

月のプラズマ・電磁気環境

衛星系研究会2020

2020年2月20-21日、東北大学

西野真木

JAXA宇宙科学研究所

内容

1. 月の電磁環境とは

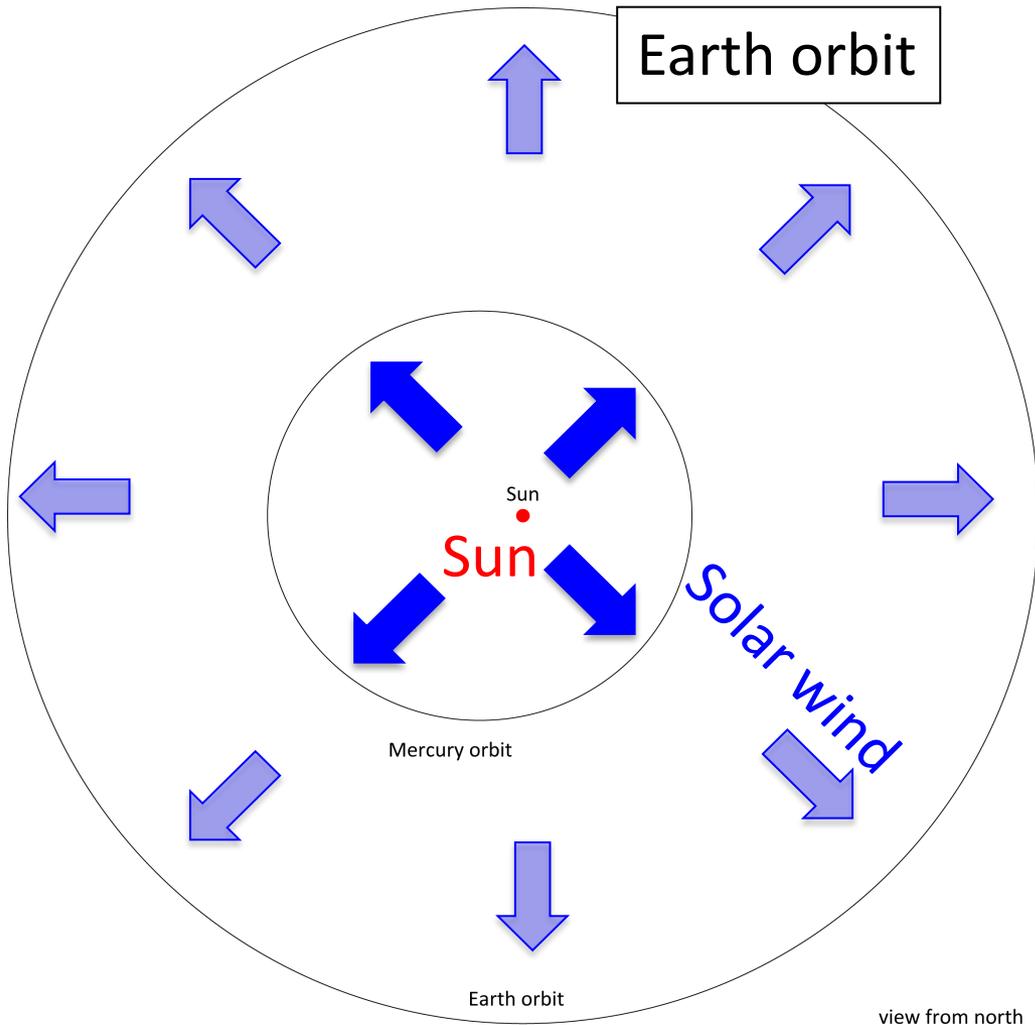
- プラズマ(太陽風、地球磁気圏)
- 磁場
- 希薄大気(外圏)、重イオン ← 横田さんの講演
- ダスト・隕石
- 高エネルギー粒子

