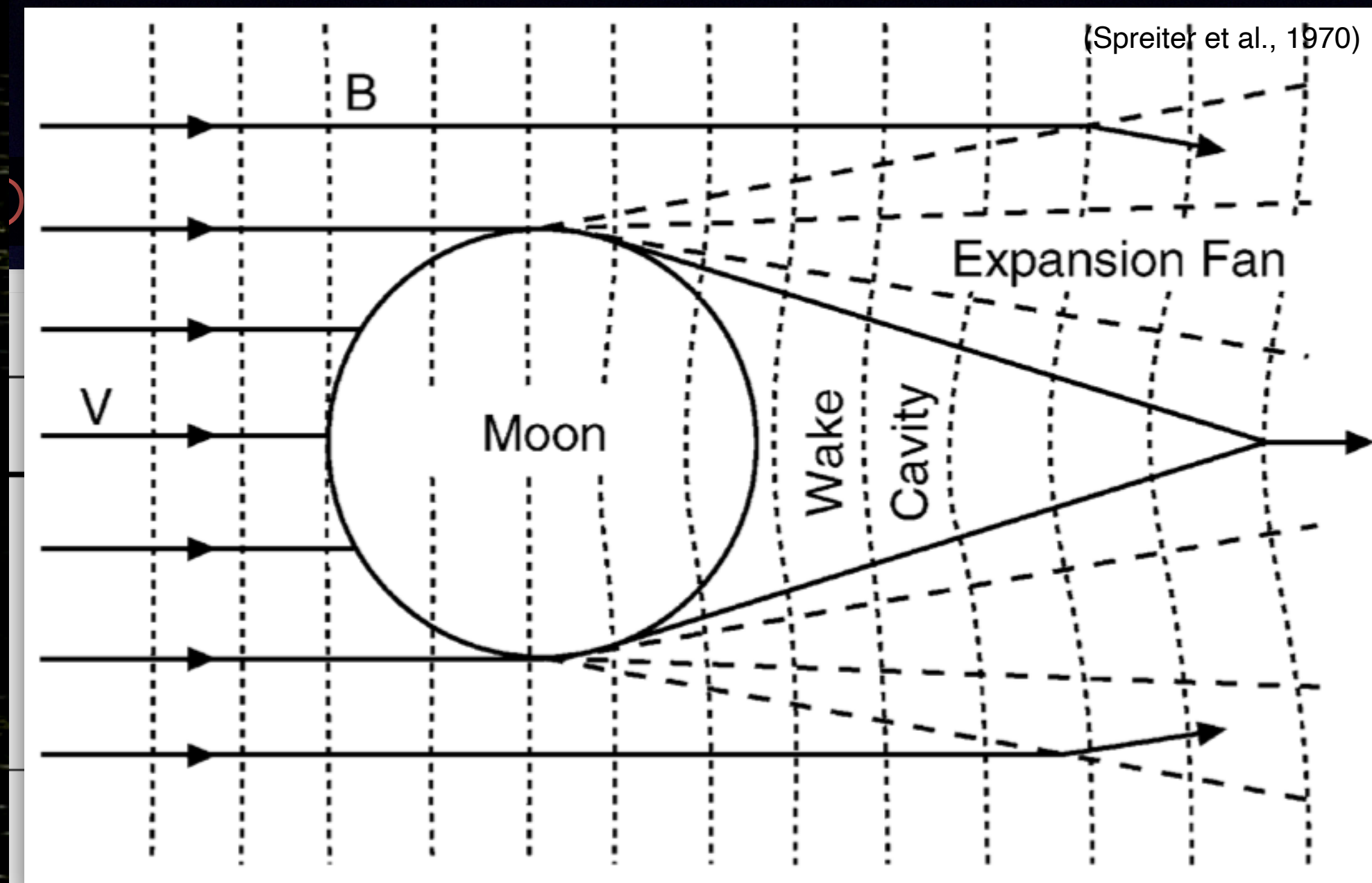
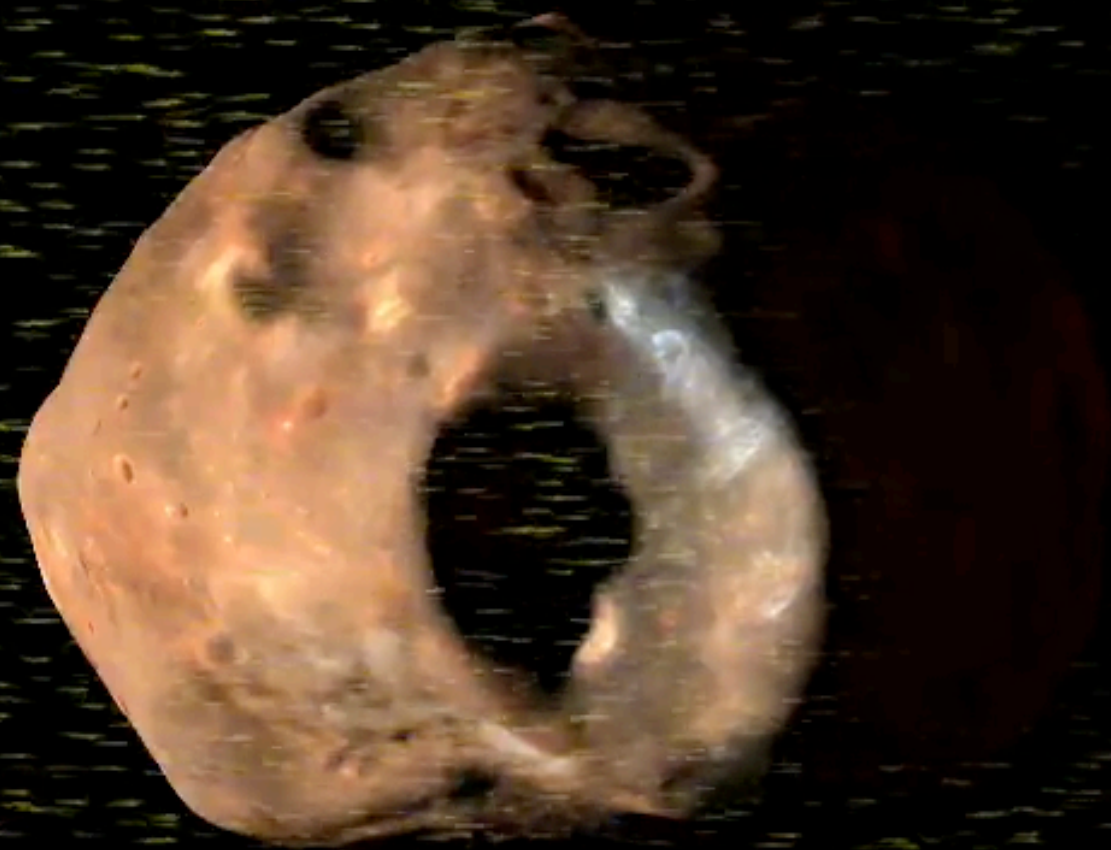
Venus
(Io, Titan)

濃い

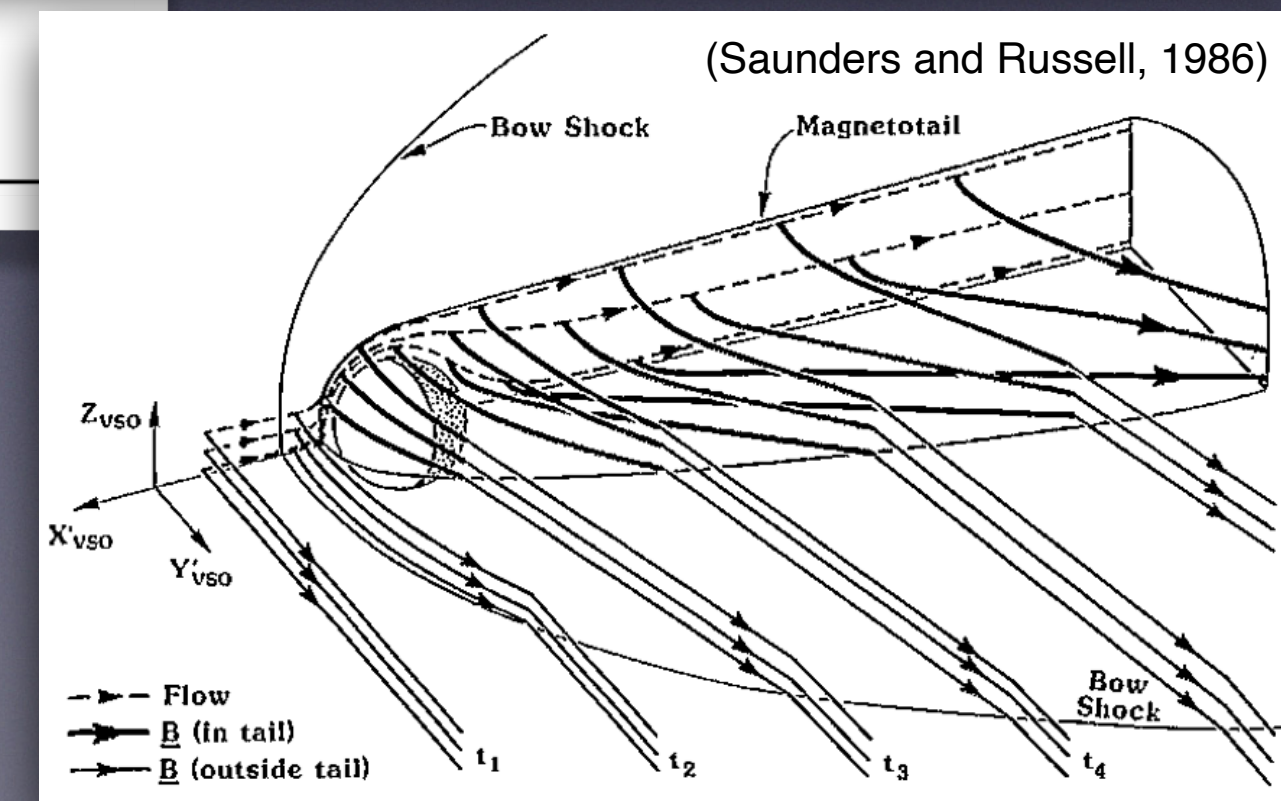


強い ← 磁場の強さ → 弱い

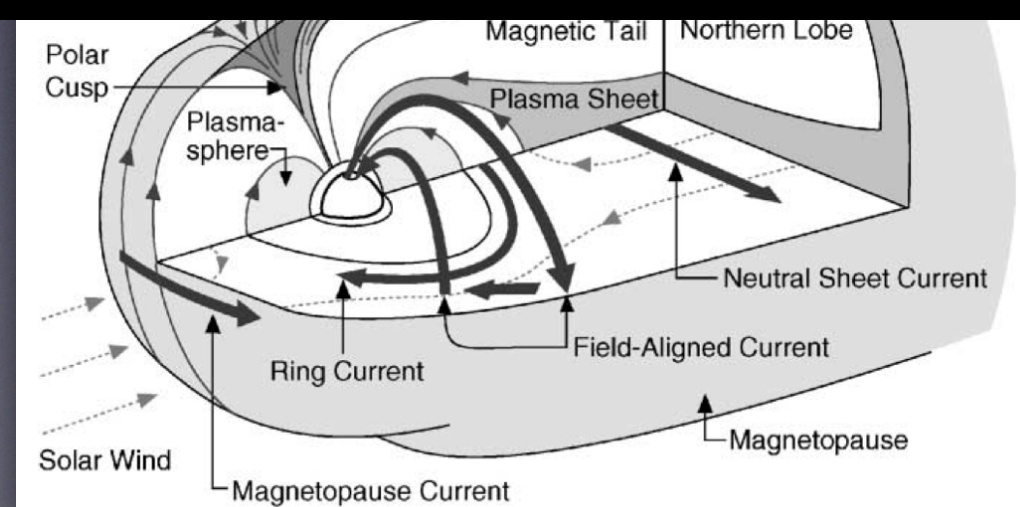
太陽風惑星相互作用の分類



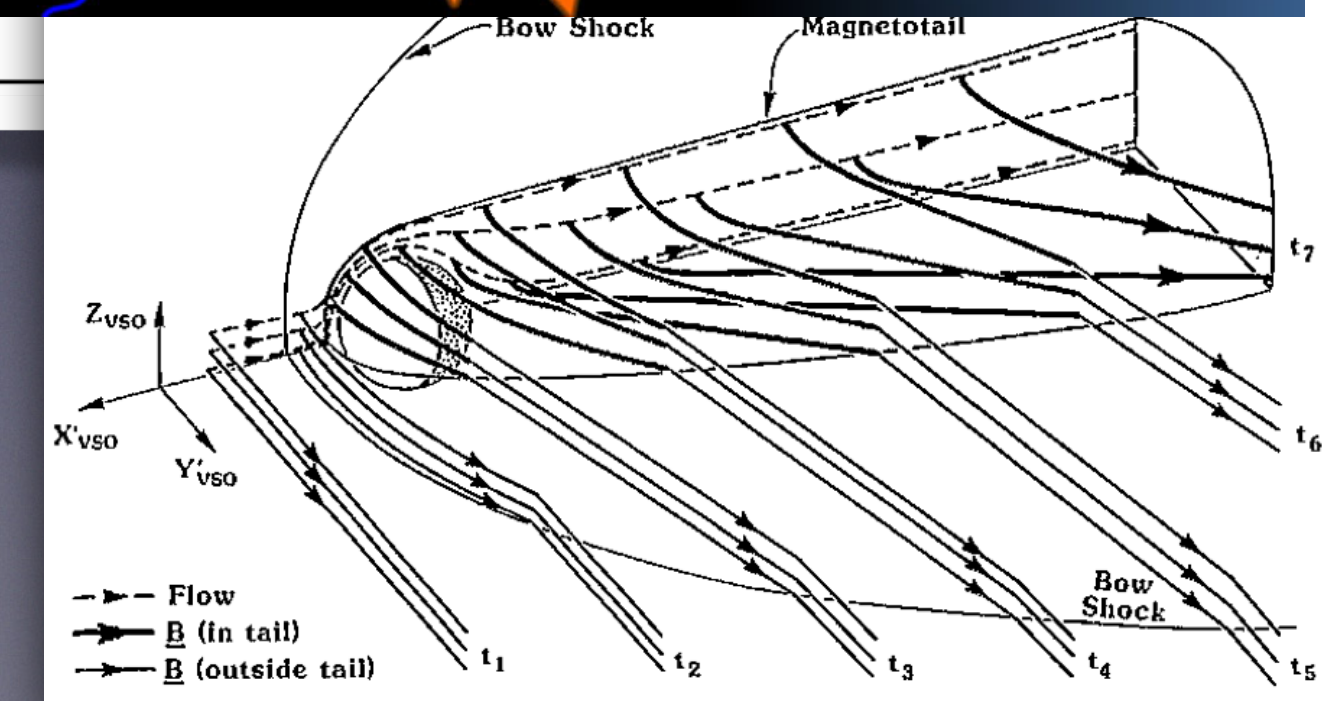
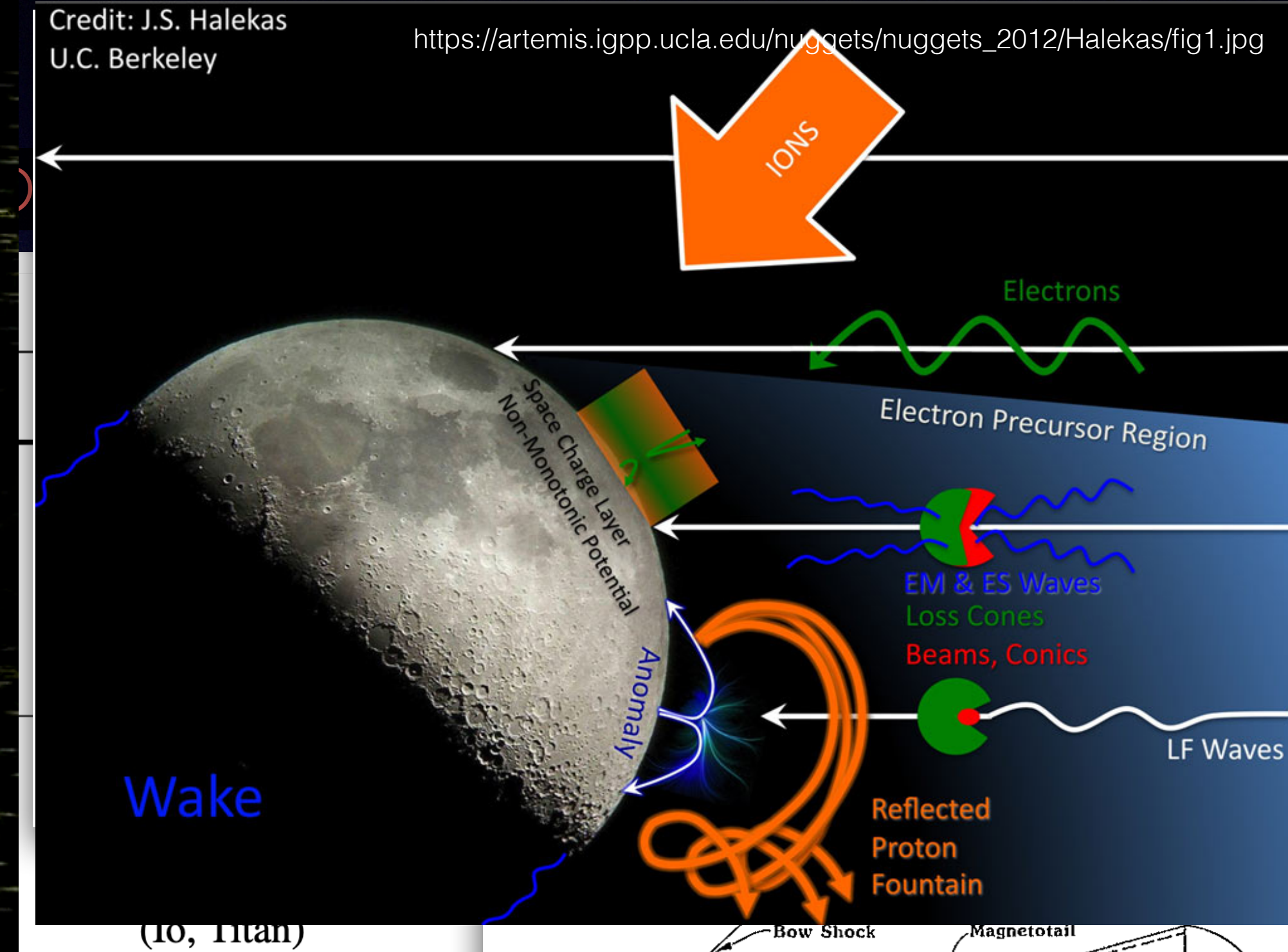
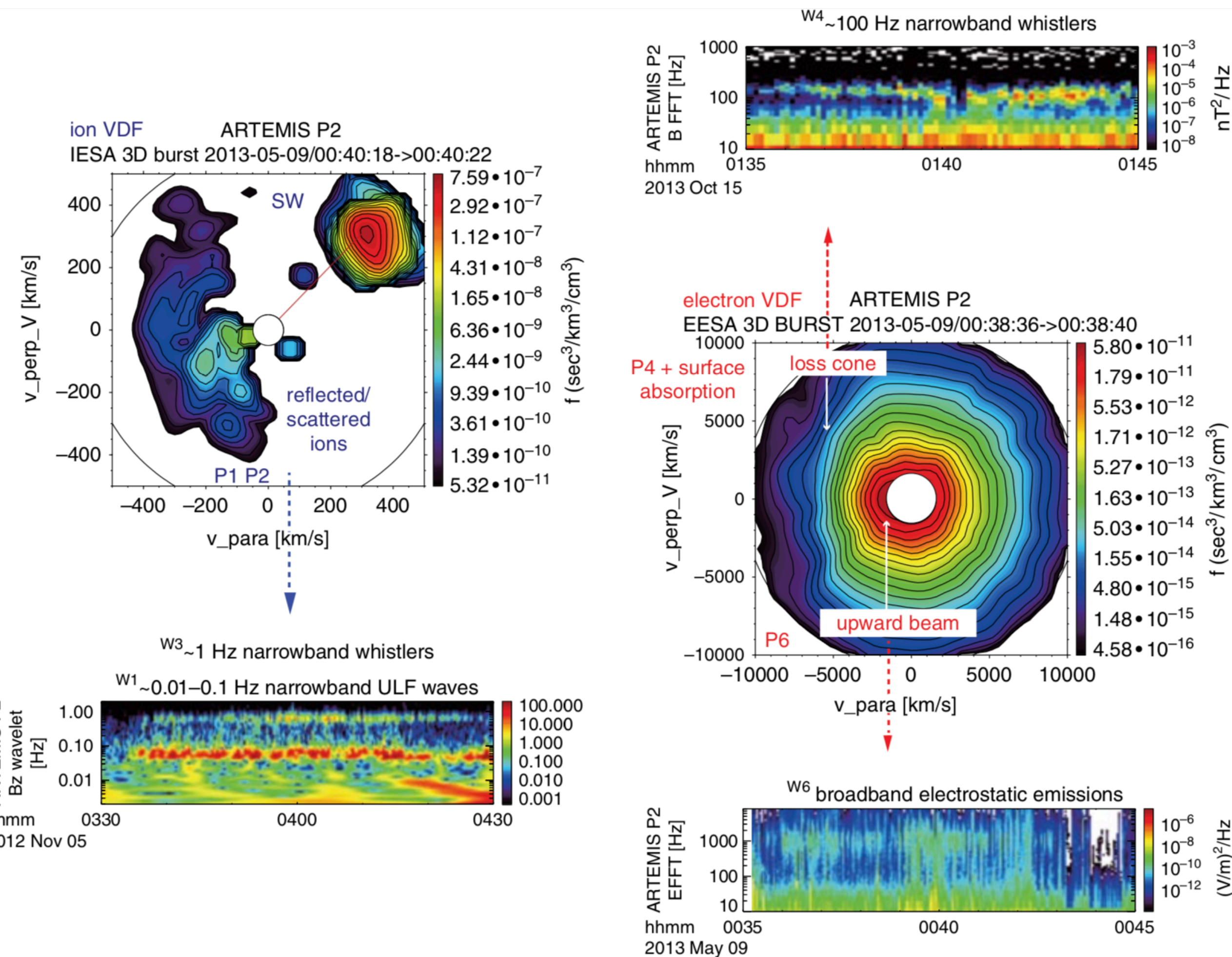
Venus
(Io, Titan)



<https://svs.gsfc.nasa.gov/20252>



太陽風惑星相互作用の分類



From Harada & Halekas (2016)