2. 月の表面への水素供給 ← 今回は時間切れ

- 水分子？

3. 地形と電磁環境の関係

太陽風と月



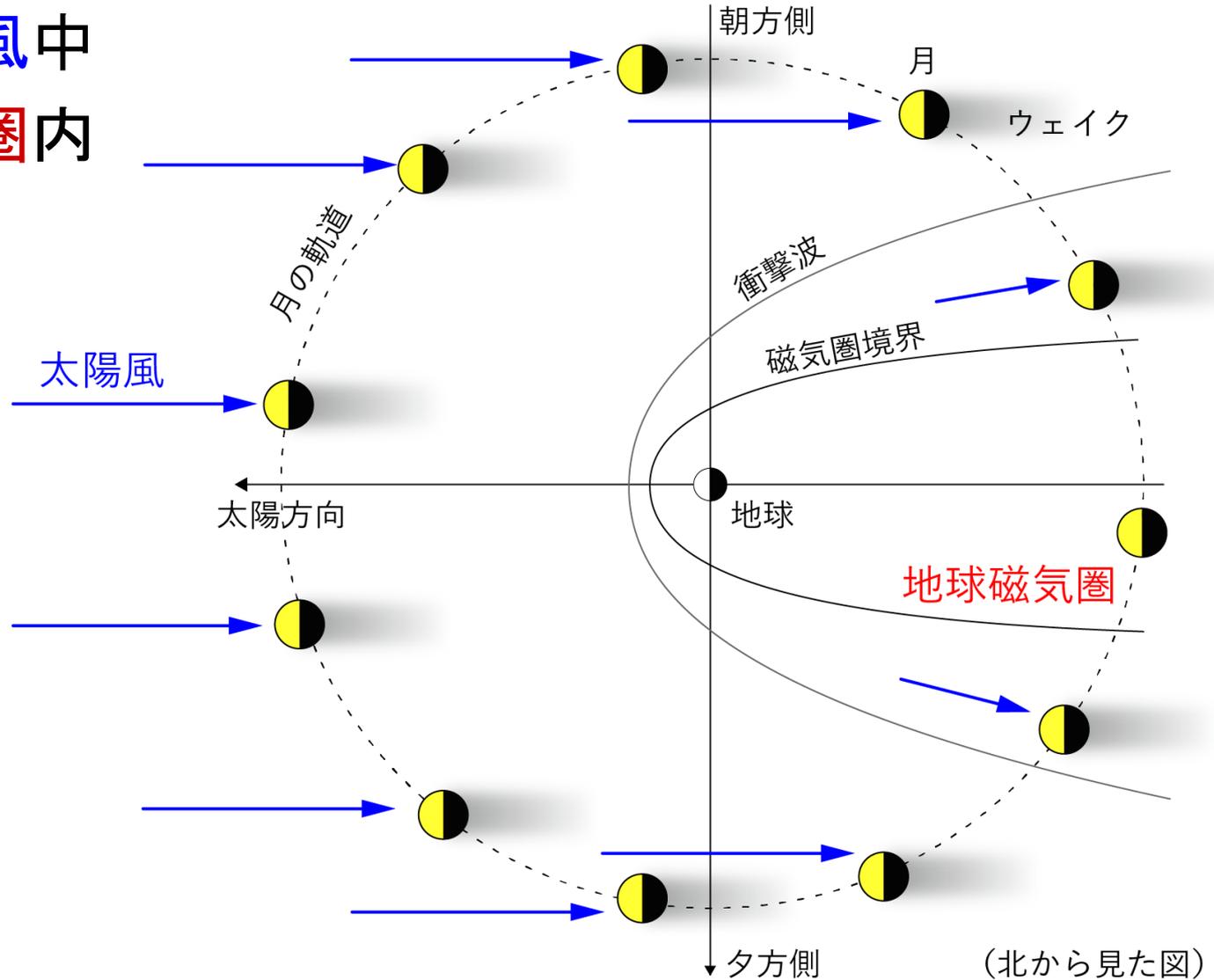
太陽風：
太陽から吹き出るプラズマ
の流れ。磁場を伴う。

主成分：
(+) 陽子 95%, He^{++} , 他
(-) 電子

超音速 ($\sim 400 \text{ km/s}$)
無衝突プラズマ

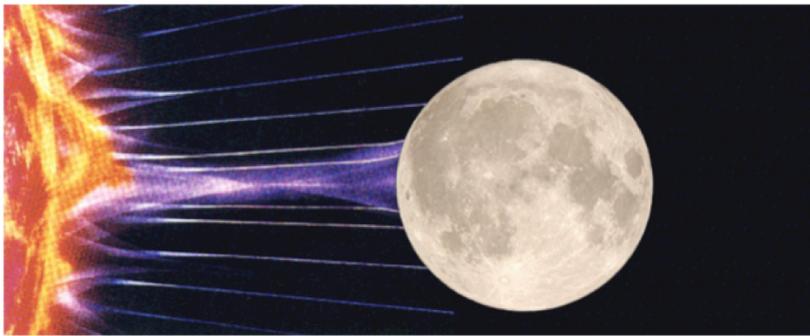
月のプラズマ環境(太陽風、磁気圏)

- 8割は太陽風中
- 2割は磁気圏内



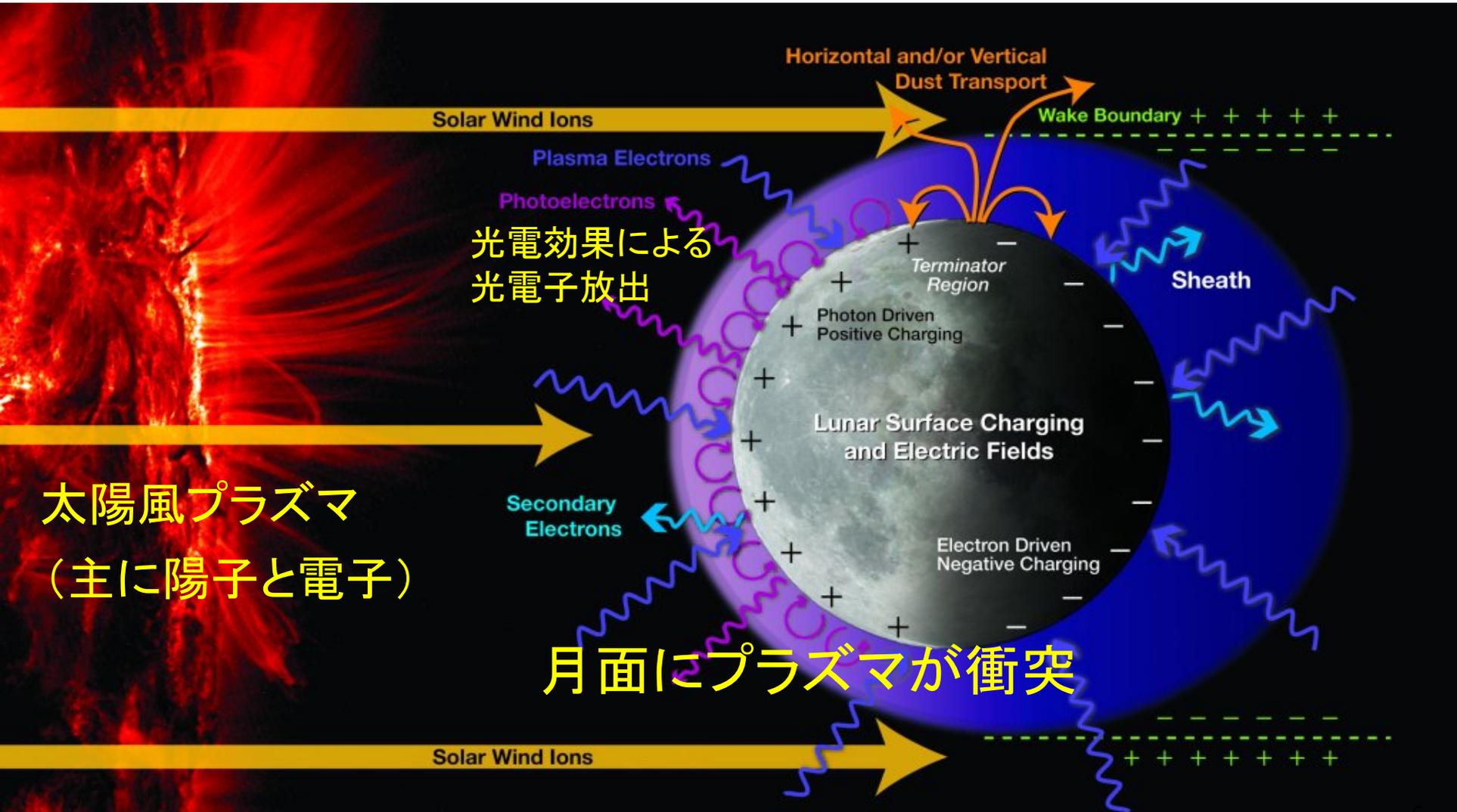
太陽風と惑星・衛星(月)・小天体の相互作用

惑星/衛星	磁気圏	相互作用	物理スケール
木星	有(large and strong)	Bow shock, Magnetotail, ...	MHD
土星	有(large and strong)	Bow shock, Magnetotail, ...	MHD
地球	有	Bow shock, Magnetotail, ...	MHD
Mars, Venus	固有磁場なし	SW-ionosphere interaction	
水星	有(small)	<ul style="list-style-type: none"> • No ionosphere? • Plasma-surface interaction 	MHD, Ionジャイロ
月	固有磁場なし 部分的に磁化	(1) 表面 & 磁気異常 (2) ウェイク (3) 外圏	Ionジャイロ程度
彗星	固有磁場なし	Magnetic cavityなど	Ionジャイロ以下
M型小惑星	有?	?	Ionジャイロ?