太陽風惑星相互作用の分類

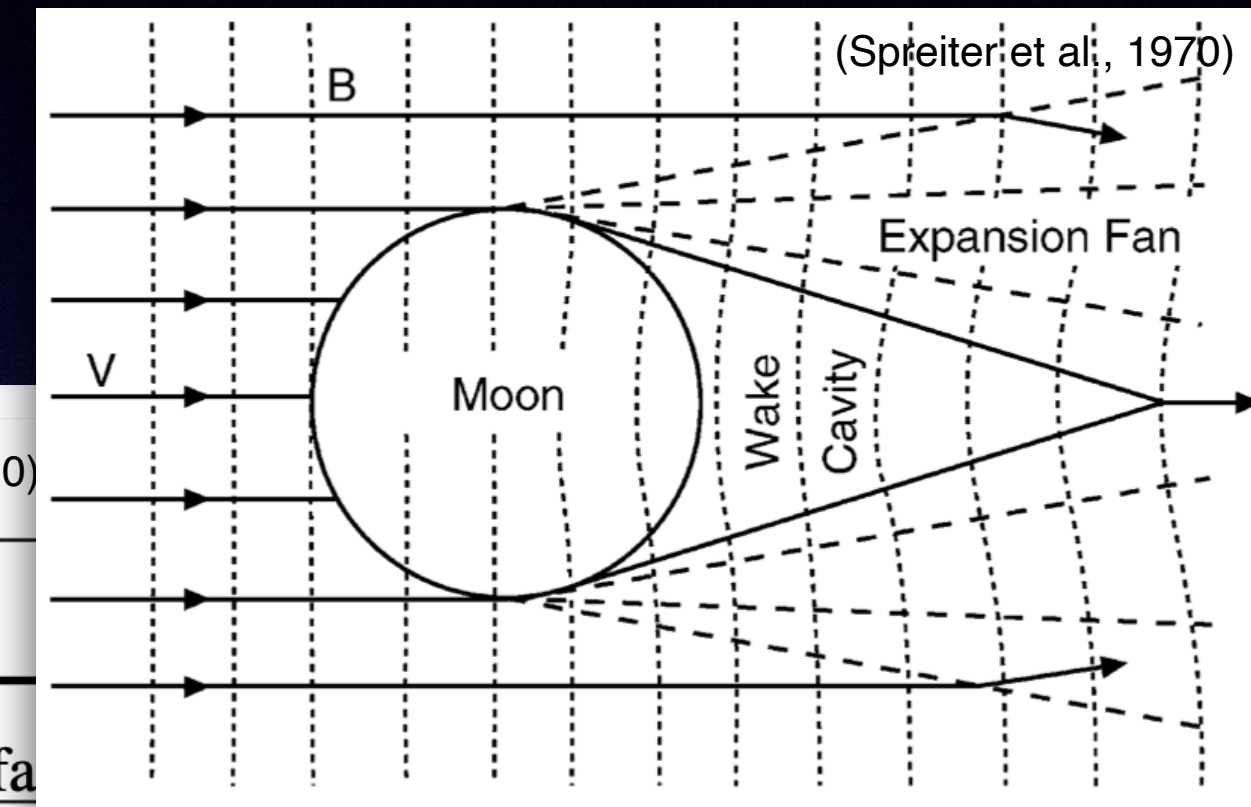
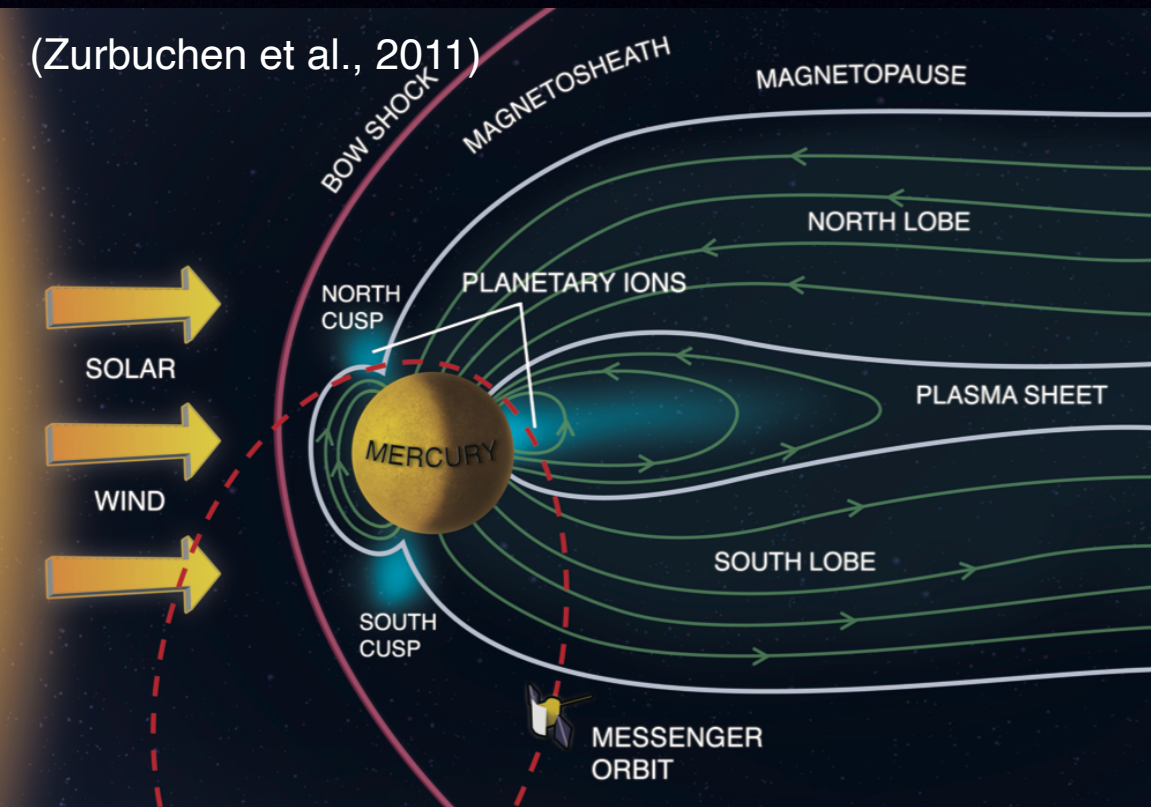


Table 1 Classification scheme of planetary magnetospheres

(Baumjohann et al., 2010)

Planet's or satellite's envelope:

$R_{CF} \gg R_P$

$R_{CF} \ll R_P$

Solid surface

薄い

Obstacle = planetary field

Mercury
(Ganymede)

Obstacle = solid surface

Moon
(Europa, Callisto,
Saturnian icy satellites)

Dense atmosphere

大気の濃さ

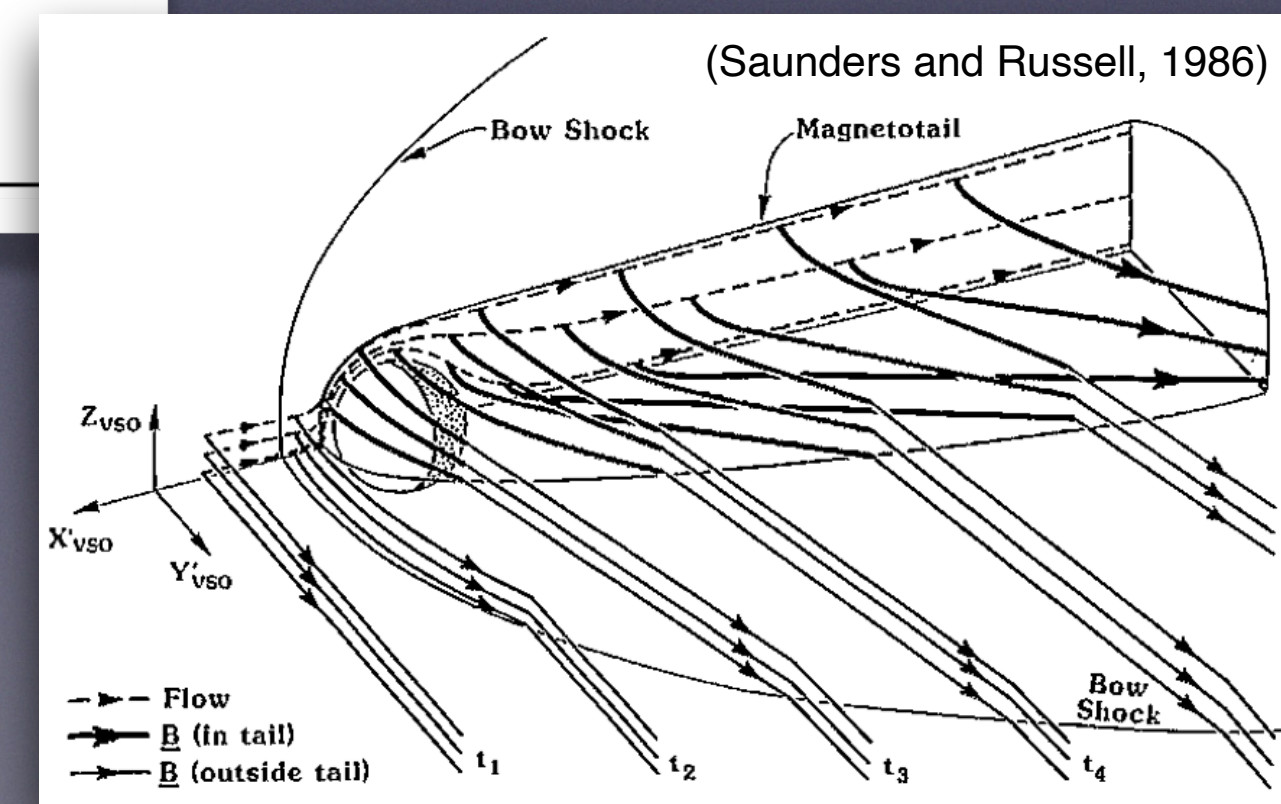
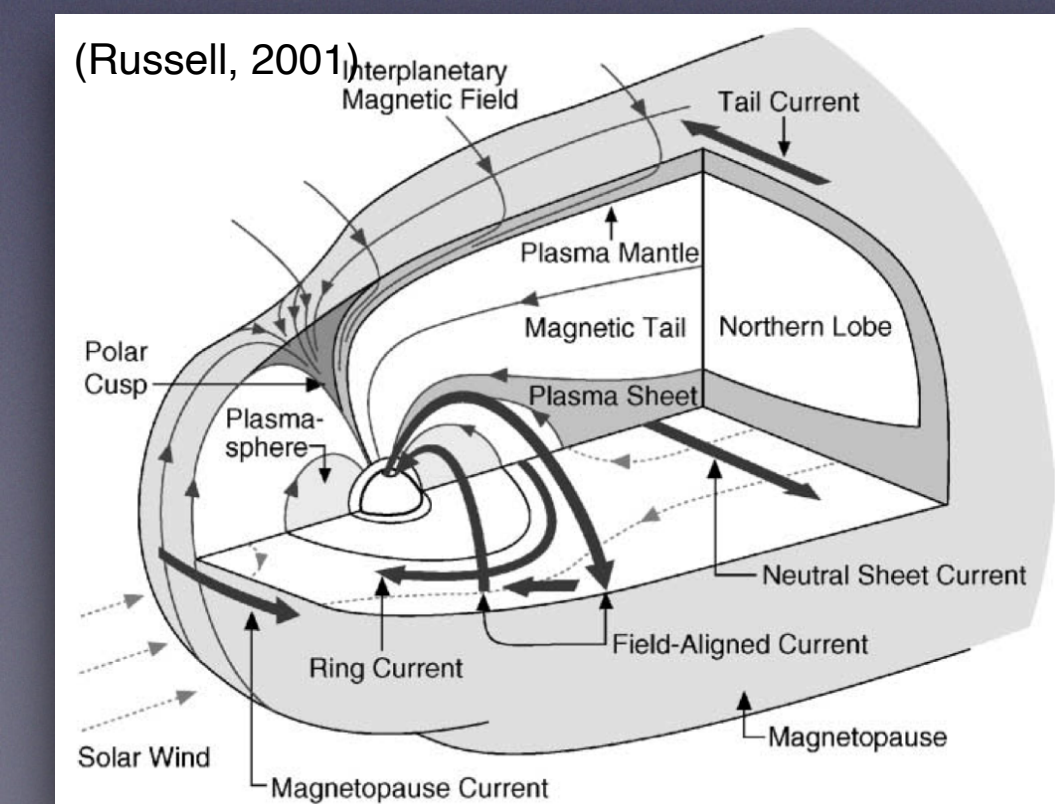
Obstacle = planetary field

Earth
Giant planets

Obstacle = planetary
atmosphere/ionosphere

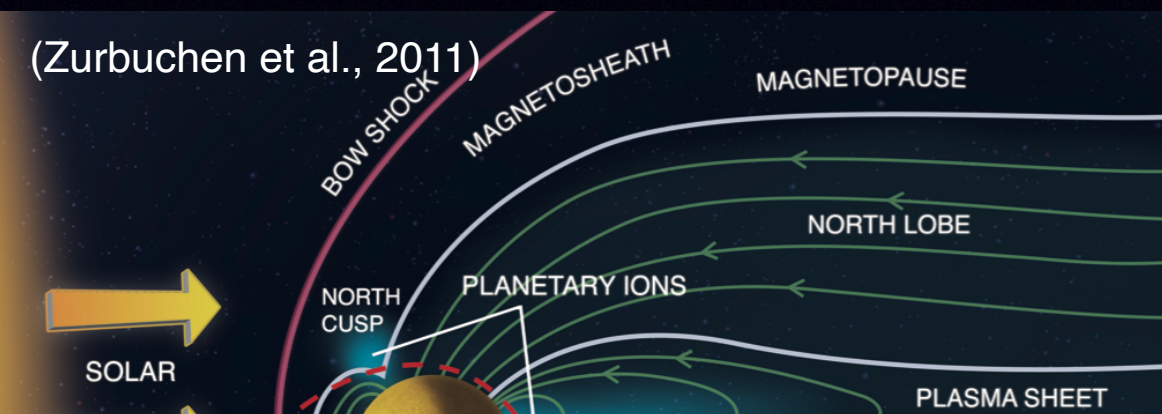
Venus
(Io, Titan)

濃い

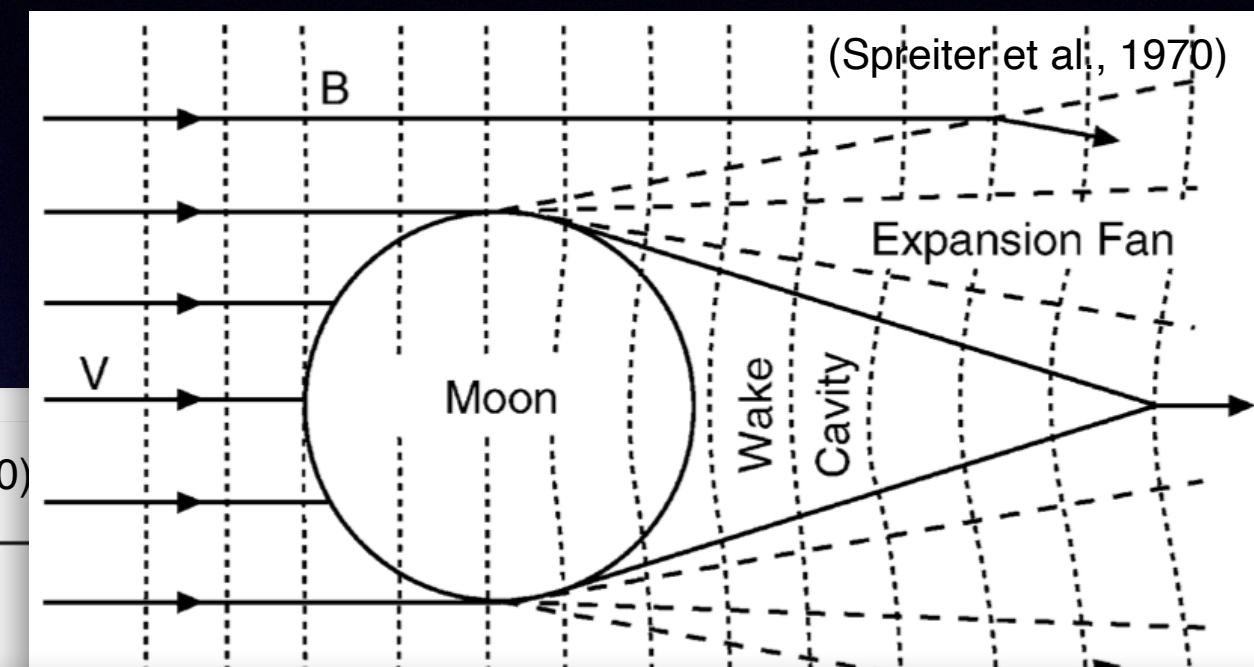


強い ← 磁場の強さ → 弱い

太陽風惑星相互作用の分類

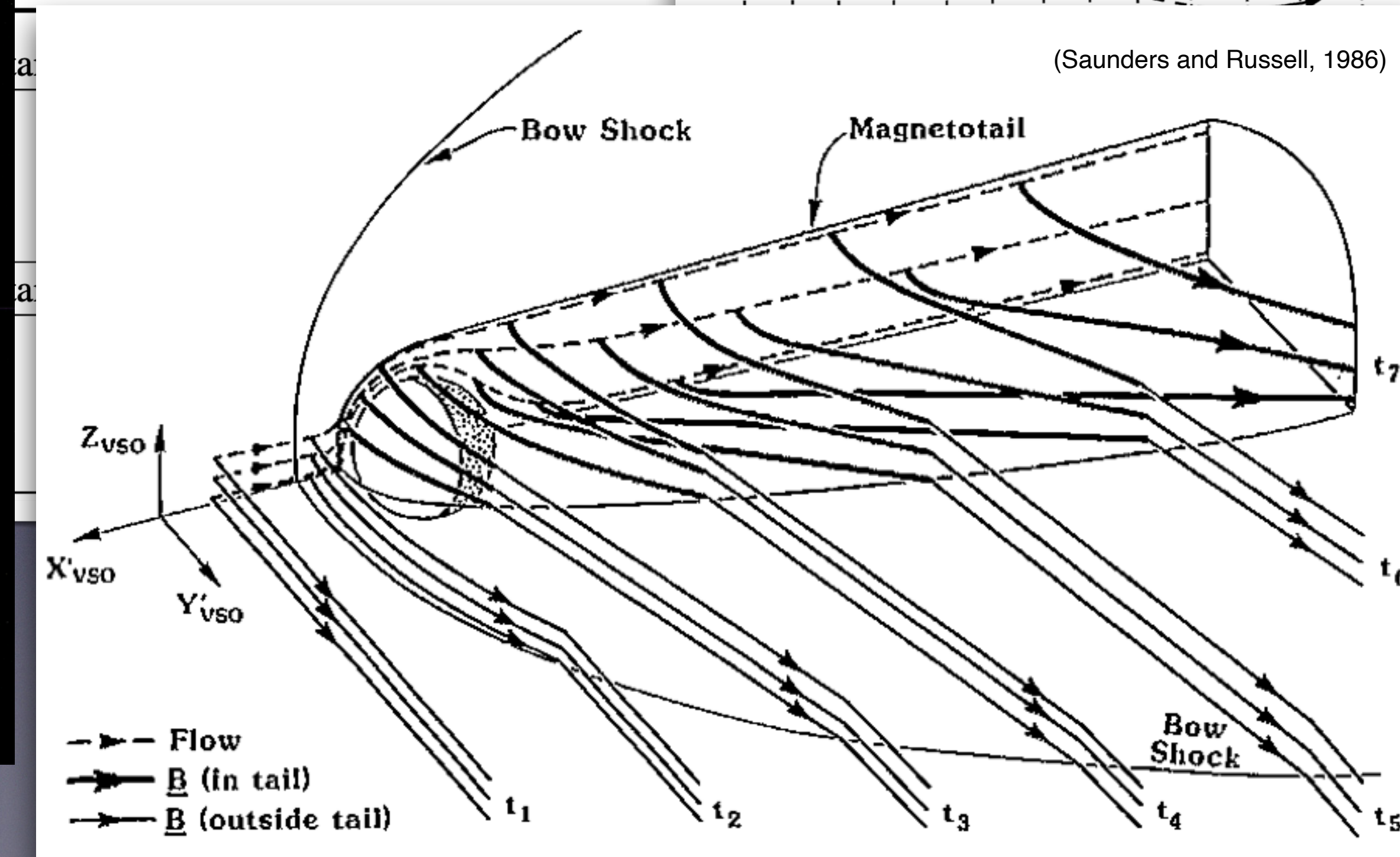


強い ← 磁場の強さ → 弱い

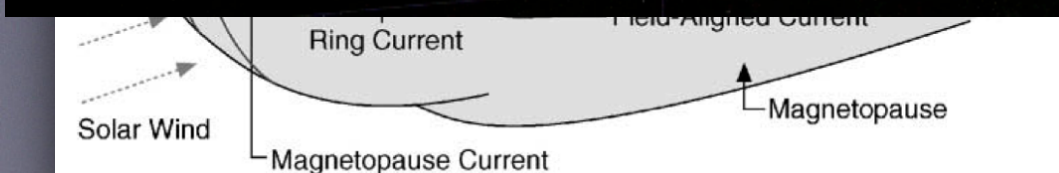


(Baumjohann et al., 2010)