太陽風・太陽光と月面

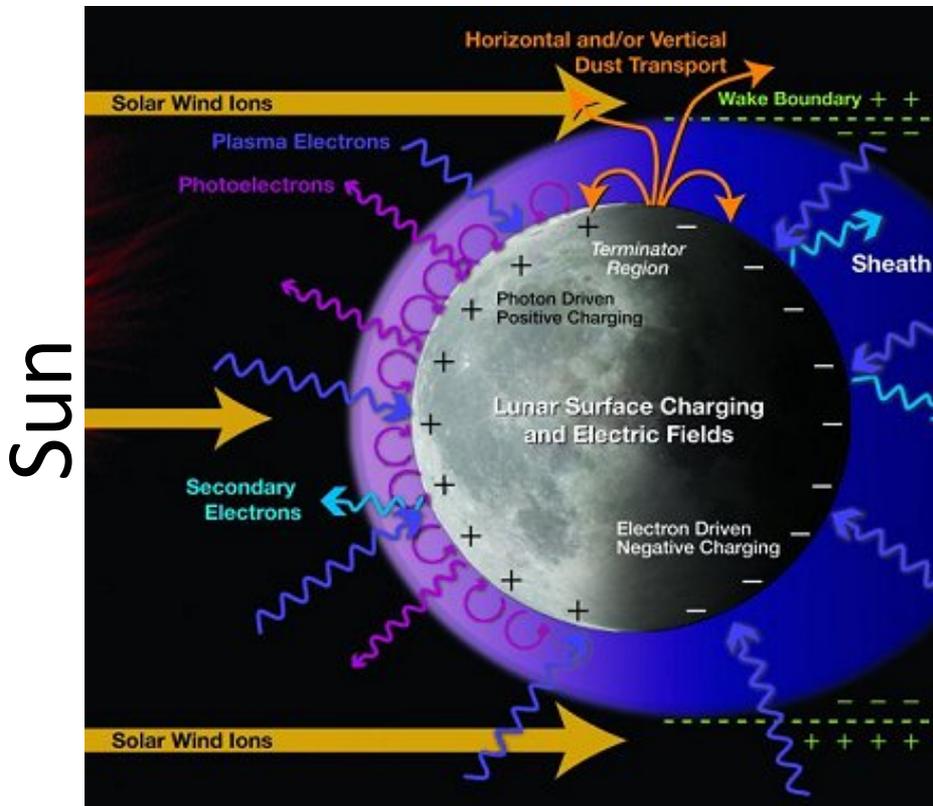
日照・日陰による違い。



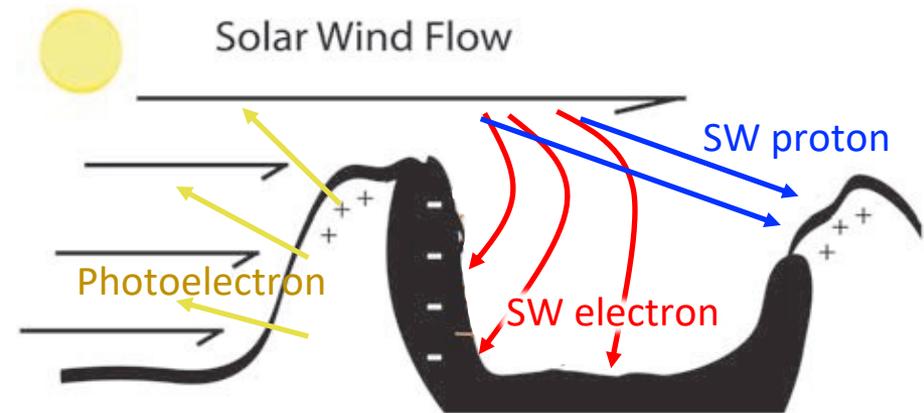
問題意識：月表面と宇宙プラズマの相互作用

天体表面と宇宙プラズマ・光電子の電気力学相互作用 ⇒ 帯電

全球スケール



局所的なスケールでも？



[modified after Farrell+2007]

[Credit: Halekas & Delory of U.C. Berkeley, and Farrell & Stubbs of the Goddard Space Flight Center]

月の場合

- 月周辺での太陽風の平均的パラメータ
 - $V_{sw} = 400 \text{ km/s}$ (陽子 1 keV), $V_{th} = 40 \text{ km/s}$
 - 磁場 $B = 5 \text{ nT}$
 - 密度 $N = 5 / \text{cc}$
 - 無衝突プラズマ
 - Alfvén Mach数 $M_A = 5$ (超音速)
- 月の基本的性質
 - 半径 1738 km (陽子のジャイロ半径に対して十分に大きい)
 - グローバルな磁場はない。後方にウェイクが形成される。
 - 月の表面付近には(部分的に)強い磁場が存在する。

陽子のジャイロ半径は 100 km のオーダー

おもてがわ

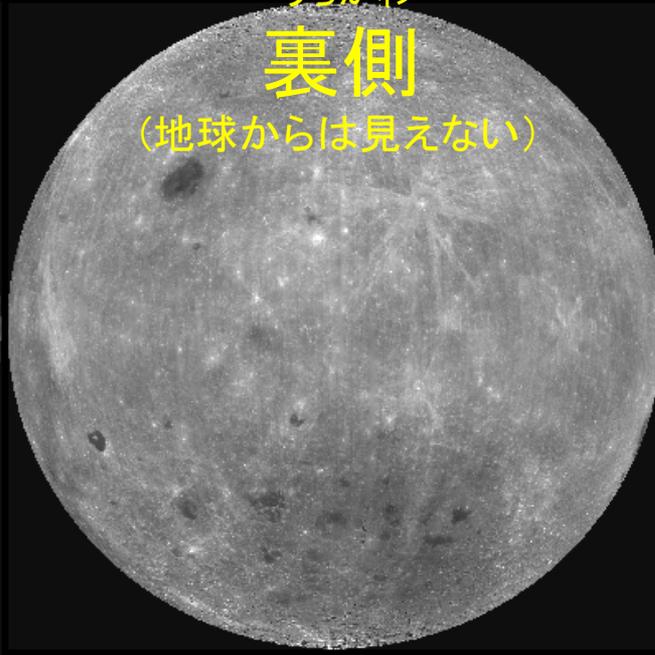
表側



うらがわ

裏側

(地球からは見えない)



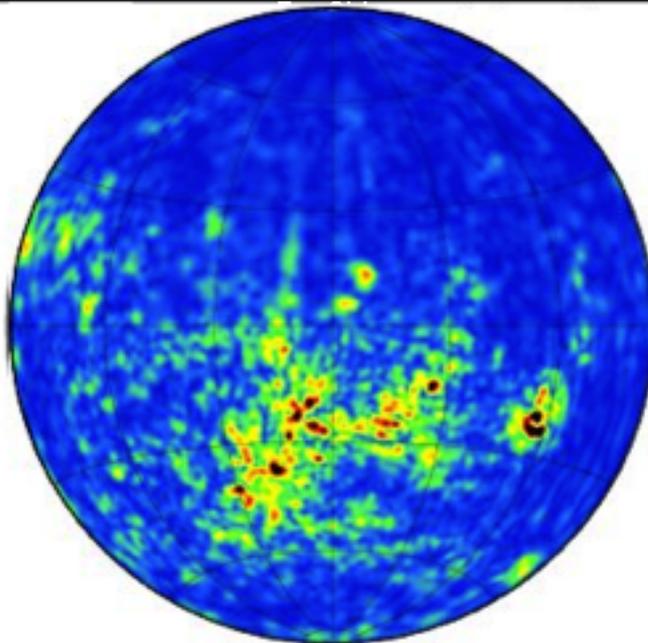
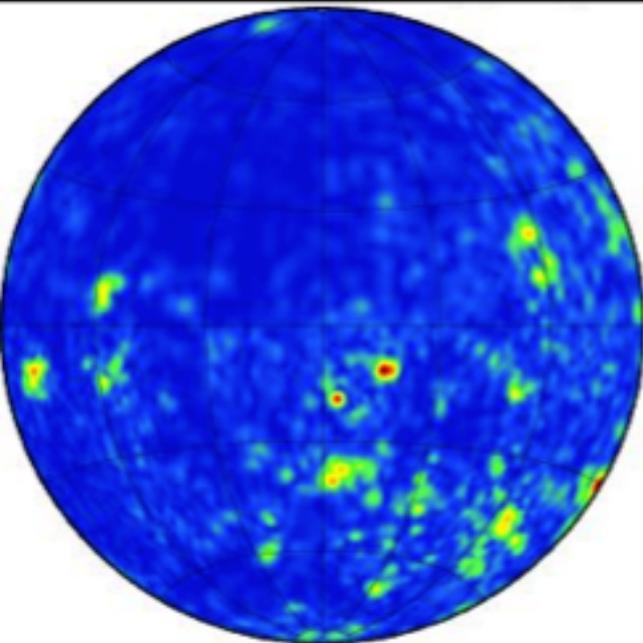
科学技術館で使用した
スライド(小学生向け)