$$R_{CF} \ll R_P$$



<https://svs.gsfc.nasa.gov/4370>



太陽風惑星



太陽風惑星相互作用の分類

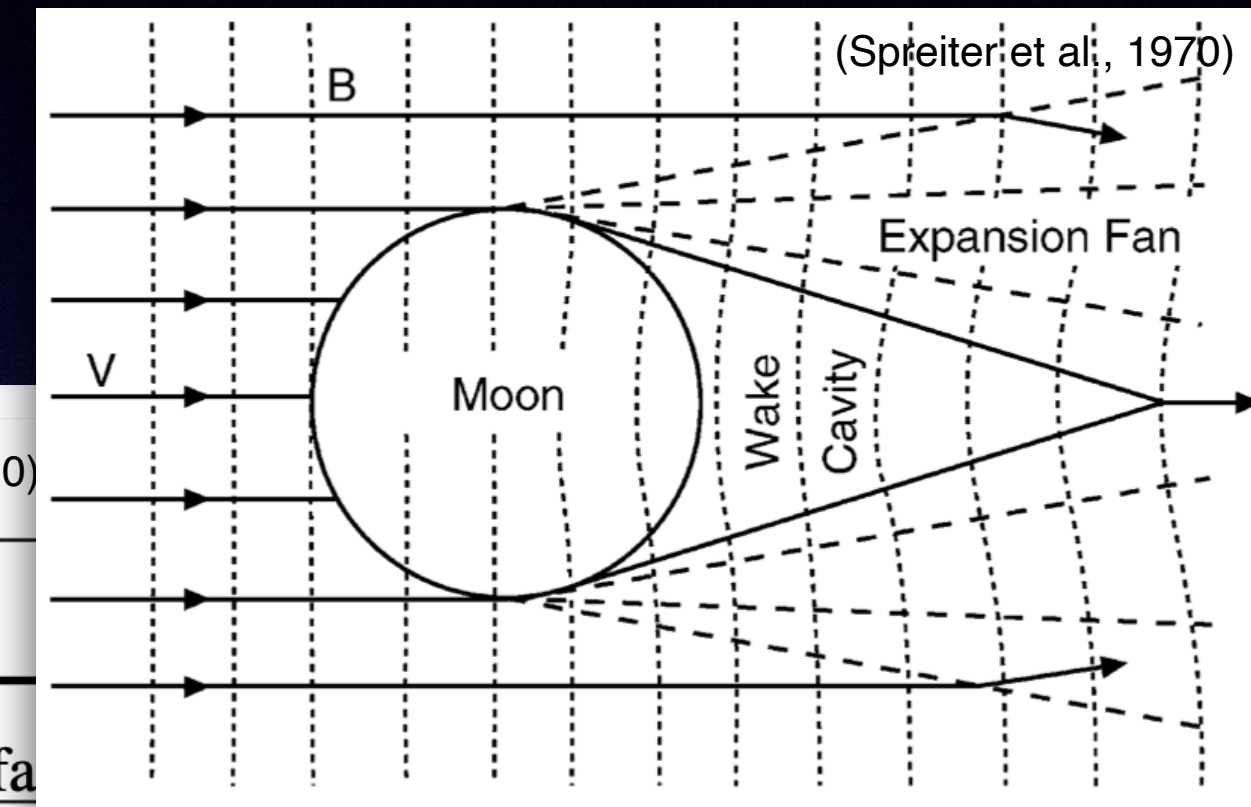
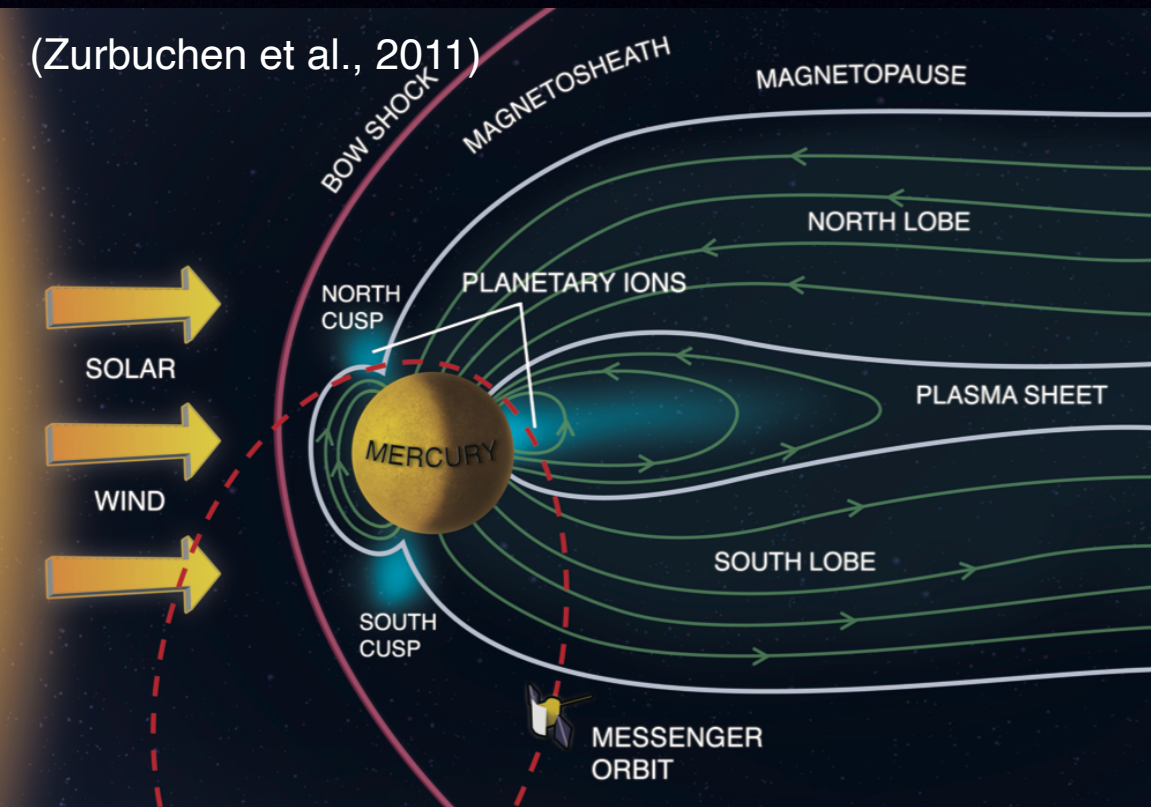


Table 1 Classification scheme of planetary magnetospheres

(Baumjohann et al., 2010)

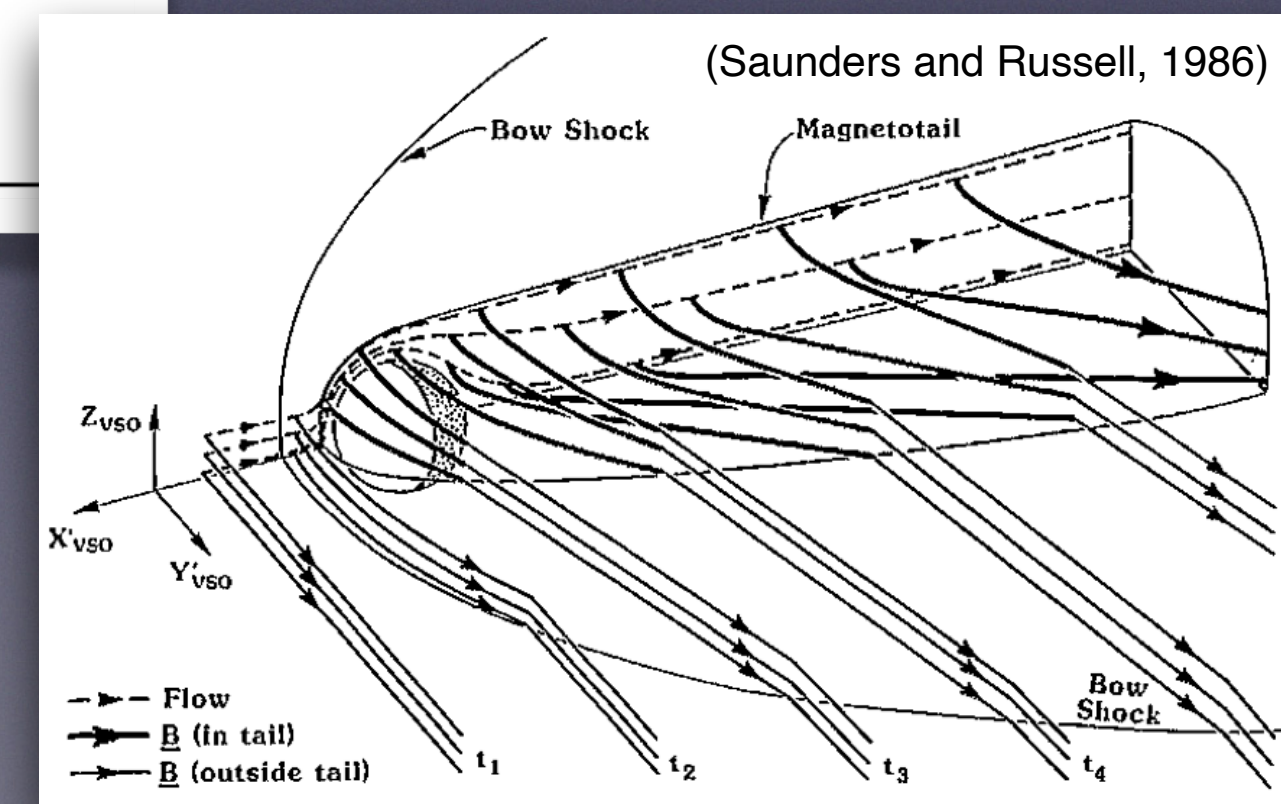
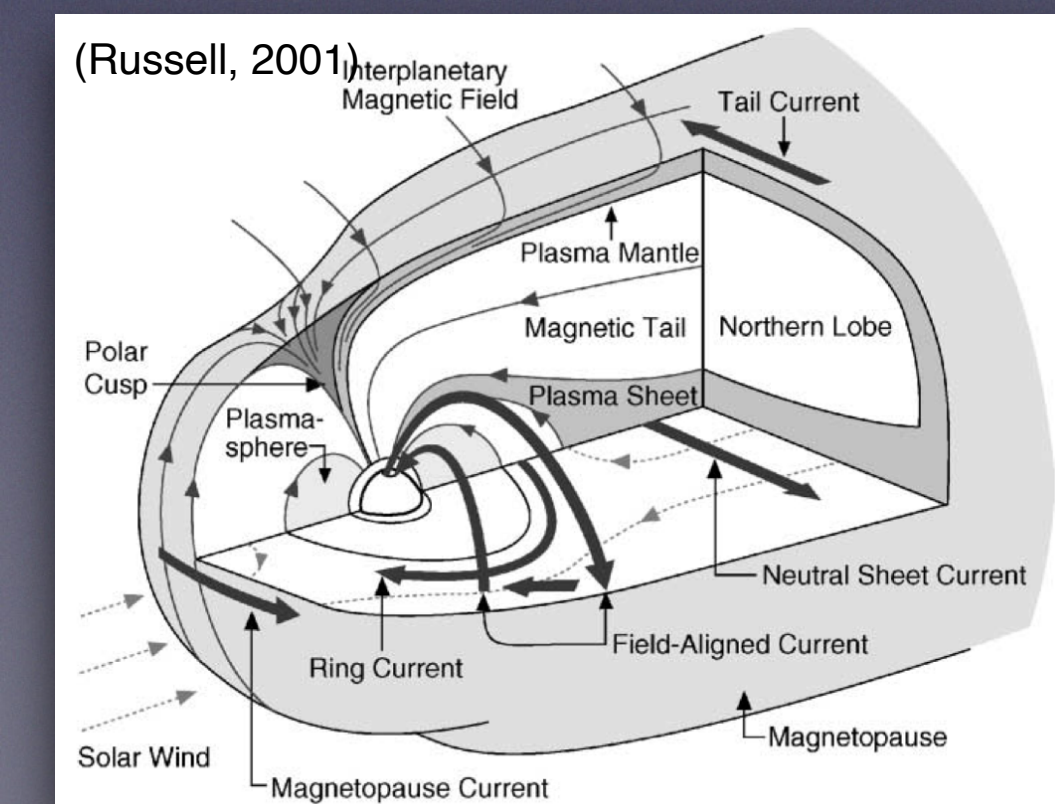
Planet's or satellite's envelope:	$R_{CF} \gg R_P$	$R_{CF} \ll R_P$
Solid surface	薄い Obstacle = planetary field Mercury (Ganymede)	Obstacle = solid surface Moon (Europa, Callisto, Saturnian icy satellites)
Dense atmosphere	大気の濃さ Obstacle = planetary field Earth Giant planets	Obstacle = planetary atmosphere/ionosphere Venus (Io, Titan)

強い ← 磁場の強さ → 弱い

薄い

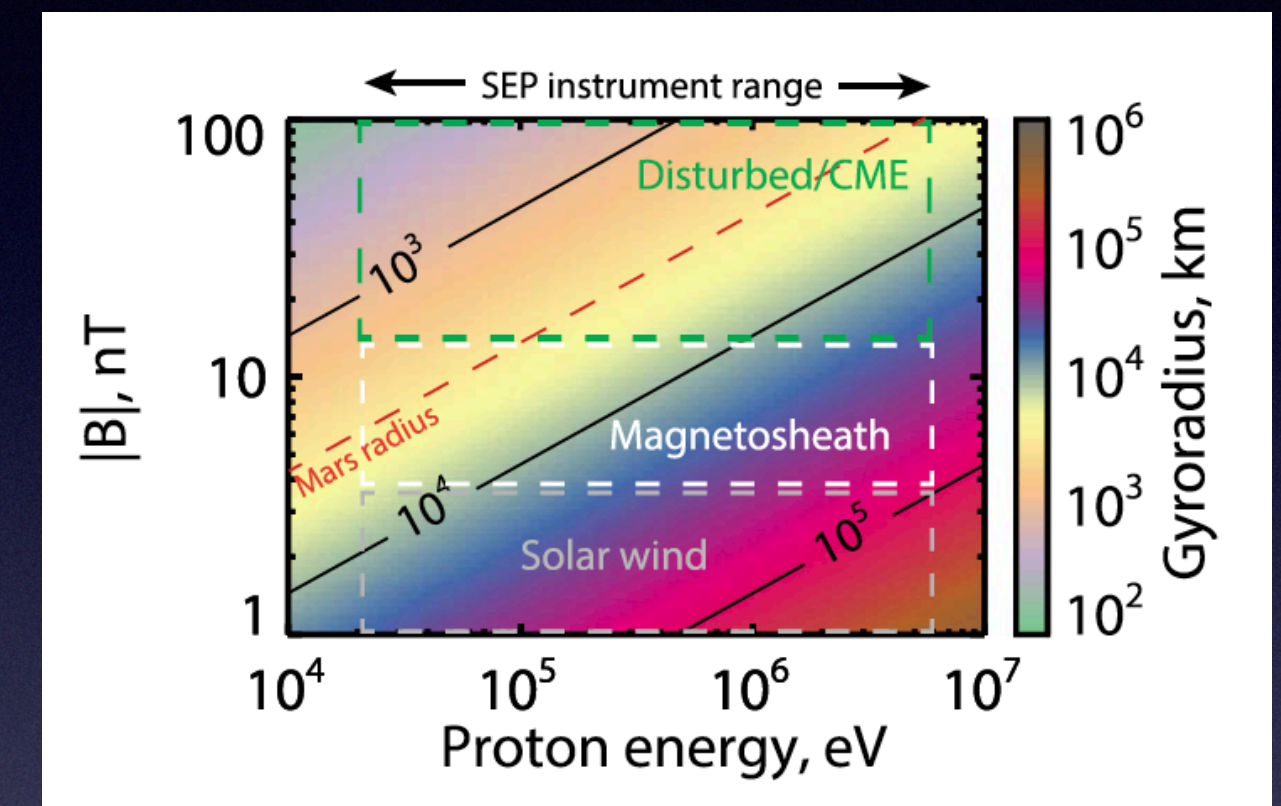
大気の濃さ

濃い

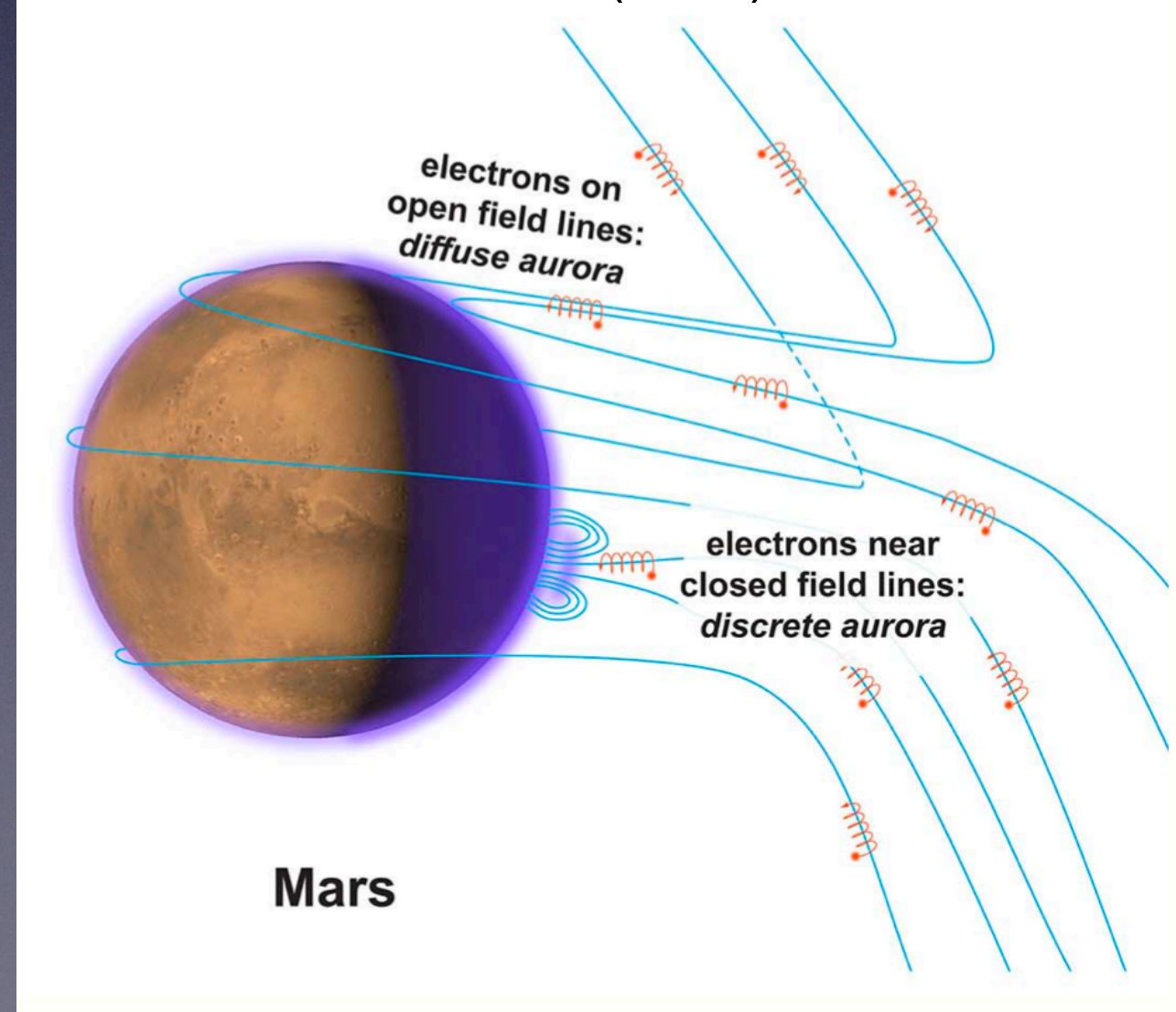


太陽高エネルギー粒子の 火星大気への侵入経路

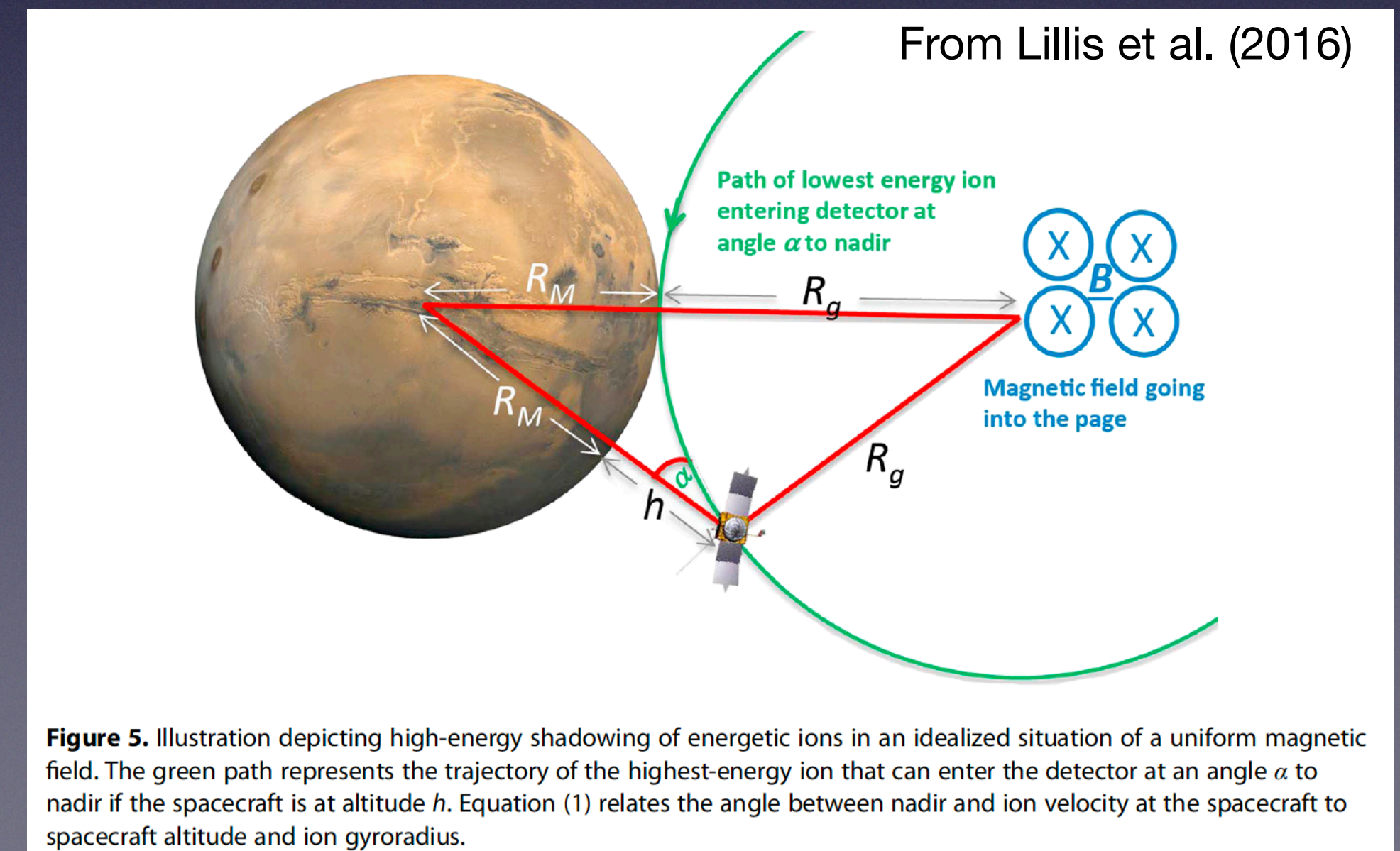
- 火星に降り注ぐ太陽高エネルギー粒子の場合、
 - ~100 keV電子： $R_g \ll R_M \rightarrow$ 磁力線に沿って輸送
 - ~MeV陽子： $R_g > \sim R_M \rightarrow$ 磁場の効果は限定的