しがいこう

紫外光～可視光

「クレメンタイン」の

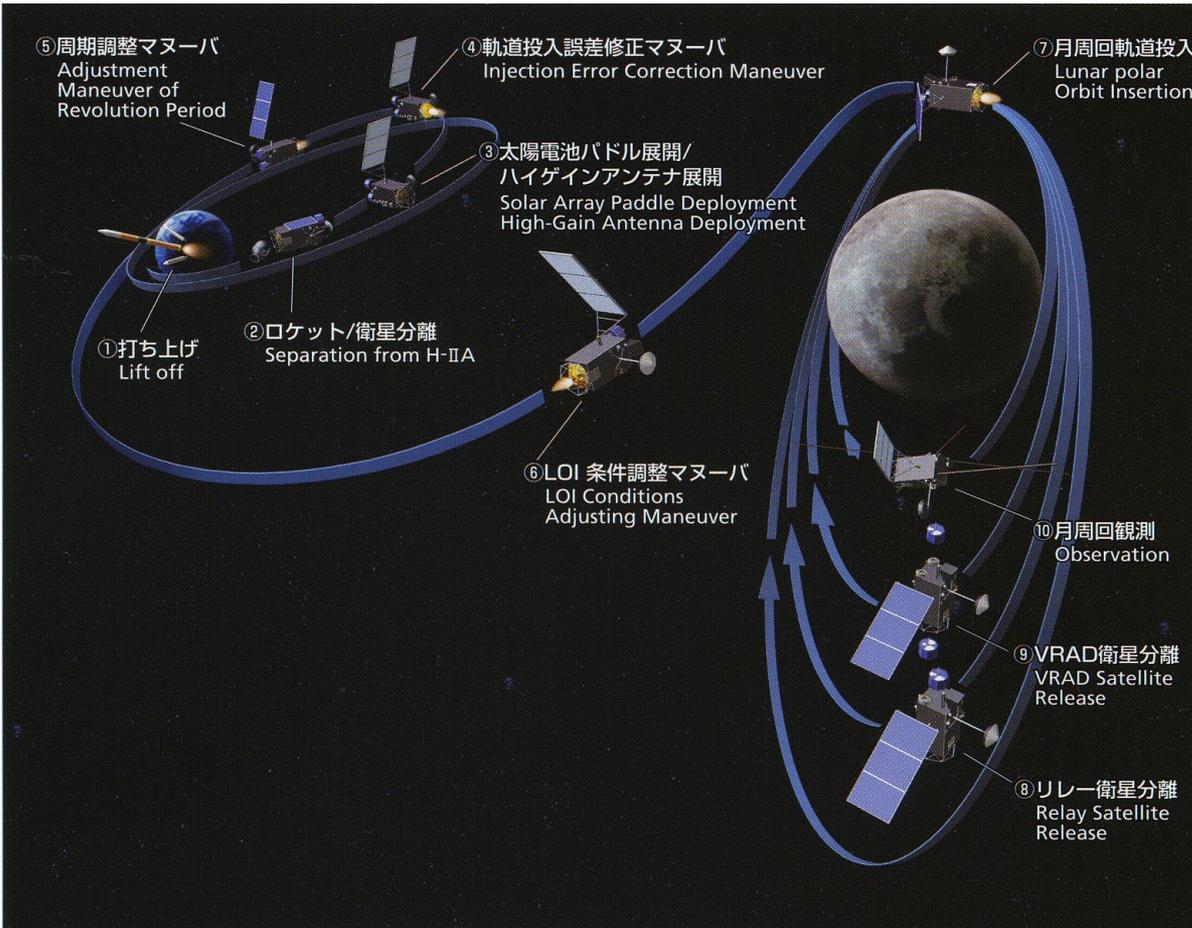
観測データ



かんそく
「かぐや」の観測

何だろう？

SELENE (Kaguya) spacecraft



• Mission

- Launch: Sept. 14, 2007
- Reentry: June 10, 2009

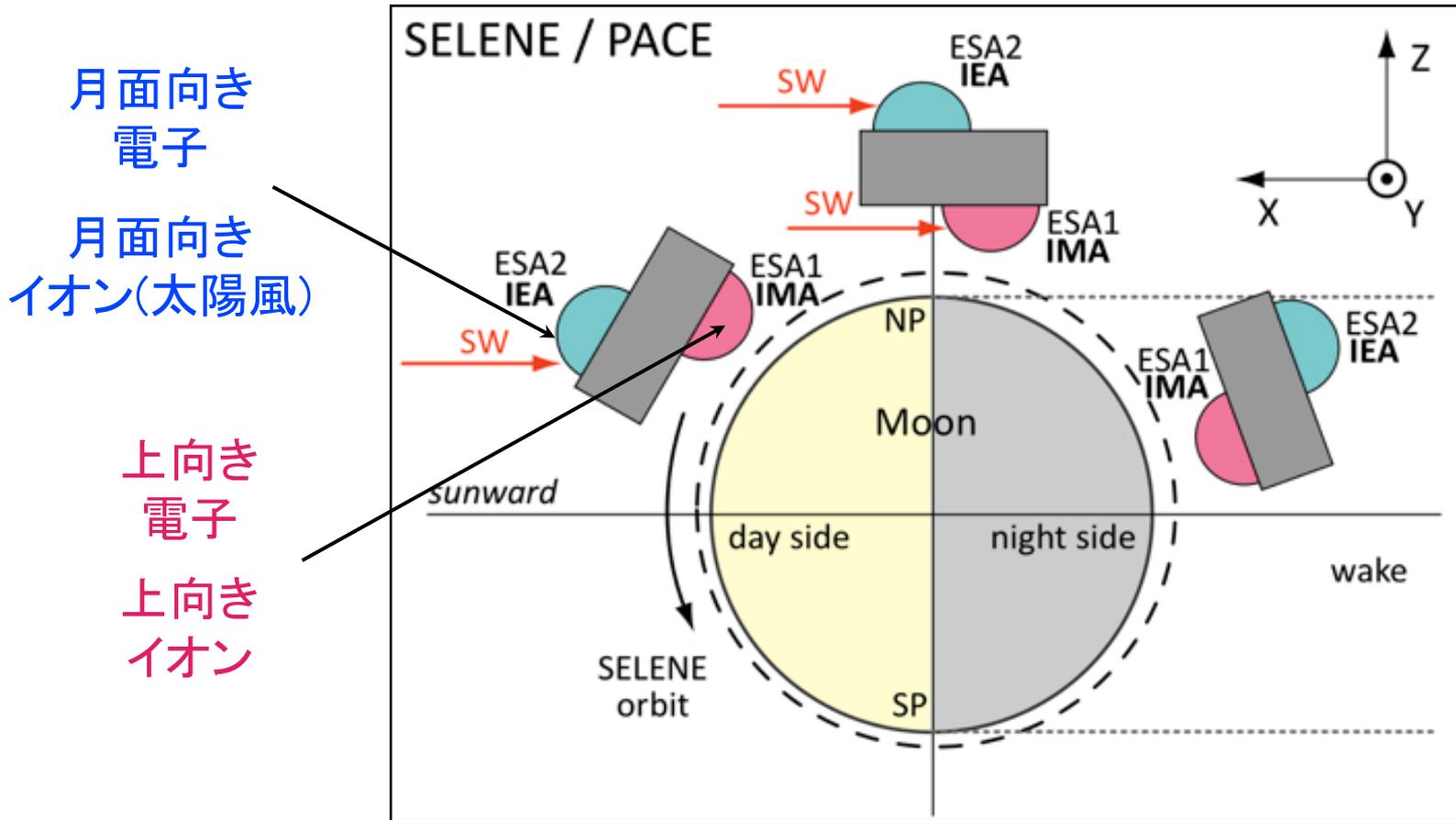
• Orbit

- polar orbit