From Schneider et al. (2015)



From Lillis et al. (2016)



太陽風惑星相互作用：

まとめ

- 太陽風と惑星の相互作用は、惑星の大気の濃さや磁場の強さに応じて様々な様相を呈する。「**太陽風惑星相互作用の多様性**」
- どのエネルギーの太陽放射線（太陽高エネルギー粒子）がどの程度、惑星大気や表面環境へ到達するかは、惑星周辺の電磁環境によって決定される。

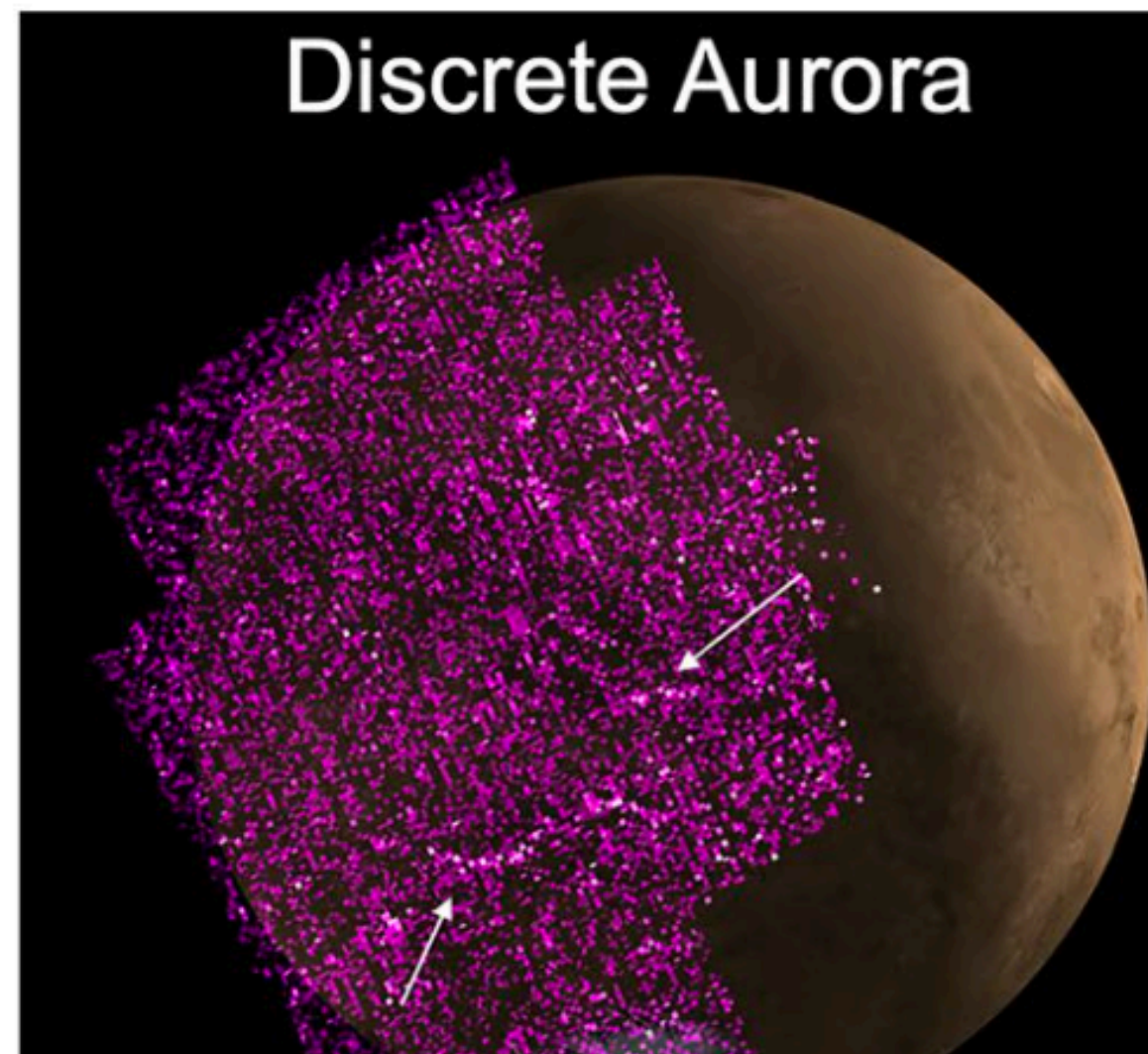
目次

- 太陽風惑星相互作用
- 火星大気への太陽高エネルギー粒子の影響
 - 火星オーロラの発光
 - 電波吸収の増強
- 月面への太陽高エネルギー粒子の影響
- まとめ

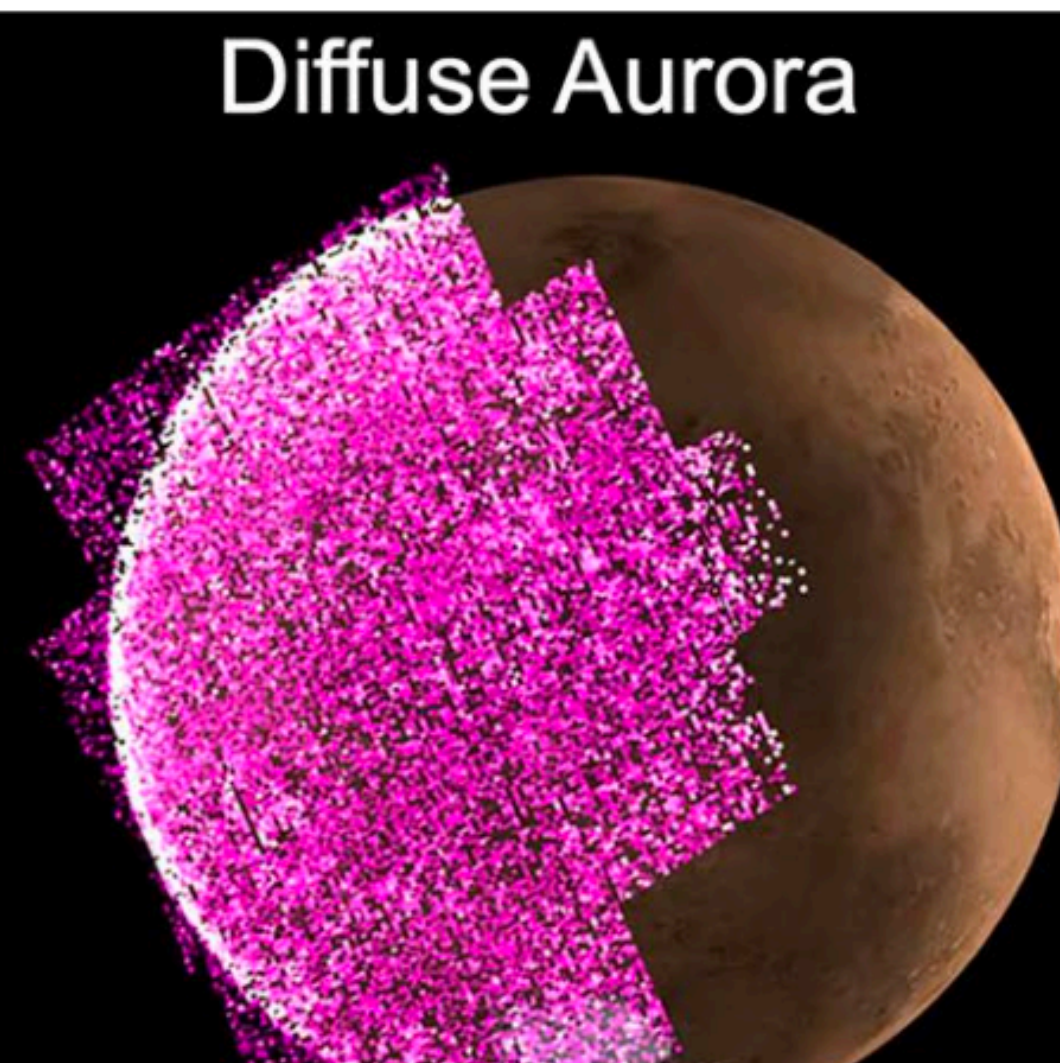
3種類の火星オーロラ

火星ディスクリートオーロラ：

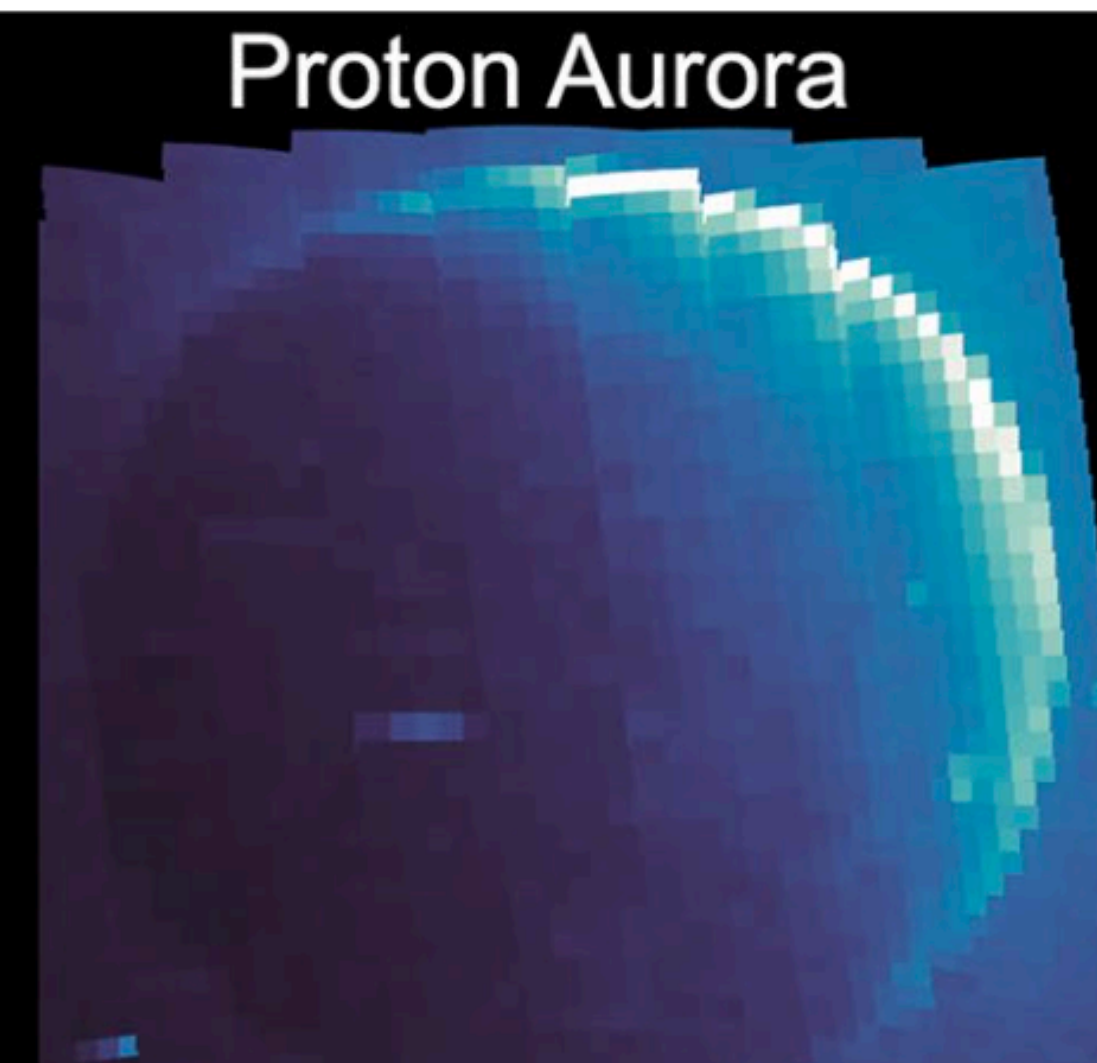
超熱的 (>5 eV) 電子の夜側上層大気への降り込みによって引き起こされる、**空間的に限定**された領域から発光 (Bertaux et al., 2005; Brain et al., 2006; Leblanc et al., 2006, 2008; Lillis et al., 2022; Schneider et al., 2021; Soret et al., 2021)。



Discrete Aurora



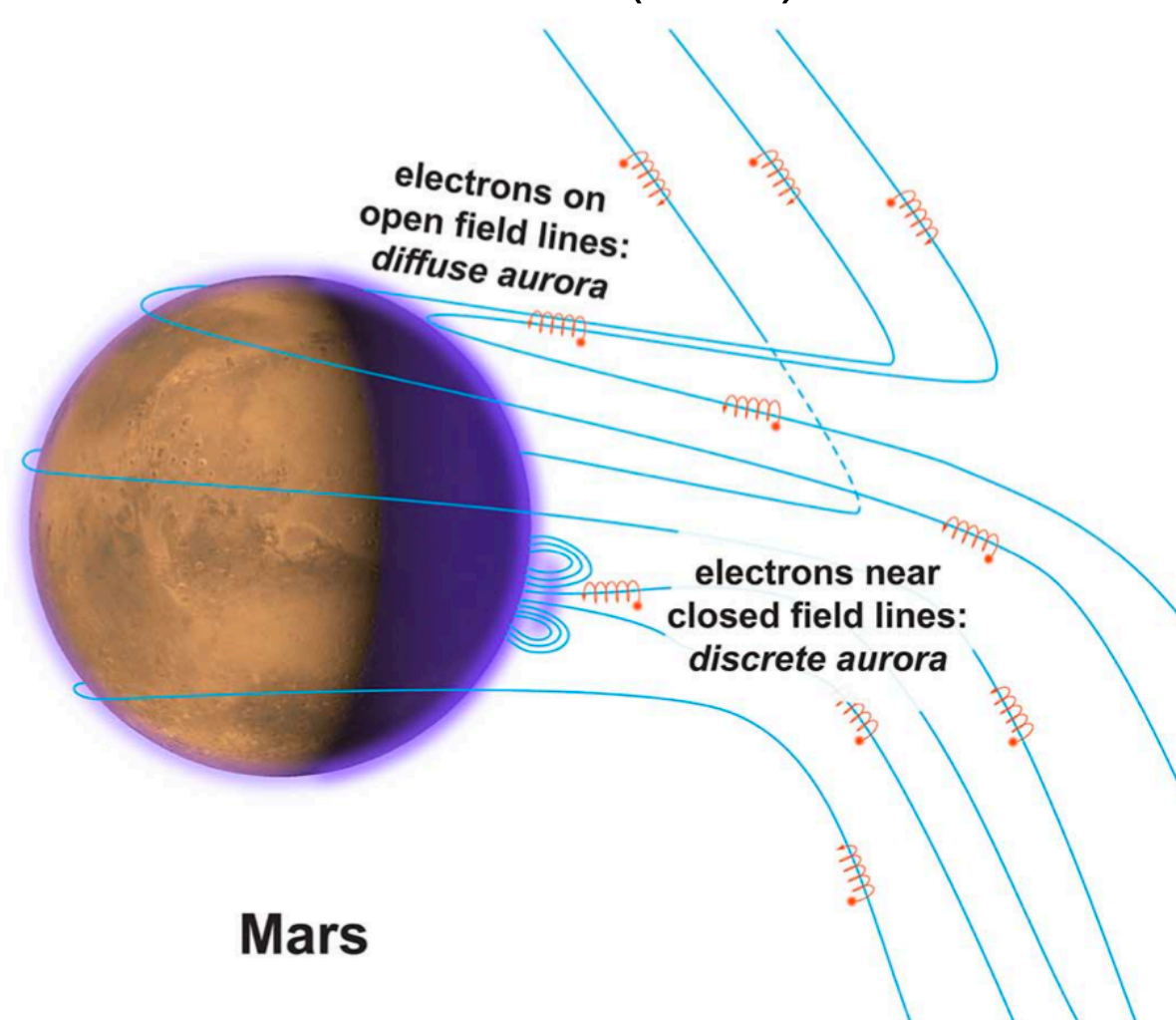
Diffuse Aurora



Proton Aurora

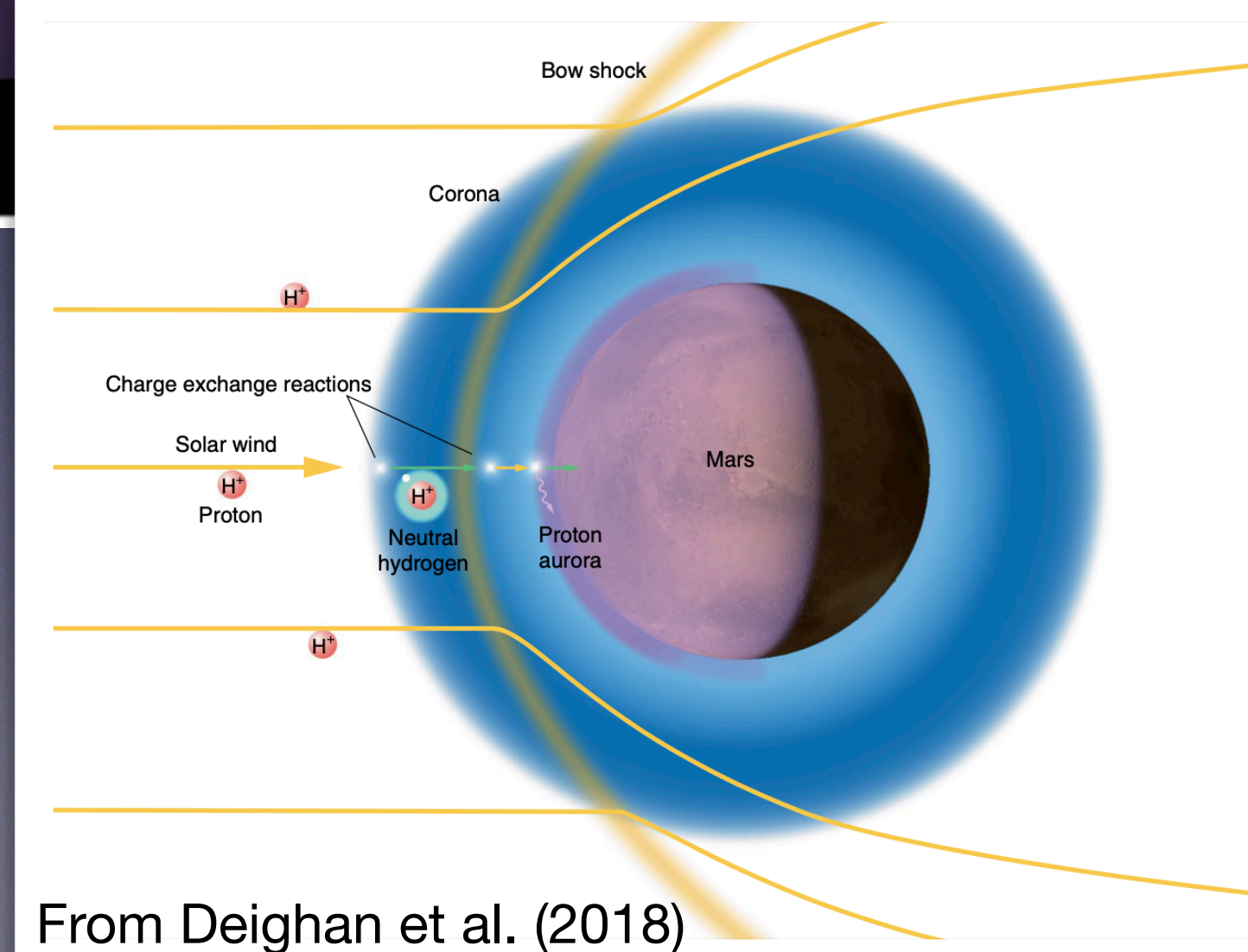
火星プロトンオーロラ： 降下プロトンが大気の中性粒子と電荷交換し生成される、励起状態の水素原子からの発光。火星では、**太陽風プロトン**が外圏水素コロナと電荷交換し、高速中性粒子として昼側電離圏に侵入、電離圏で更に電荷交換反応を繰り返す (Deighan et al., 2018; Hughes et al., 2019; Ritter et al., 2018; Chaffin et al., 2022)。

From Schneider et al. (2015)



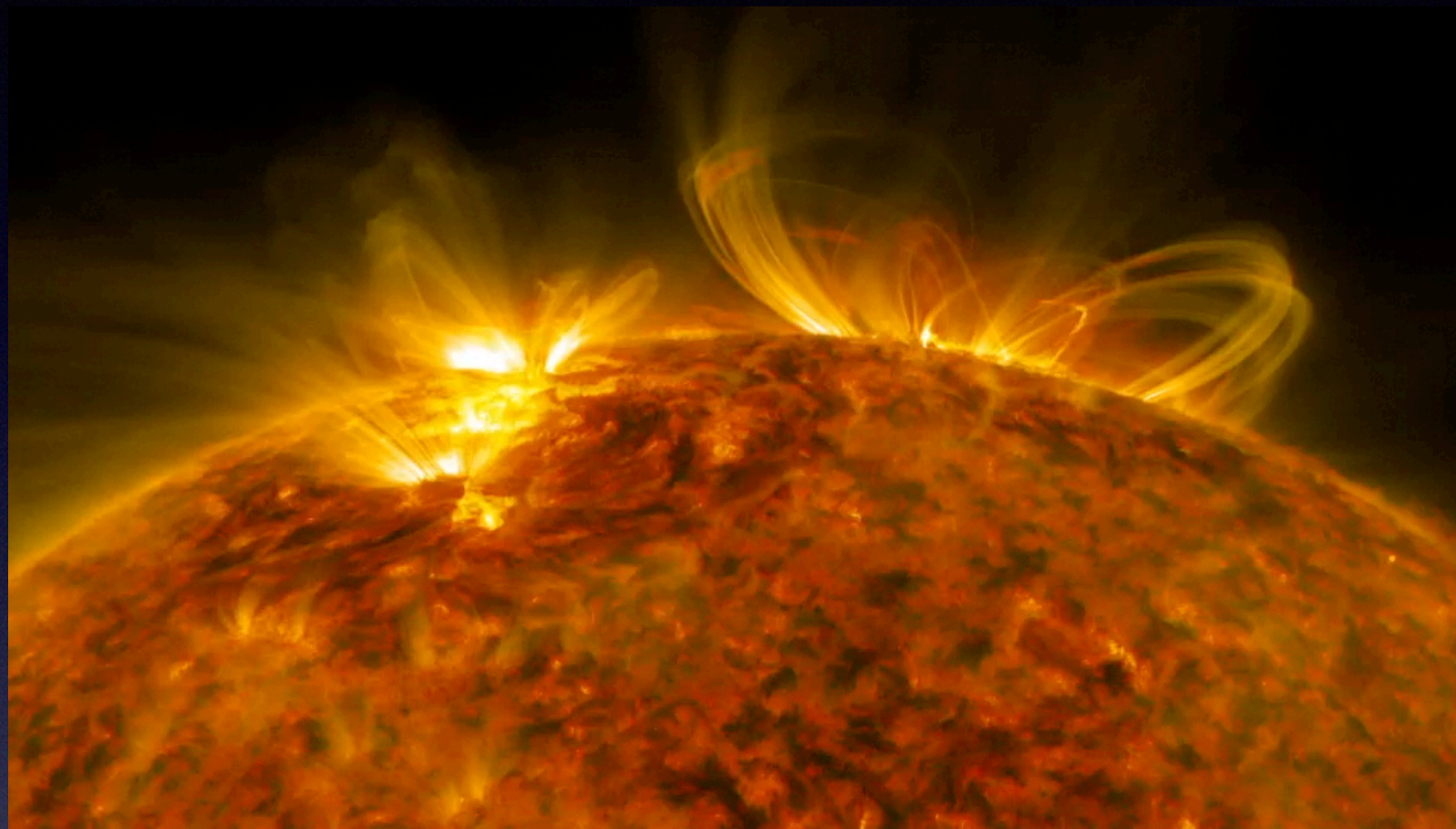
From Schneider et al. (2021)