- Typically 100 km alt. (20 km alt. in 2009)
- 2-hour period
- 3-axis stabilized

• Plasma measurement

- Ions (composition)
- Electrons
- Magnetic fields
- Waves

プラズマ観測機(PACE): 視野

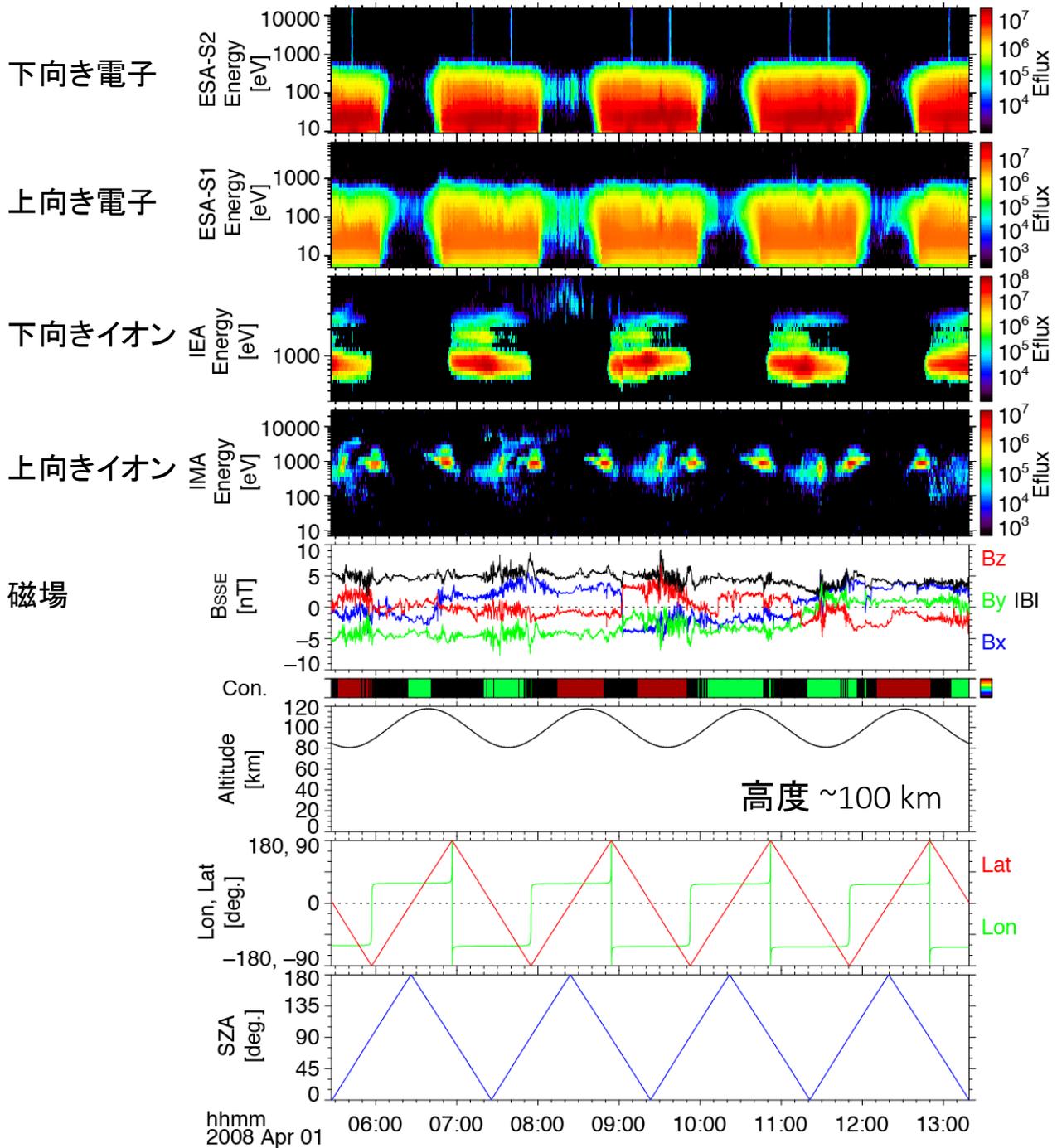


PACE : 3次元の速度分布関数

LMAG : 磁場 (32 Hz)