火星ディフューズオーロラ： 太陽高エネルギー粒子（電子・プロトン）が全球的に大気に降り込み、**夜側全体が発光** (Gerard et al., 2017; Nakamura et al., 2022; Schneider et al., 2015)。

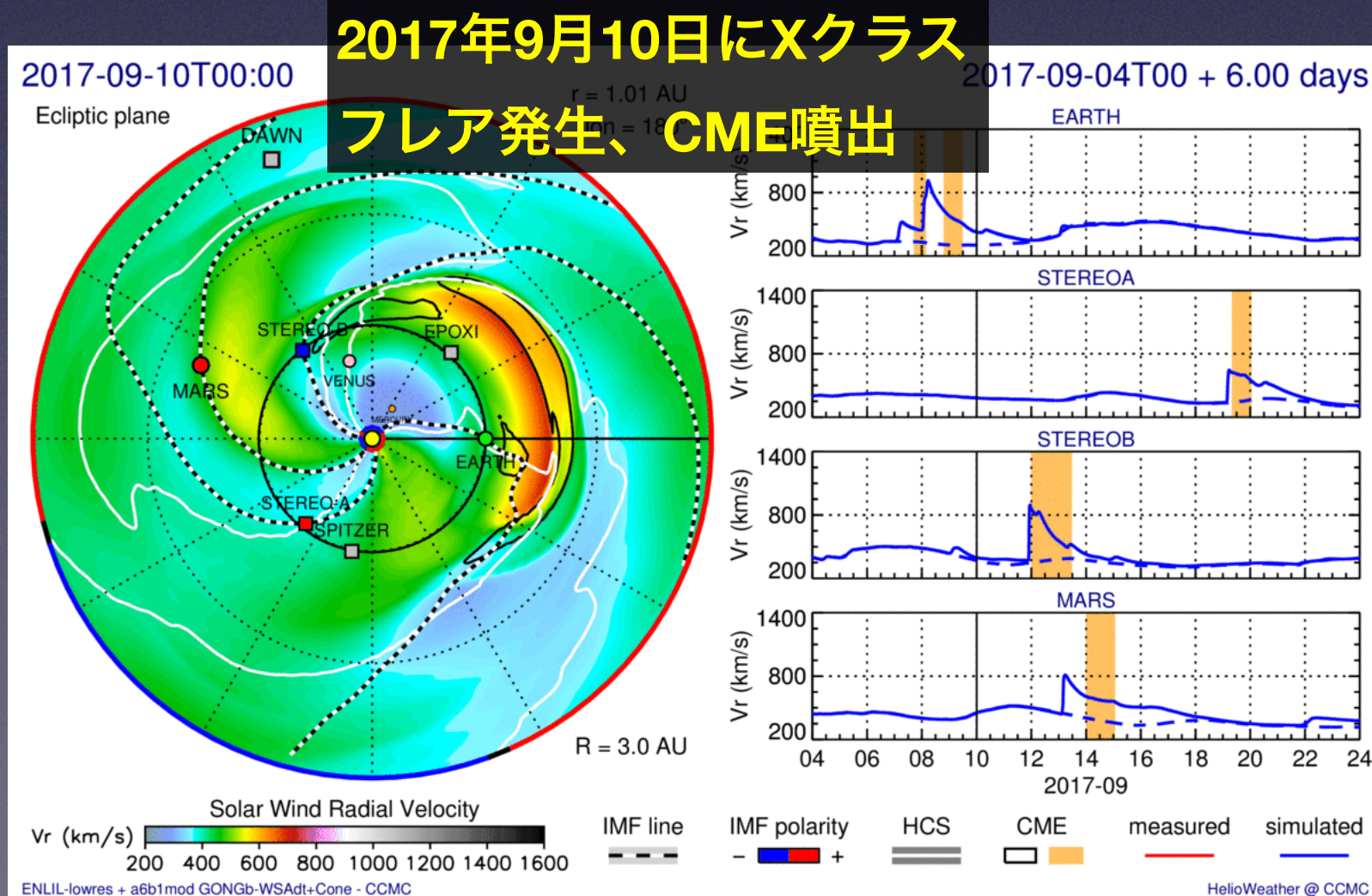


From Deighan et al. (2018)

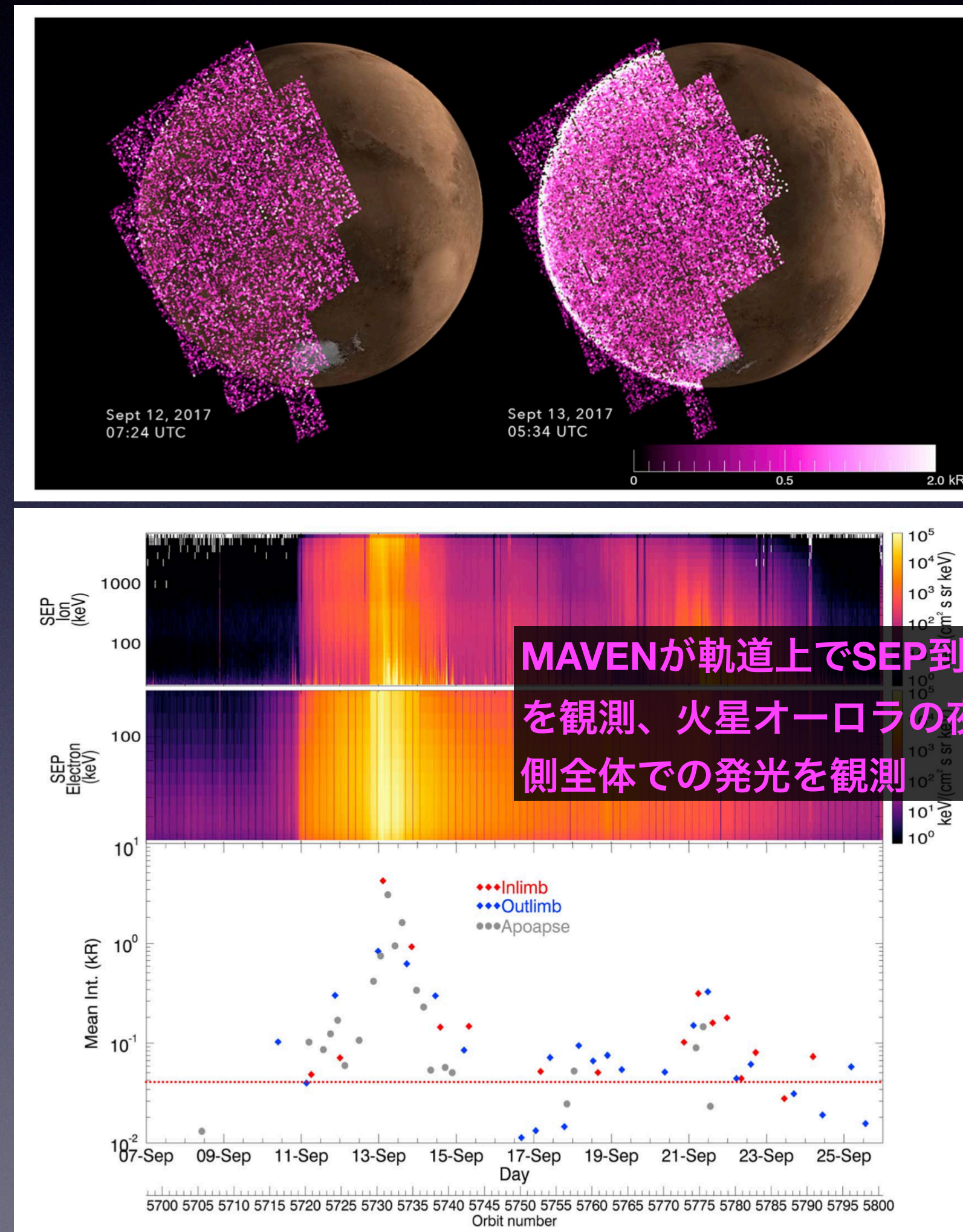
“10 September 2017 Solar Event”



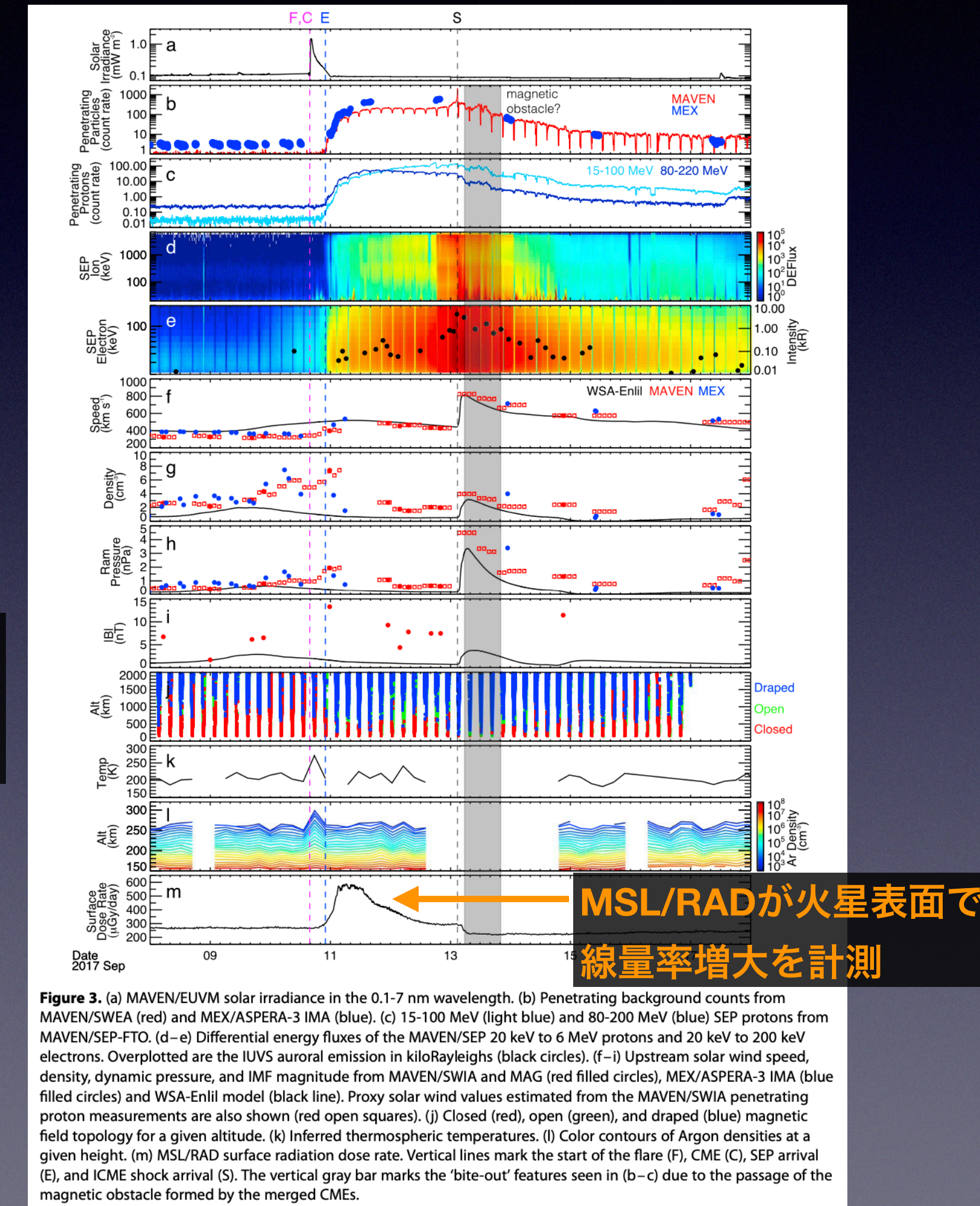
Credit: NASA/GSFC/SDO <https://svs.gsfc.nasa.gov/12706>



https://ccmc.gsfc.nasa.gov/database_SH/Leila_Mays_120817_SH_9.php



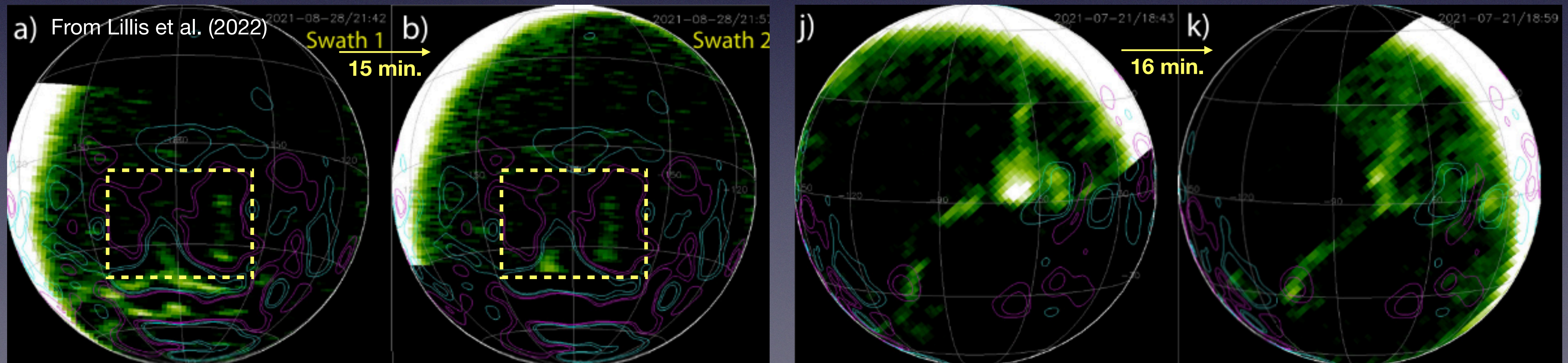
From Schneider et al. (2018)



From Lee et al. (2018)

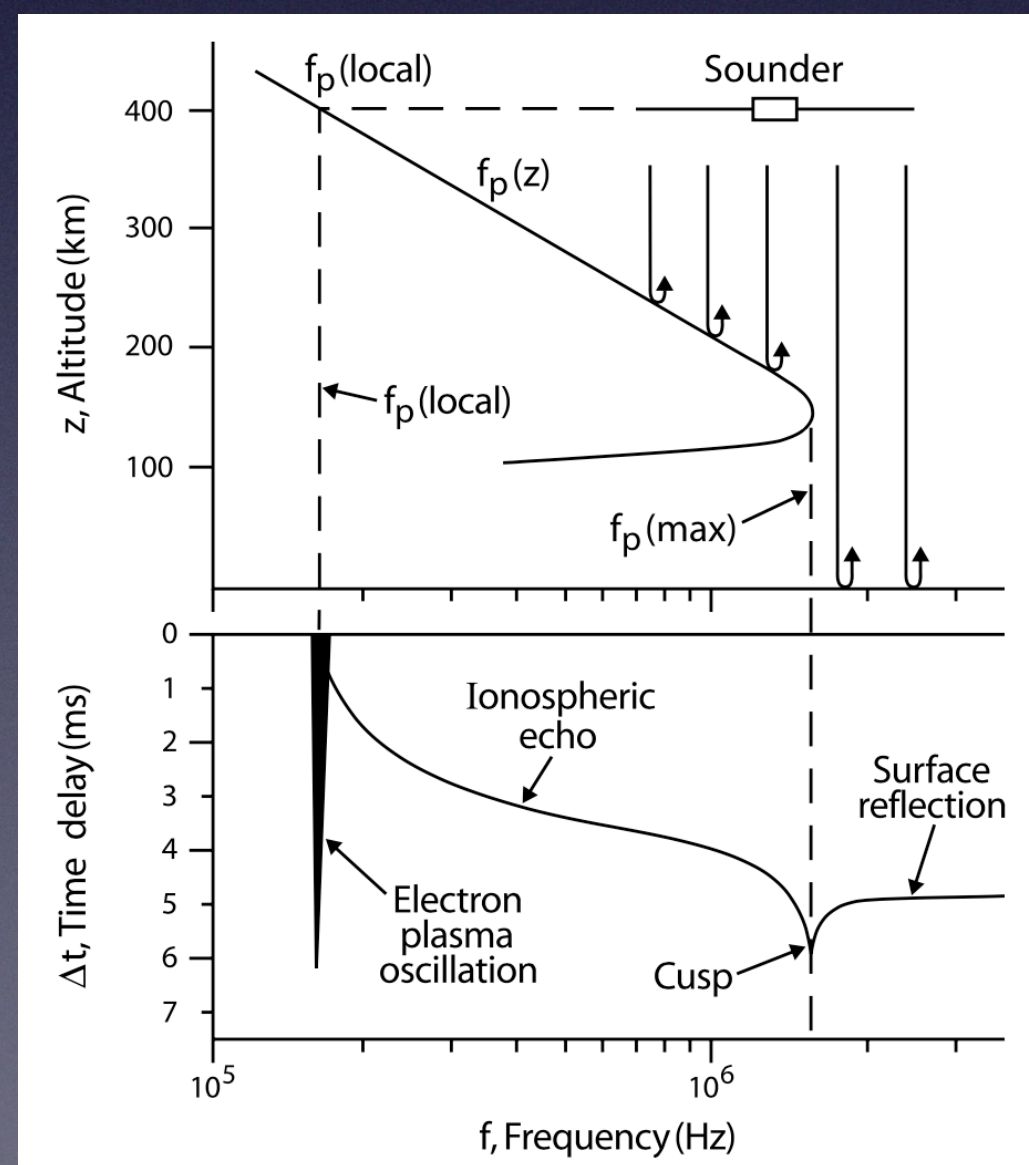
EMM “Hope”が見た 火星ディスクリートオーロラ

- 火星ディスクリートオーロラは、(1) **頻発（夜側画像の>75%）**、(2) **<15-20分で模様が時間変化**、(3) 開いた磁力線地域で発生・強磁場地域で最も明るい、(4) CO₂大気への電子降り込みによる発光、(5) 3種類の形態（地殻磁場オーロラ、非地殻磁場パッチ状オーロラ、波状オーロラ）に分類できる、(6) **火星磁気圏尾部の動態を反映**（Lillis et al., 2022）。

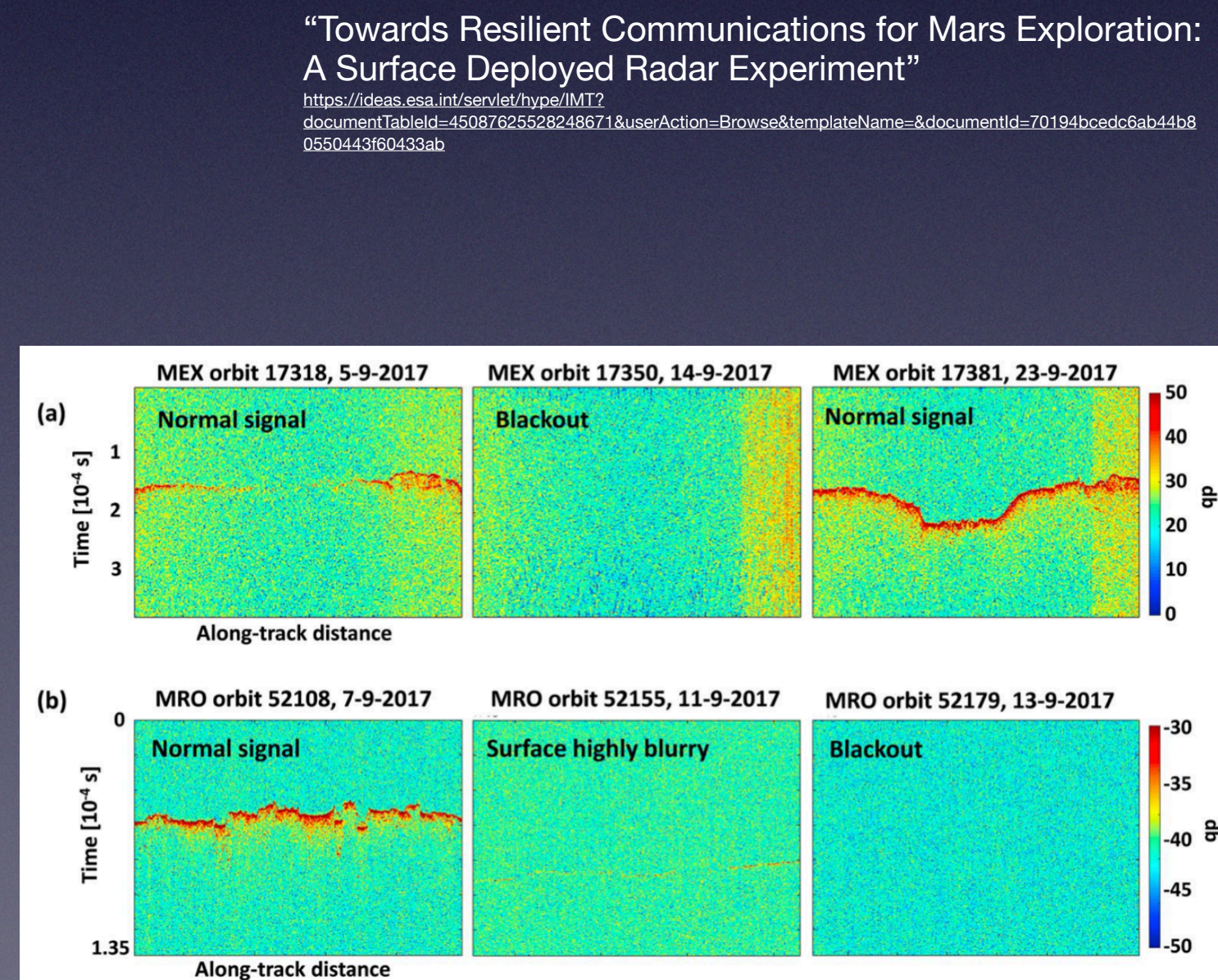


太陽高エネルギー粒子イベント時の 電波吸収

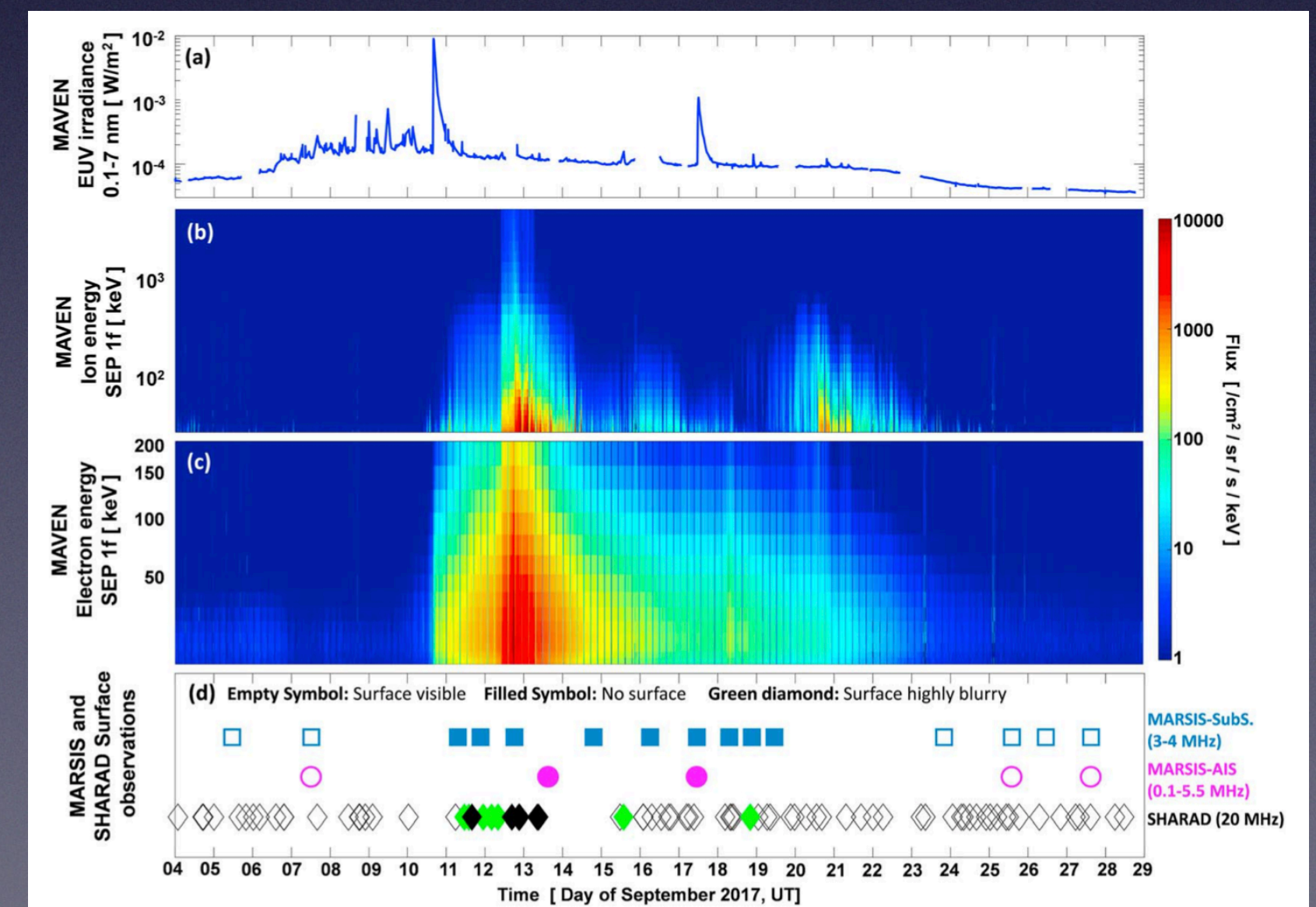
- 2017年9月イベント時に、火星軌道上で運用している、HF帯レーダーの表面エコーが消失。
- 降り込んできた太陽高エネルギー粒子が火星大気を電離し、 $e\text{-CO}_2$ 衝突に起因する電波吸収 (<100 km高度) が増大。
- 将来的に、HF帯の電波を用いた、火星表面－衛星間の／表面同士の通信に影響がある可能性がある（**火星宇宙天気**）。



From Gurnett et al. (2008)



From Sanchez-Cano et al. (2019)



火星大気への太陽高エネルギー粒子の影響： まとめ

- 火星オーロラ観測から、太陽放射線（太陽高エネルギー粒子）や太陽風起源の電子が、火星夜側大気のどこに降り込んでいるかを俯瞰できるようになった。「**火星放射線環境の可視化**」
- 火星大気に荷電粒子が降り込み、電離を促進することで、電波が強く吸収されるようになる。HF帯のレーダー観測や通信に影響がある。「**火星宇宙天気**」（の一つ）

目次

- 太陽風惑星相互作用
- 火星大気への太陽高エネルギー粒子の影響
- 月面への太陽高エネルギー粒子の影響
 - 月面帯電の増強
 - 「渦」模様の形成（太陽風の影響）
- まとめ

太陽高エネルギー粒子イベント時の 月面帯電

- 月面は濃密な大気によって守られていないため、荷電粒子の吸収・放出を介して、周辺プラズマと電荷のやり取りが生じる。
- 月面への電荷の流入・流出率（電流）に不均衡がある場合、月面に電荷が蓄積（帯電）し、周辺プラズマと異なる電位が月面に生じる。月面帯電は、正味の電流が釣り合う平衡電位まで進行する。
- 月面は電気電気伝導度が低いため、局所的な帯電が緩和しない。様々な空間スケール（全球～ダスト粒子サイズ）の帯電分布の不均一性が生じる。
- 太陽高エネルギー電子到来時には、夜側の**月面電位が通常の10倍程度に増強**する。
- 月面での無人探査・有人活動に影響を及ぼす（探査機器の帯電・放電、月レゴリスダストの浮遊・輸送）。

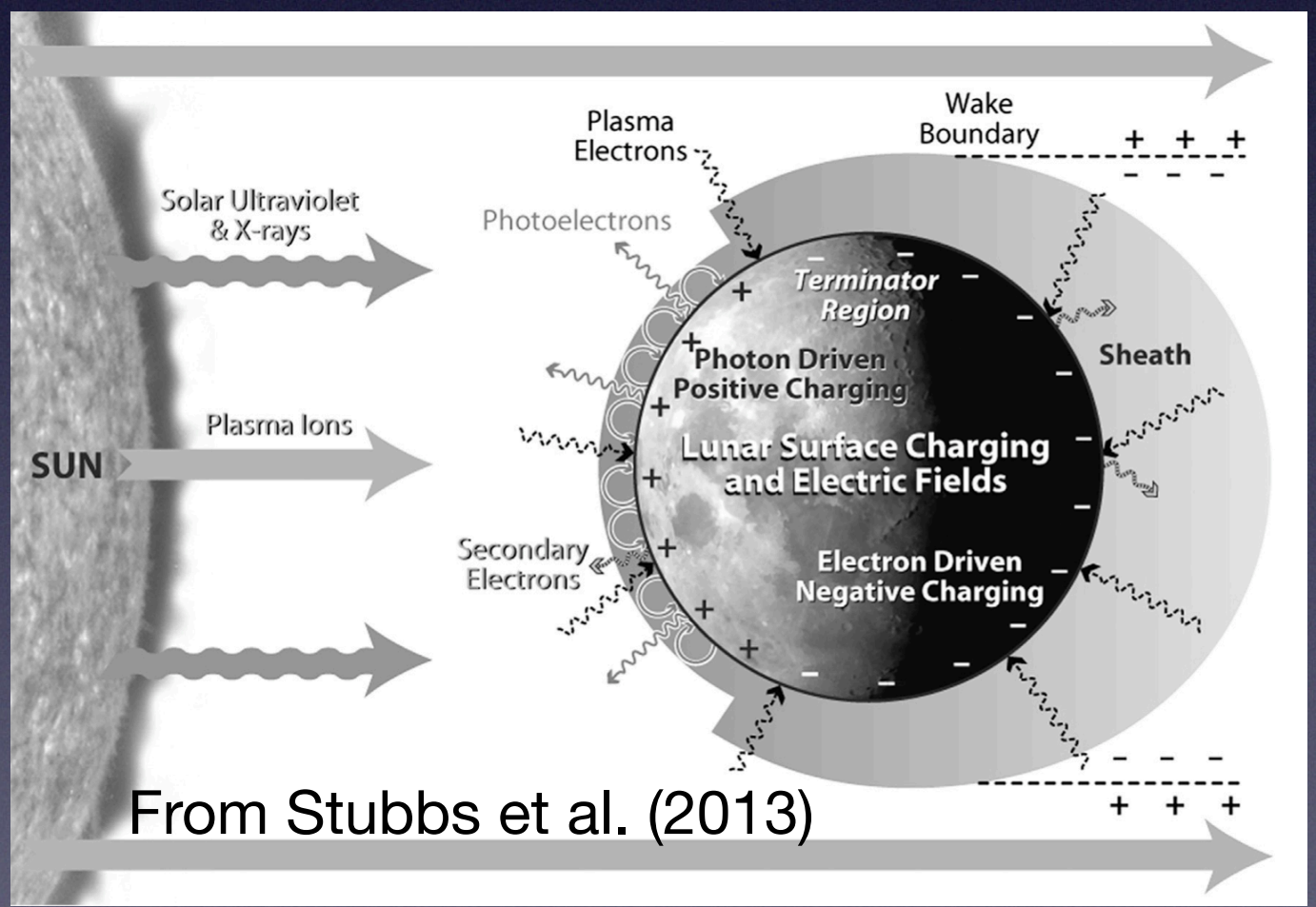
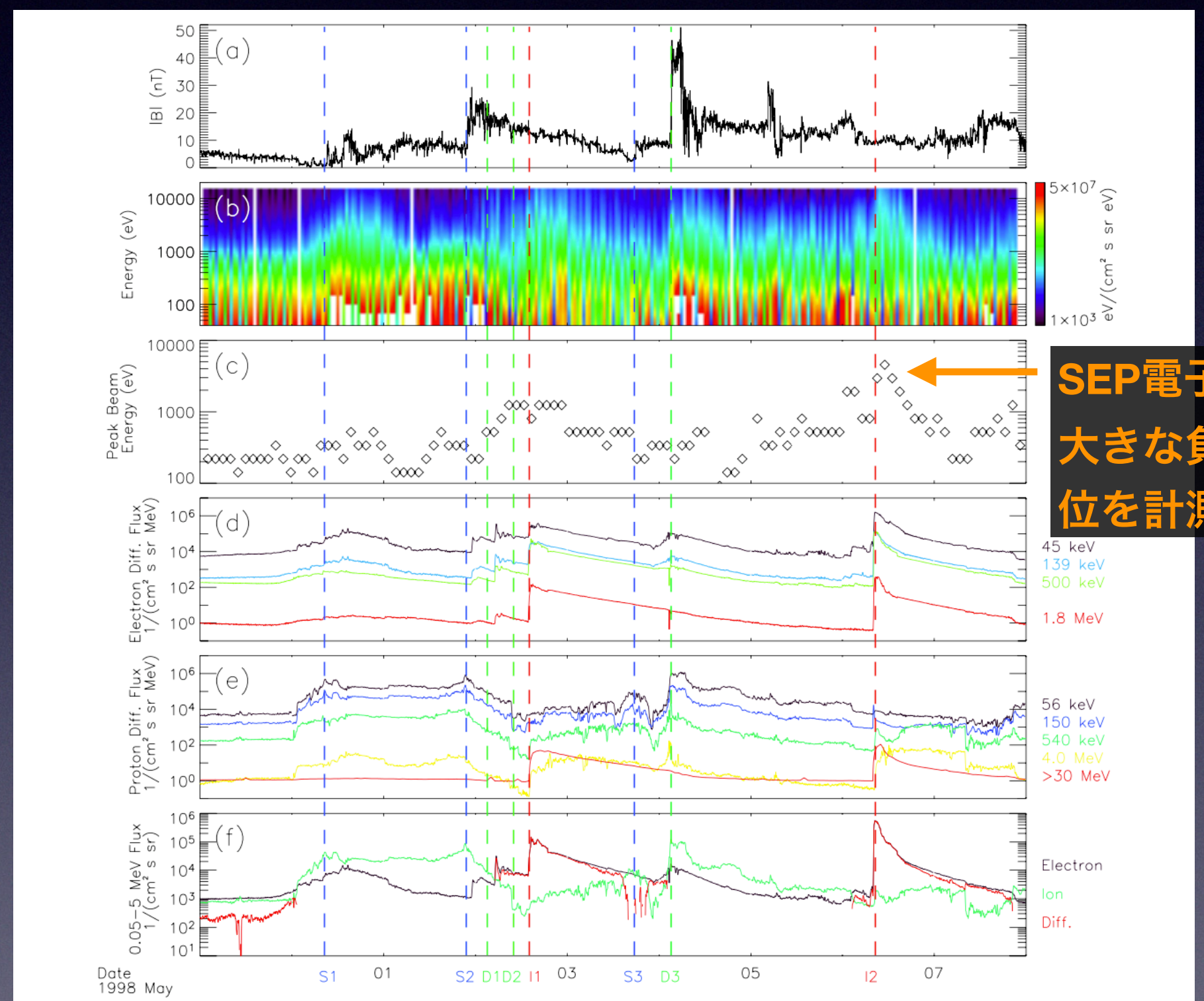


Table 1. Typical Ambient Plasma Properties and Resulting Lunar Surface Potentials

	Tail Lobe	Plasma Sheet	Solar Wind	Wake	SEP Event
Electron density	0.001–0.5 cm ⁻³	0.01–1 cm ⁻³	0.5–10 cm ⁻³	0.001–0.1 cm ⁻³	0.001–0.1 cm ⁻³ in wake
Electron temperature	<100 eV	100 eV to 2 keV	5–30 eV	50–150 eV	50 eV to 1 keV in wake
Lunar surface potential	–150 to 0 V	–1000 to 0 V	<20 V	–200 to 0 V	–1000 to –4000 V in wake

>10x

From Halekas et al. (2008)



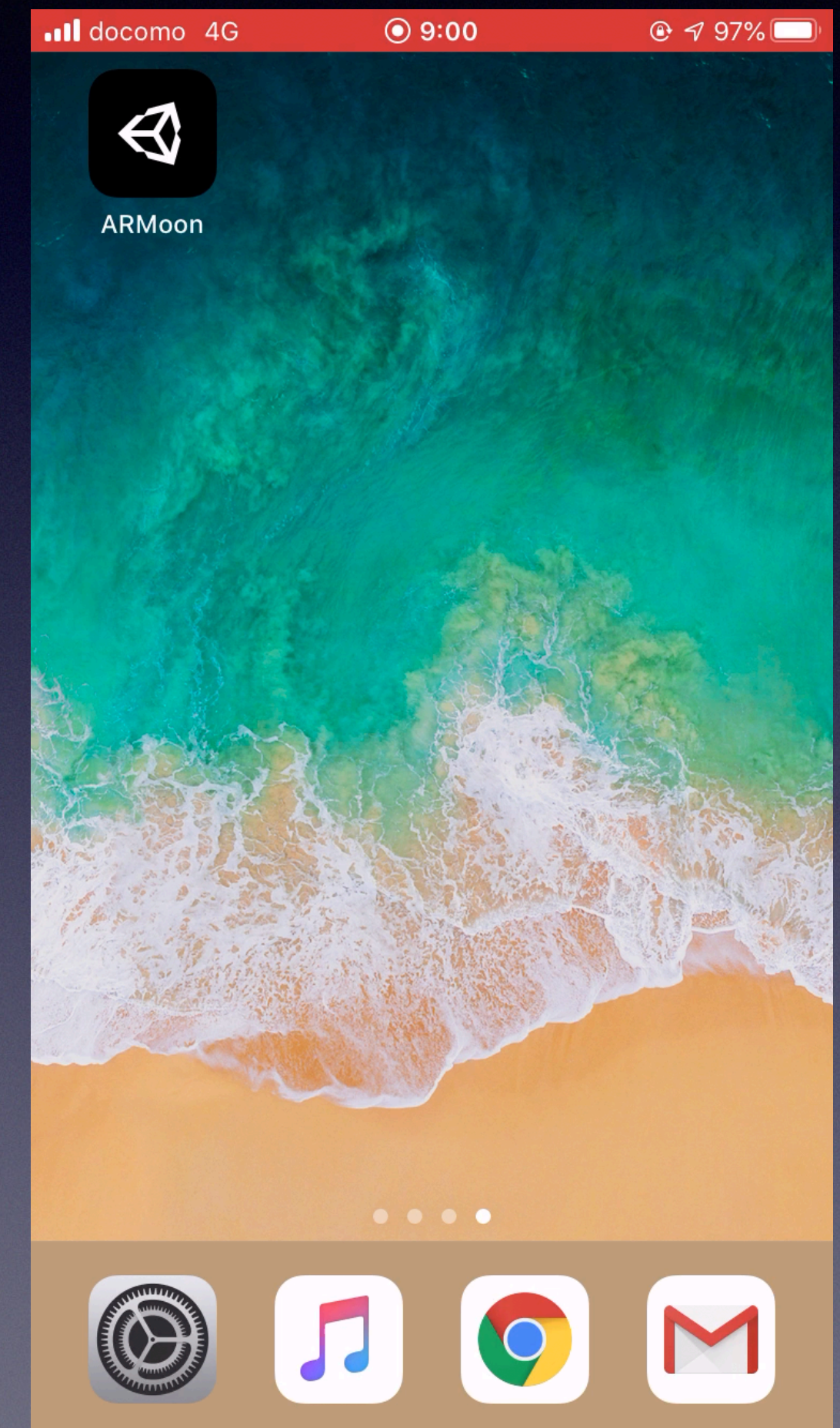
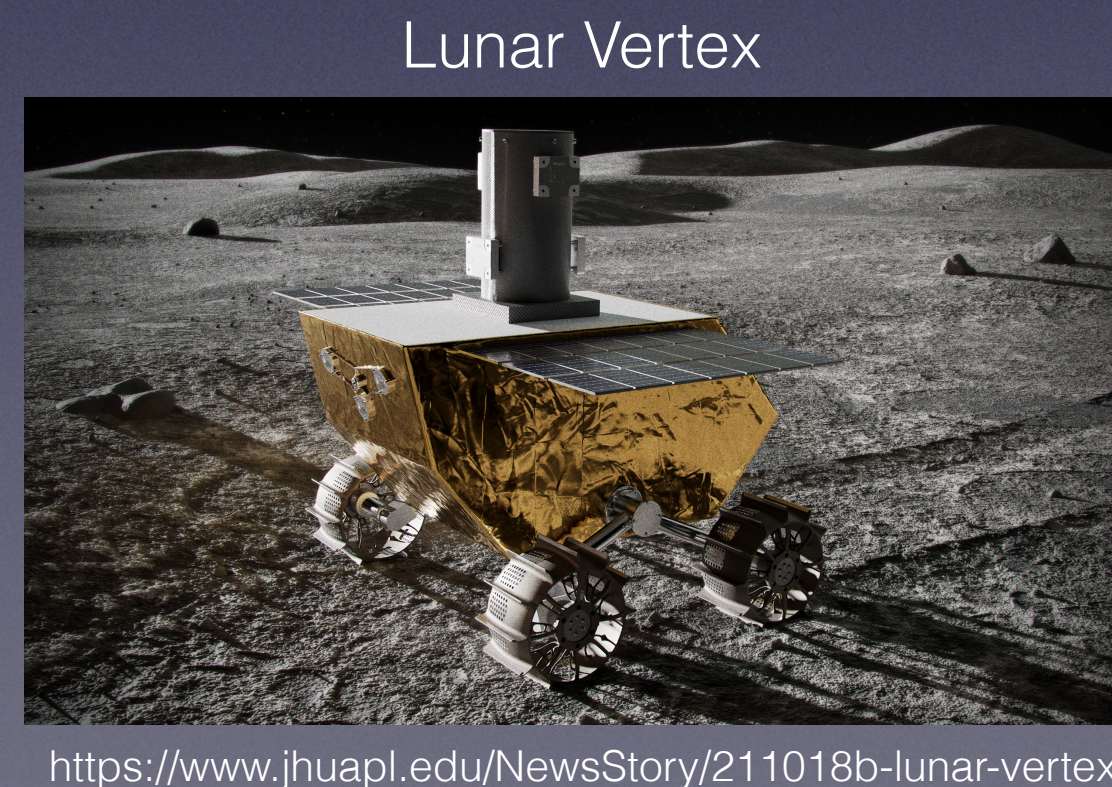
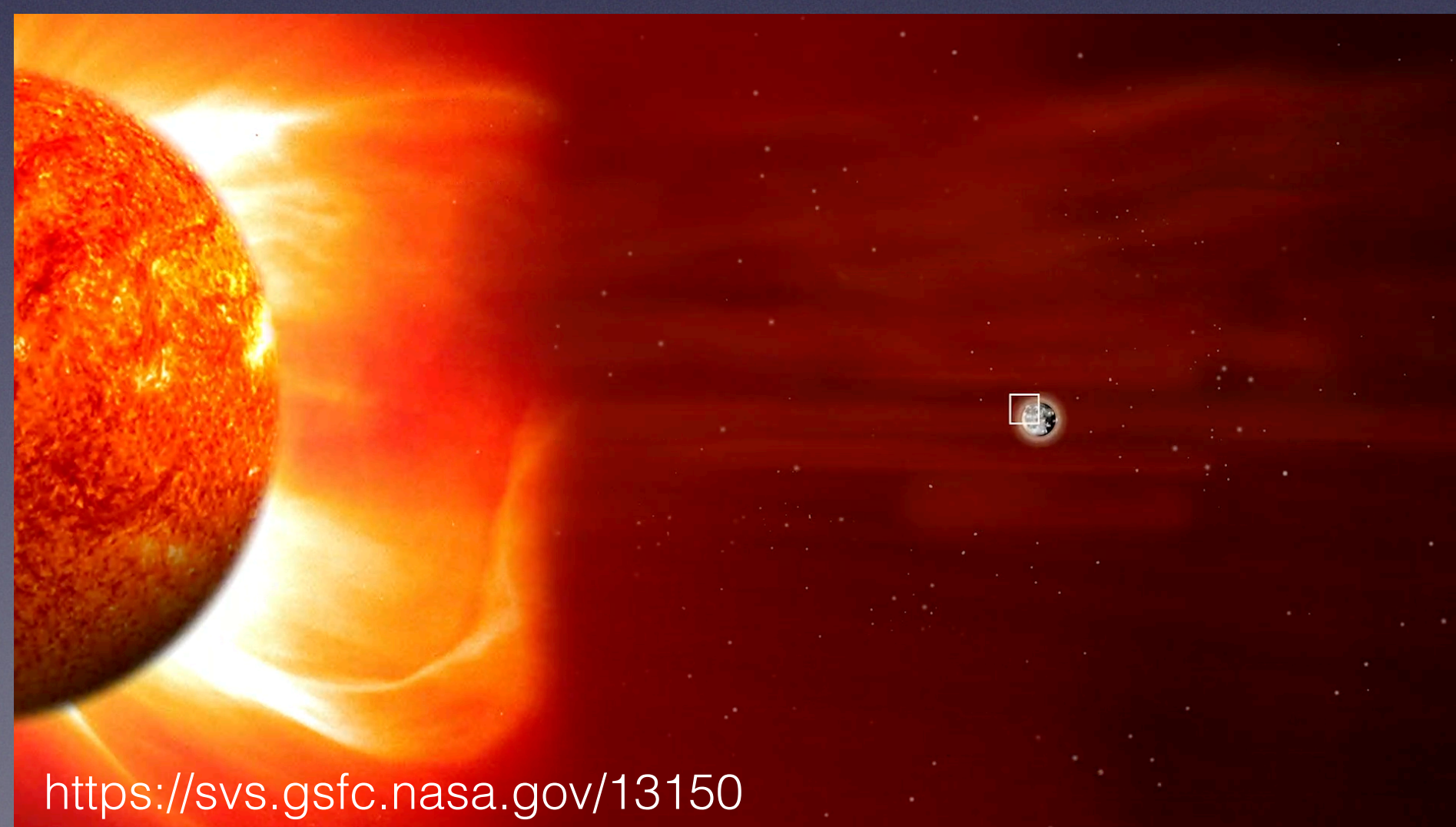
SEP電子到来時に
大きな負の月面電
位を計測

Figure 2. Data from April 29 – May 07, showing magnetic field magnitude, electron differential energy flux and peak beam energy measured by LP, as well as electron and proton differential fluxes measured upstream by SOHO and ACE, and total upstream fluxes integrated over the energy range 0.05–5 MeV. High energy (>30 MeV) proton fluxes in the fifth panel are in units of total flux (1/(cm² s sr)) rather than differential flux. Times of major shocks (S1, S2, S3), directional discontinuities (D1, D2, D3), and SEP injections (I1, I2) indicated by dashed bars.

From Halekas et al. (2007)

「渦」模様の生成（太陽風の影響）

- 月面に見える、謎の「渦」模様（“lunar swirls”）。
 - 月面地形とは（一見）関係ないが、月の残留磁化（磁気異常）分布と良く一致している（場所もある）。
- 主要な仮説：月面が月地殻磁場によって太陽風から局所的にシールドされる（「**ミニ磁気圏**」）ことで、プロトン衝突による月面物質の変性（**宇宙風化**：暗化・赤化）の進行度合いに差が生じ、磁場の分布に応じた明暗の模様ができる。「**宇宙空間プラズマ物理学と固体惑星科学の融合**」
- 課題：太陽風－月地殻磁場相互作用の重要過程が起きている現場（高度～10 km以下）は、未踏の探査困難領域。→ “Lunar Vertex” mission, ...



月面への太陽高エネルギー粒子の影響： まとめ

- 太陽高エネルギー電子到来時に、月面帯電が劇的に増強する。「**月面の電氣的環境の把握**」が必要。
- 太陽風プロトンが月「ミニ磁気圏」で軌道を逸らされ、月面の物質を不均一に変性することで、渦模様を形成。「**宇宙空間プラズマ物理学と固体惑星科学の融合**」

目次

- 太陽風惑星相互作用
- 火星大気への太陽高エネルギー粒子の影響
- 月面への太陽高エネルギー粒子の影響
- まとめ

まとめ

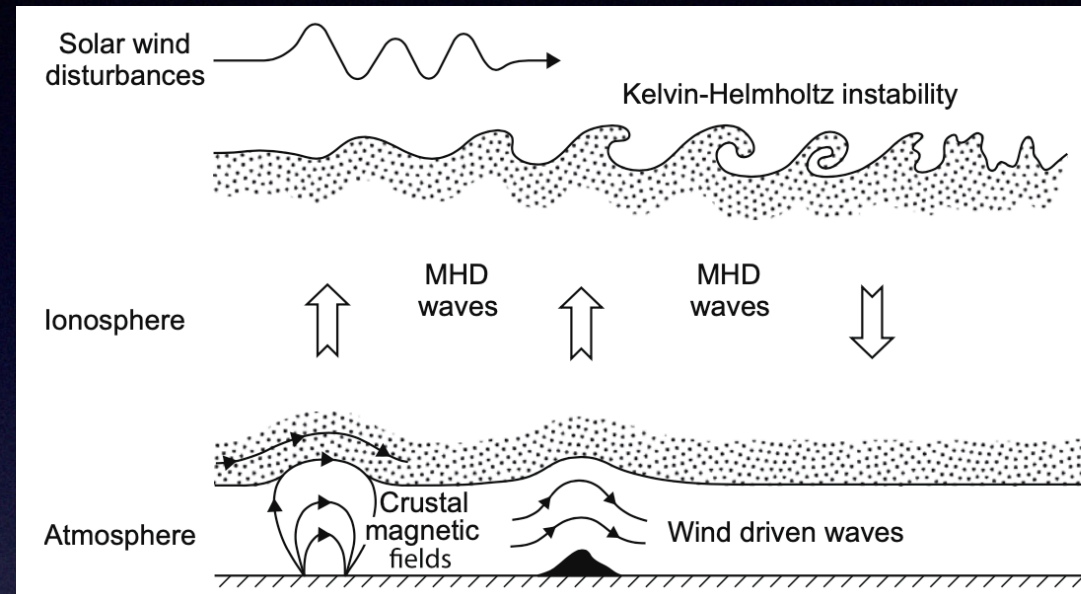
- 太陽風惑星相互作用：
 - 太陽風と惑星の相互作用は、惑星の大気の濃さや磁場の強さに応じて様々な様相を呈する。どのエネルギーの太陽放射線（太陽高エネルギー粒子）がどの程度、惑星大気や表面環境へ到達するかは、惑星周辺の電磁的環境によって決定される。「**太陽風惑星相互作用の多様性**」
- 火星大気への太陽高エネルギー粒子の影響：
 - 火星オーロラ観測から、太陽放射線（太陽高エネルギー粒子）や太陽風起源の電子が、火星夜側大気のどこに降り込んでいるかを俯瞰できるようになった。「**火星放射線環境の可視化**」
 - 火星大気に荷電粒子が降り込み、電離を促進することで、電波が強く吸収されるようになる。HF帯のレーダー観測や通信に影響がある。「**火星宇宙天気**」（の一つ）
- 月面への太陽高エネルギー粒子の影響：
 - 太陽高エネルギー電子到来時に、月面帯電が劇的に増強する。「**月面の電氣的環境の把握**」が必要。
 - 太陽風プロトンが月「ミニ磁気圏」で軌道を逸らされ、月面の物質を不均一に変性することで、渦模様を形成。「**宇宙空間プラズマ物理学と固体惑星科学の融合**」

Backup

火星電離圏不規則構造

- 火星電離圏は、様々な空間スケールの電子密度不規則構造を内包している。
- 駆動源は複数存在している：太陽風との相互作用、中性大気波動、プラズマ不安定性
- （地球の電離圏不規則構造と同じ様に）電波を用いた通信・測位に影響を与える可能性があるが、観測による実証が不足している。

From Gurnett et al. (2010)



From Harada et al. (2018)

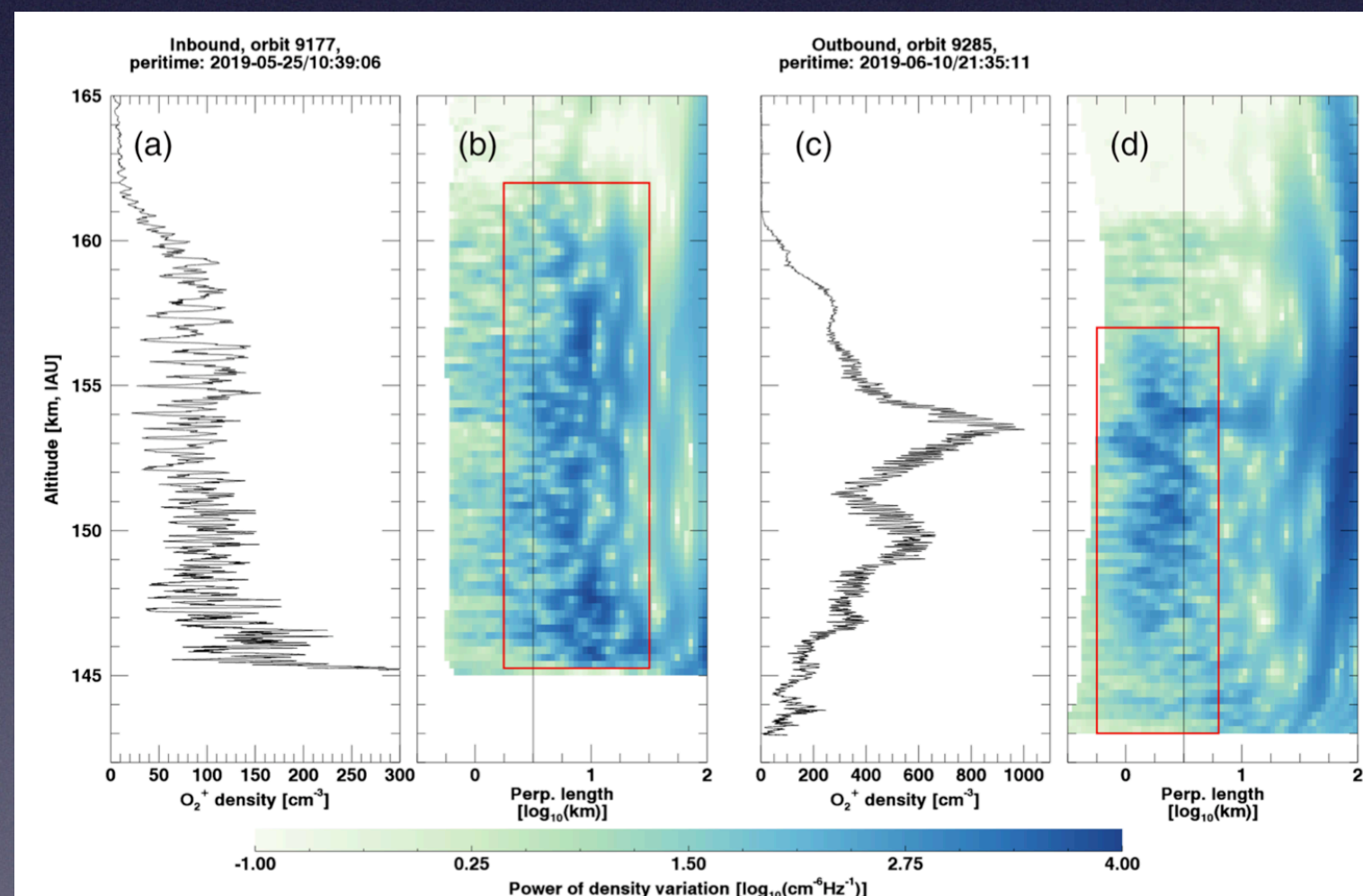
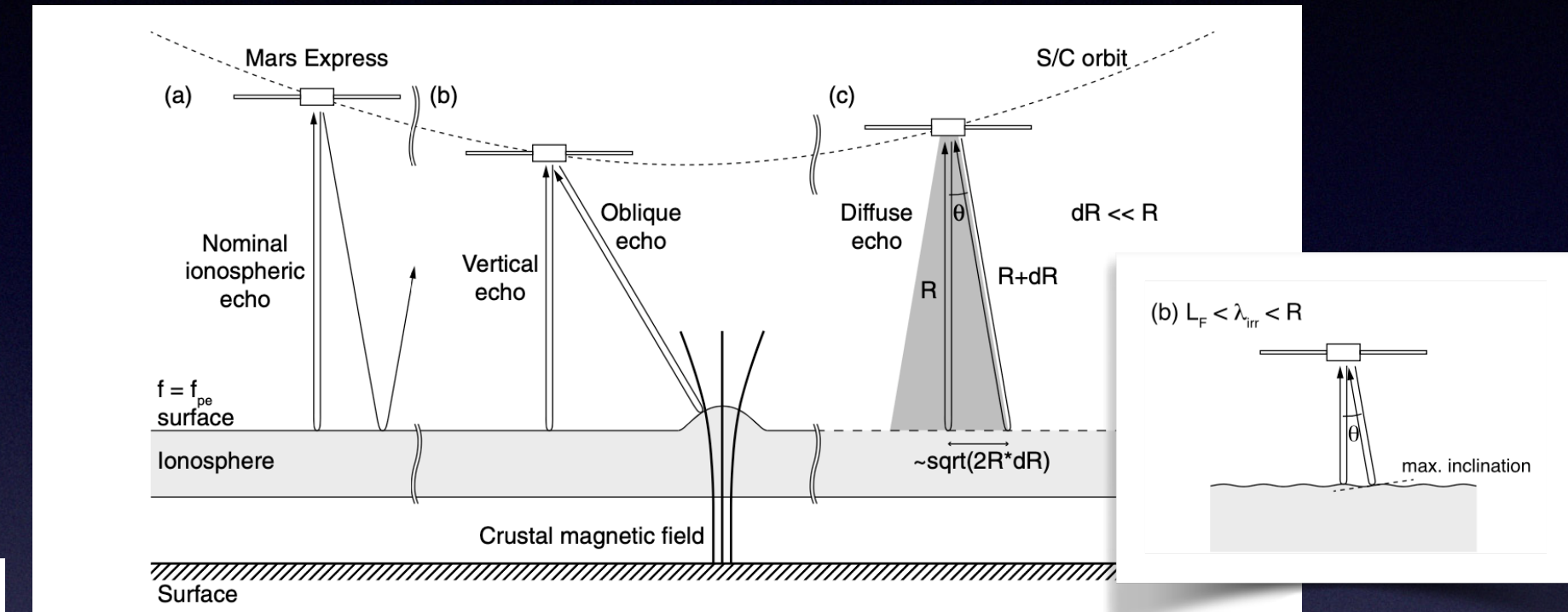
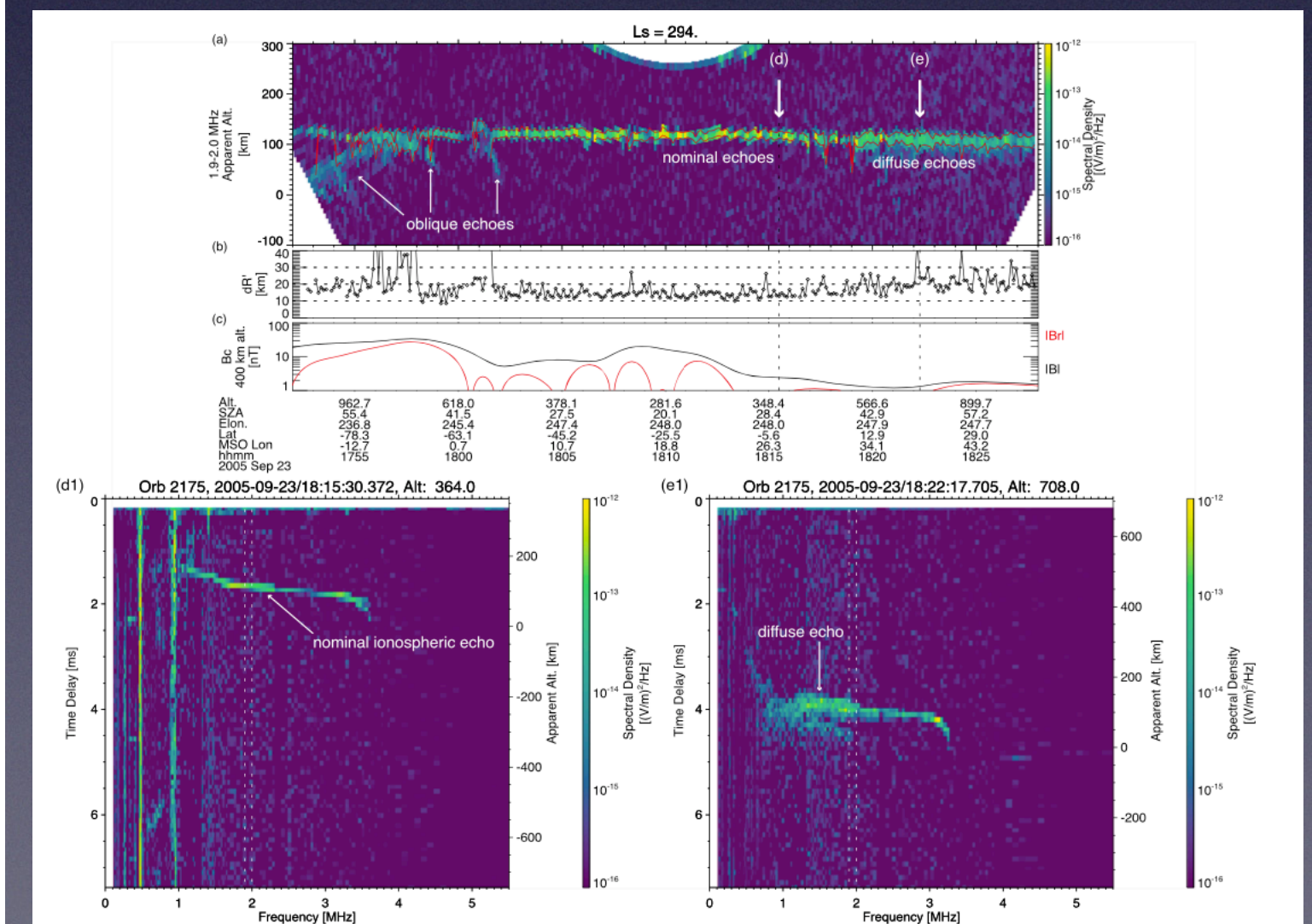


Figure 2. NGIMS observations of small-scale density irregularities from orbits 9177 and 9285. Panels (a) and (c) show O_2^+ density as a function of altitude. Panels (b) and (d) show the intensity of the density variations as a function of length scale perpendicular to the local magnetic field, calculated via a wavelet transform (Torrence & Compo, 1998). The red boxes in Panels (b) and (d) highlight the density irregularities, while the vertical black lines mark a length scale of 3 km.

From Fowler et al. (2020)



太陽高エネルギー粒子降り込みによる 大気組成変化

- 火星大気に降り込んだ太陽高エネルギー粒子は、大気組成にも影響を与えることが数値モデルから示唆されている。
- Y. Nakamura, N. Terada et al. (2022, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-2181>)
 - SEPの影響により、HOx生成、オゾン減少。
- (生命関連分子も ???)

宇宙風化・OH生成

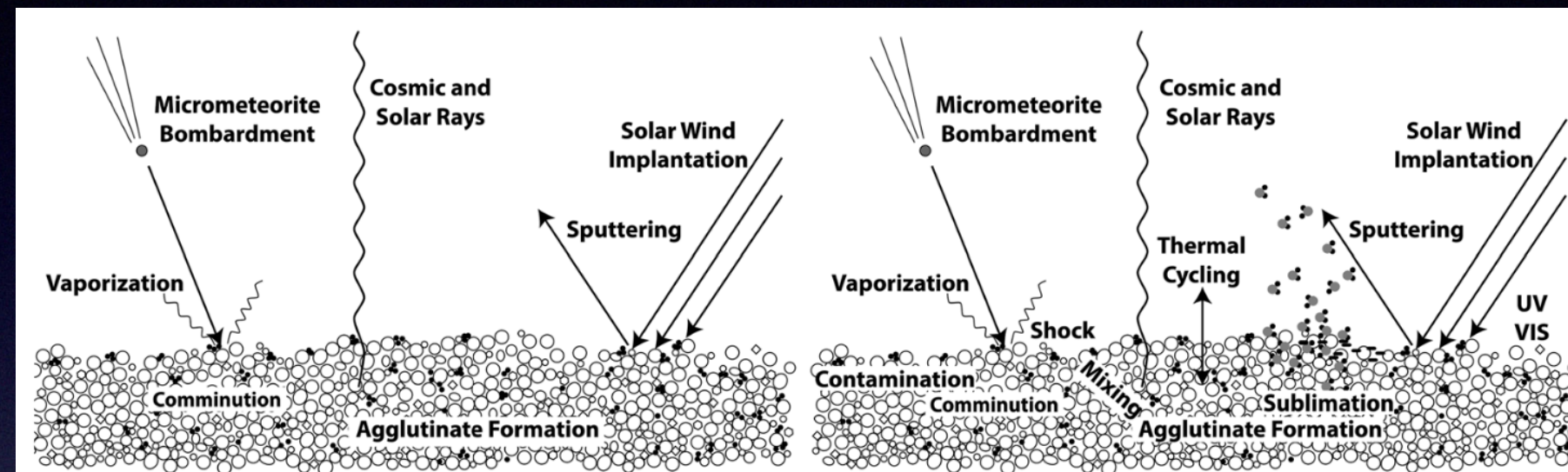


Figure 1. The complex array of processes involved in space weathering of airless bodies. Typical soils are particulate but heterogeneous in composition. (left) Dominant processes affecting the surface of the Moon at 1 AU [after Noble, 2004]. (right) The broad range of surfaces processes now believed to be active across the solar system but with different degrees of prominence for specific environments.

From Pieters and Noble (2016)

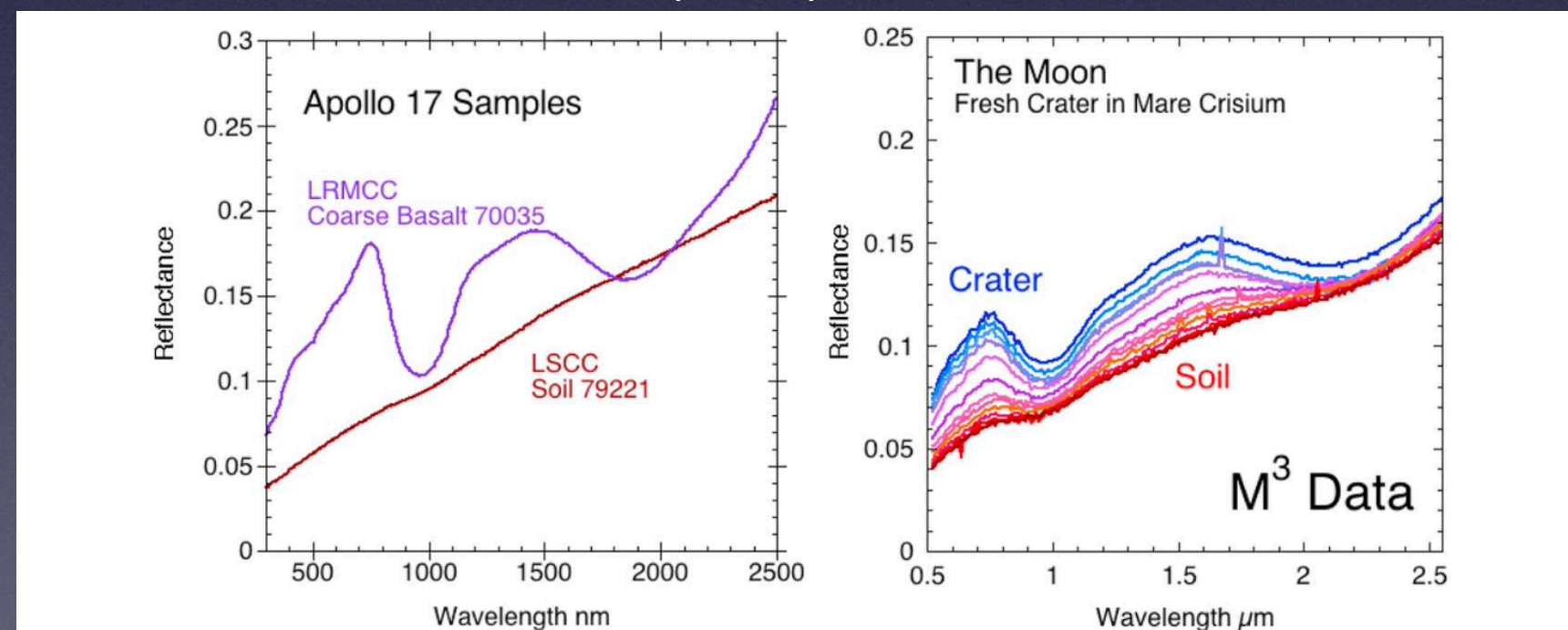
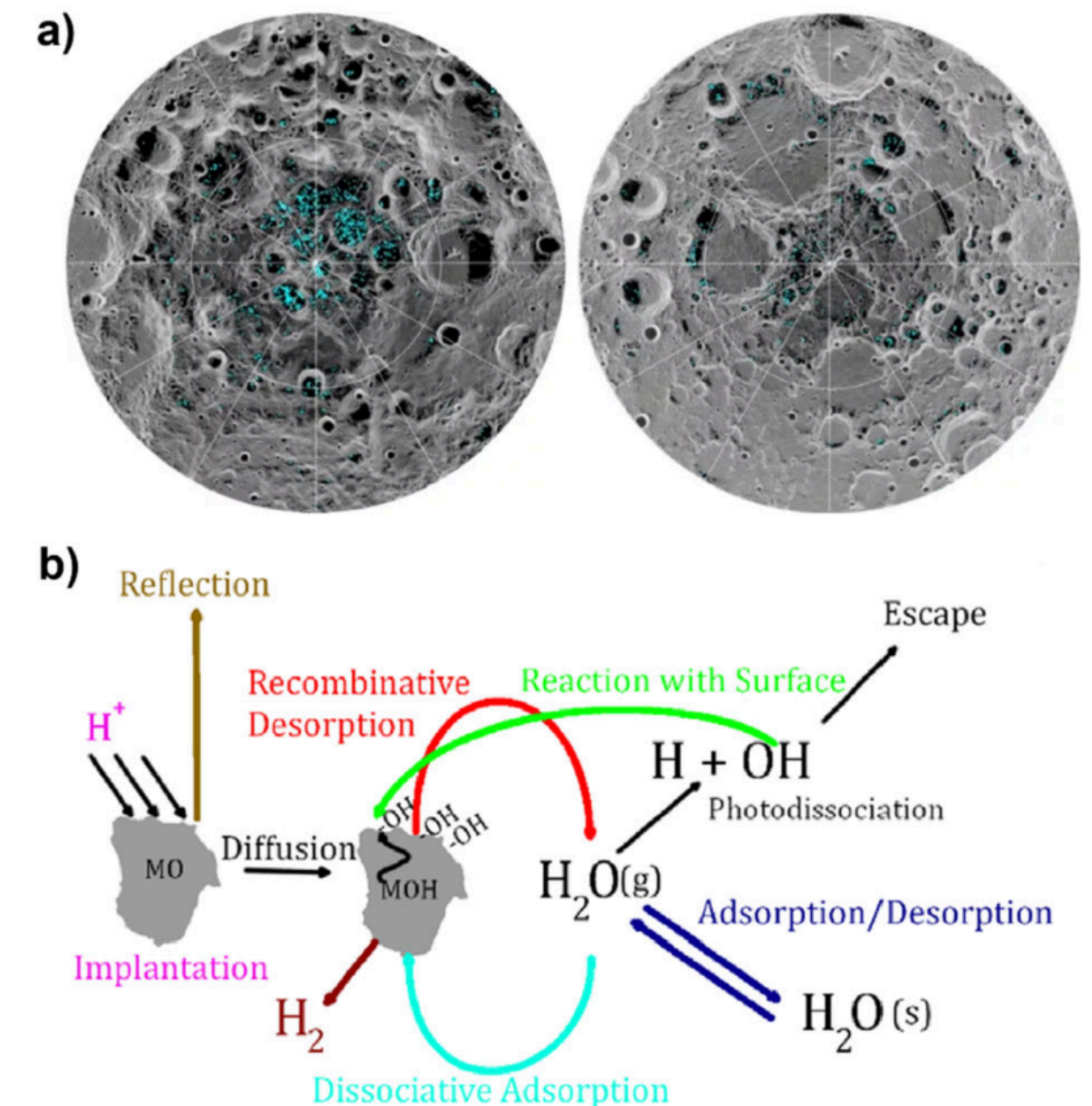


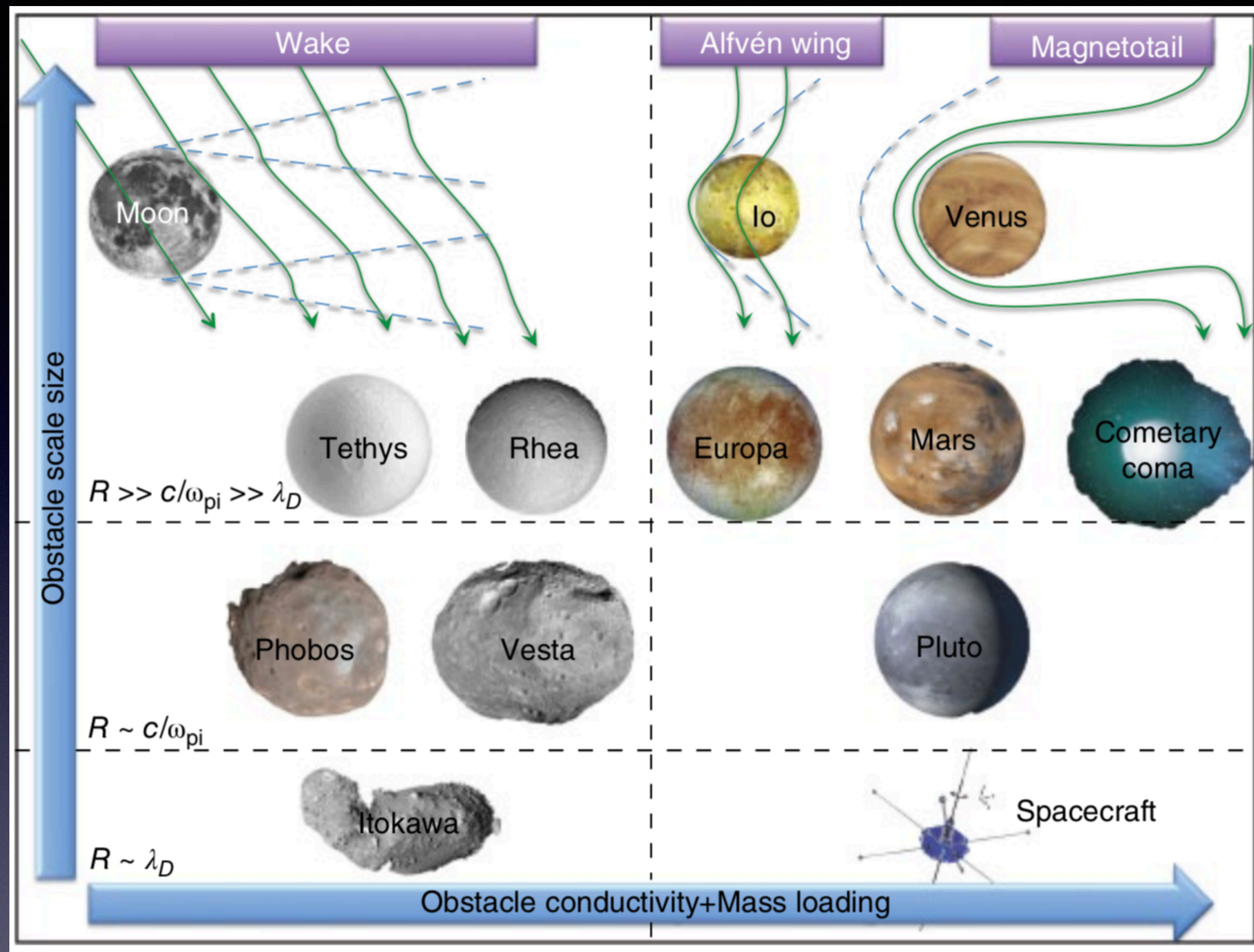
Figure 2. Spectra of lunar materials illustrating the optical differences between fresh rocks and well-developed lunar soils. (left) Laboratory spectra of basaltic lunar rock and soil samples from Apollo 17 (RELAB data: LR-CMP-158 and LR-CMP-039). (right) Remote lunar spectra acquired from orbit with Moon Mineralogy Mapper (M^3) as a traverse from a mare basalt small fresh crater into surrounding well-developed soil (M^3 file M3T20090701T094734). For these basalt examples, diagnostic absorption bands are stronger for fresh materials but note the prominent differences in brightness at visible wavelengths (500–700 nm) but little if any brightness difference near 2 μm .

Fig. 7 a) Distribution of surface ice (cyan) within permanently shaded regions at the Moon's south (left) and north pole (right) as detected by NASA's Moon Mineralogy Mapper instrument (Image credit: NASA).

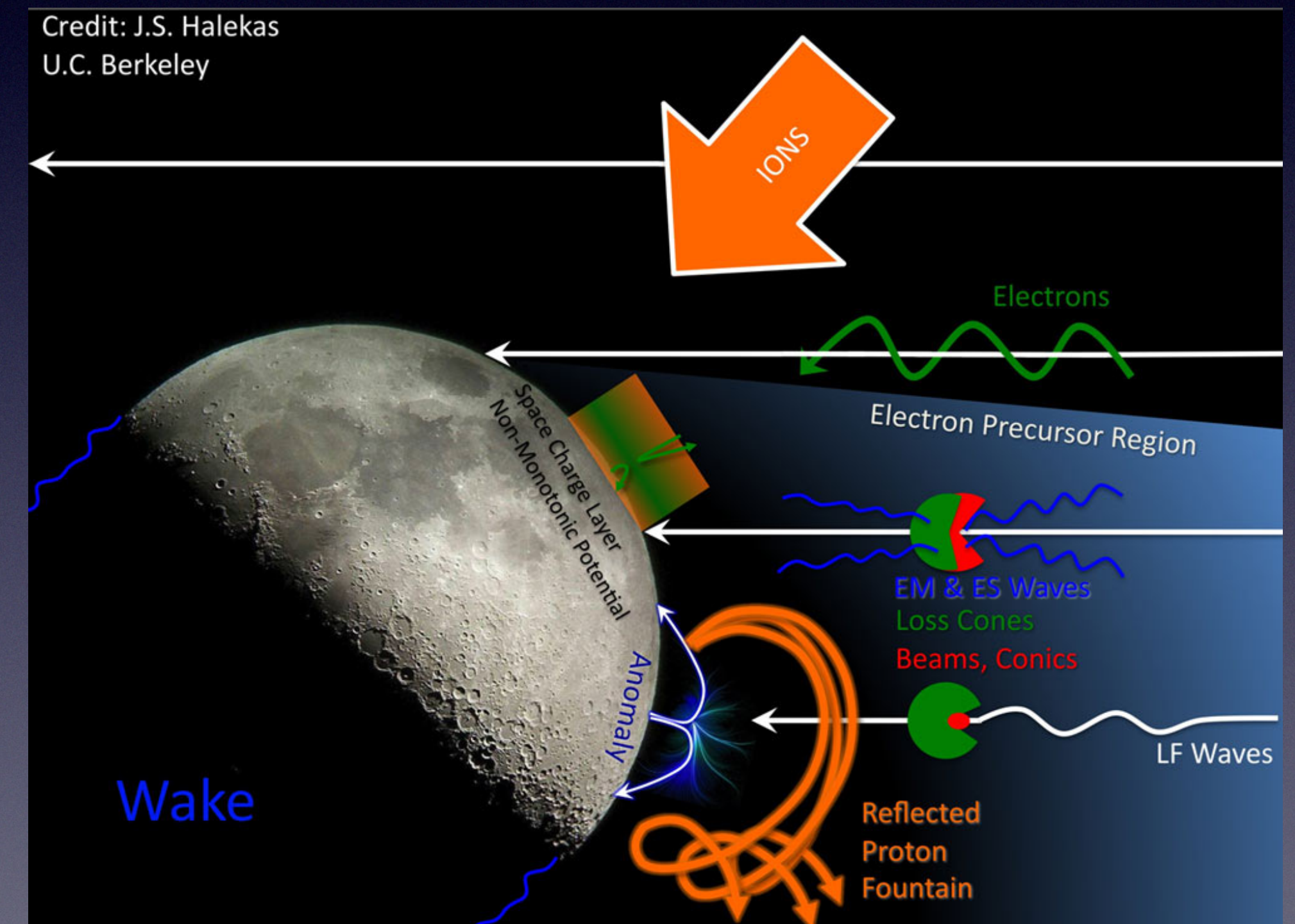
b) Illustration of the kinetic scheme that describes the H^+ induced H_2O cycle that is related to recombinative desorption, dissociative adsorption, adsorption, photodissociation, kinetic escape OH/H radical reaction, photo-stimulated desorption and desorption (after Jones et al. 2020)



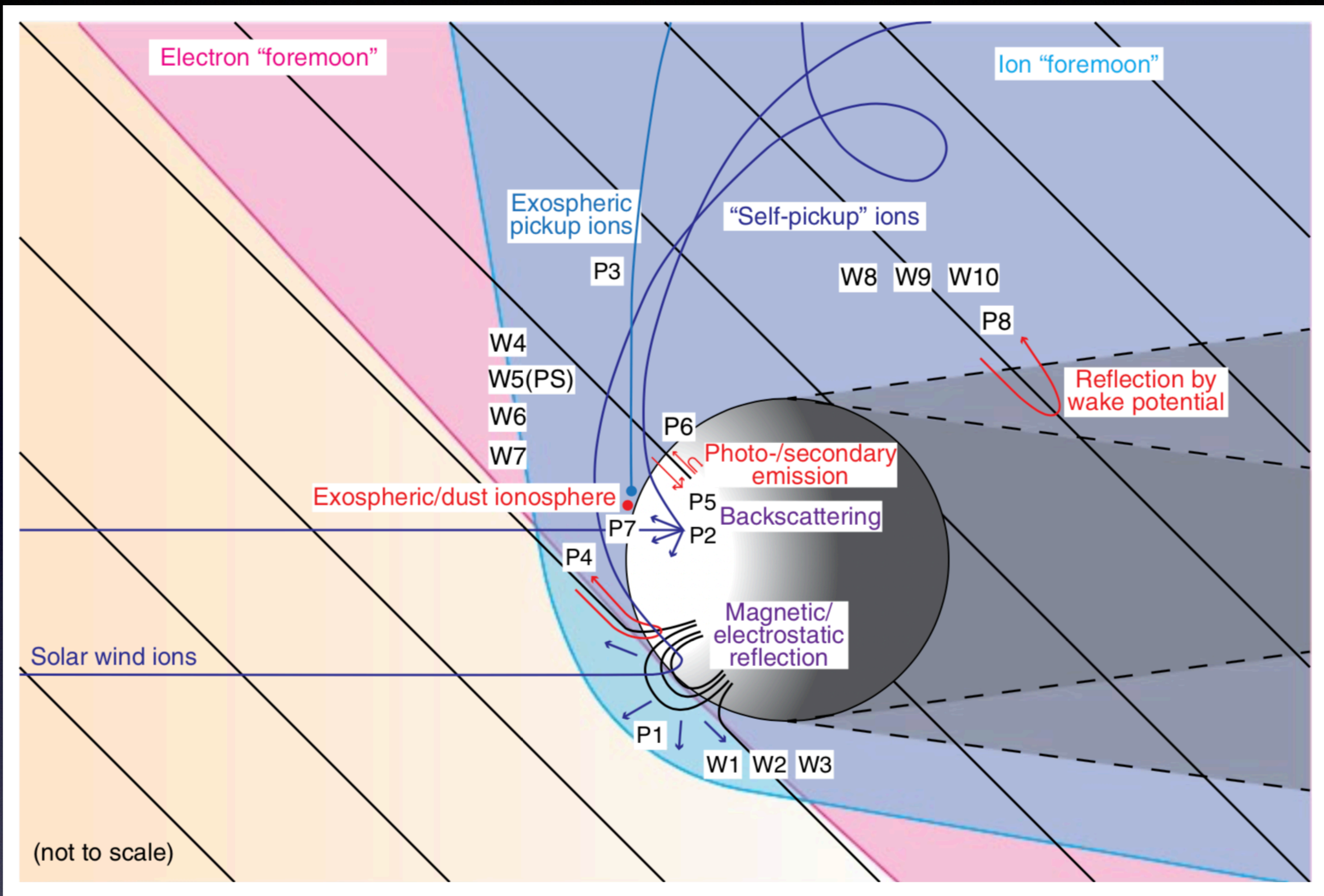
From Lammer et al. (2022)



From Halekas et al. (2015)



https://artemis.igpp.ucla.edu/nuggets/nuggets_2012/Halekas/fig1.jpg



From Harada & Halekas (2016)

Table 18.3 Catalog of lunar upstream waves.

Frequency (S/C Frame)	Electrostatic vs. Electromagnetic	Polarization (S/C Frame)	Plasma Regime	Proposed Modes	Proposed Free- Energy Sources	Reference
<i>Upstream from the Moon</i>						
$w_1 \sim 0.01\text{--}0.1\text{ Hz} < \sim f_{\text{CH}}$ narrow	Electromagnetic	Mixed	Solar wind	Kinetic fast magnetosonic	Reflected/scattered ions	Nakagawa et al. [2012]; Halekas et al. [2013]
$w_2 \sim 0.1\text{--}10\text{ Hz} < f_{\text{ce}}$ broad	Electromagnetic	Mixed	Plasma sheet	Slow, ion cyclotron	Ions of lunar origin, shadowed ions	Halekas et al. [2012b]; Chi et al. [2013]
$w_3 \sim 1\text{ Hz} < f_{\text{ce}}$ narrow	Electromagnetic	Mostly LH	Solar wind	Whistler	Reflected/scattered ions, reflected electrons	Halekas et al. [2008, 2012b]; Nakagawa et al. [2011]; Tsugawa et al. [2012]
$w_4 \sim 100\text{ Hz} \sim 0.5f_{\text{ce}}$ narrow	Electromagnetic	RH	Solar wind, plasma sheet	Whistler	Reflected/scattered ions, phase-standing whistler wake	Lin et al. [1998]; Halekas et al. [2006, 2008, 2013]; Tsugawa et al. [2011, 2012, 2014]
$w_5 \sim 100\text{--}1000\text{ Hz} > f_{\text{ce}}$ harmonics	Electrostatic	–	Plasma sheet	Electron cyclotron harmonic	Electron loss cones	Halekas et al. [2012b]; Harada et al. [2014b]
$w_6 \sim 0.01\text{--}10\text{ kHz} < f_{\text{pe}}$ broad	Electrostatic	–	Solar wind, plasma sheet	Electron beam, solitary	Upward electron beams	Poppe et al. [2012b]
$w_7 \sim 1\text{--}10\text{ kHz} \sim f_{\text{pe}}$ narrow	Electrostatic	–	Solar wind, plasma sheet, tail lobe	Langmuir	Electron loss cones	Hashimoto et al. [2010]; Halekas et al. [2012b]; Harada et al. [2013b]
<i>Upstream from the wake</i>						
$w_8 \sim 1\text{ Hz} < f_{\text{ce}}$ narrow	Electromagnetic	LH	Solar wind	Whistler	Oblique electron beams	Farrell et al. [1996]; Nakagawa et al. [2003]
$w_9 \sim 1\text{--}10\text{ kHz} < f_{\text{pe}}$ broad	Electrostatic	–	Solar wind	Solitary, ion acoustic	Electron beams, shadowed ions and electrons	Bale et al. [1997]; Hashimoto et al. [2010]
$w_{10} \sim 10\text{ kHz} \sim f_{\text{pe}}$ narrow	Electrostatic	–	Solar wind	Langmuir	Electron beams	Bale et al. [1997]

Note: The terms "narrow," "broad," and "harmonics" in the frequency column denote spectral characteristics of narrowband, broadband, and narrow harmonic bands, respectively. f_{CH} is the proton-cyclotron frequency, f_{ce} the electron-cyclotron frequency, and f_{pe} the electron plasma frequency. "RH" and "LH" in the polarization column indicate that the observed waves have right- and left-handed polarization, respectively.