LRS-WFC-H : 高周波の電場 (1 kHz – 1 MHz)

- EMC問題
- 衛星表面の電位



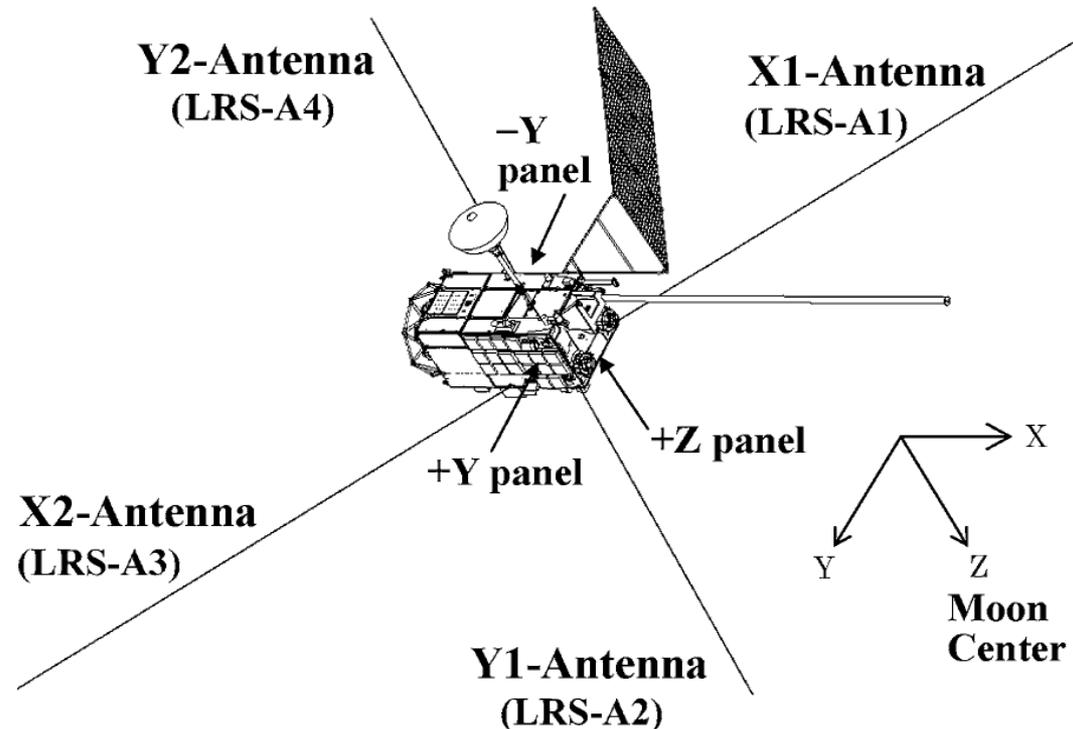
典型的なデータ

4周回分の観測

昼側は太陽風
夜側はウェイク(低密度)

Kaguya LRS/WFC (Wave Form Capture)

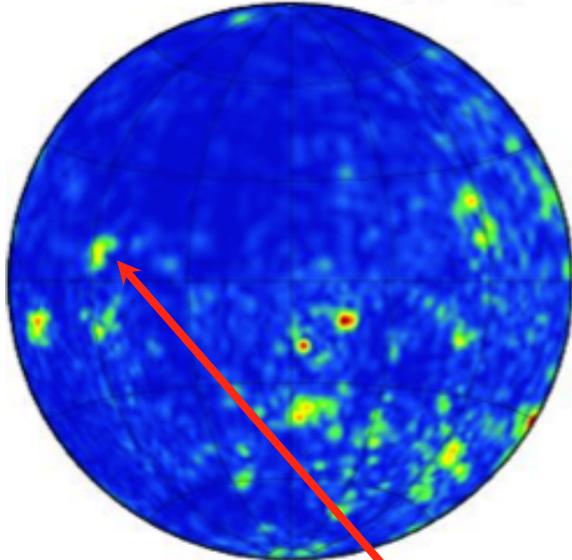
- Subsystem of LRS (Lunar Rader Sounder)
- AC E-field ($f < 1$ MHz)
- 2 orthogonal 30m tip-to-tip antennas
 - WFC-H
 - Spectrum of X & Y-ch
 - $1 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$
 - WFC-L
 - Waveforms of X & Y-ch
 - $100 \text{ Hz} < f < 100 \text{ kHz}$



月の磁気異常

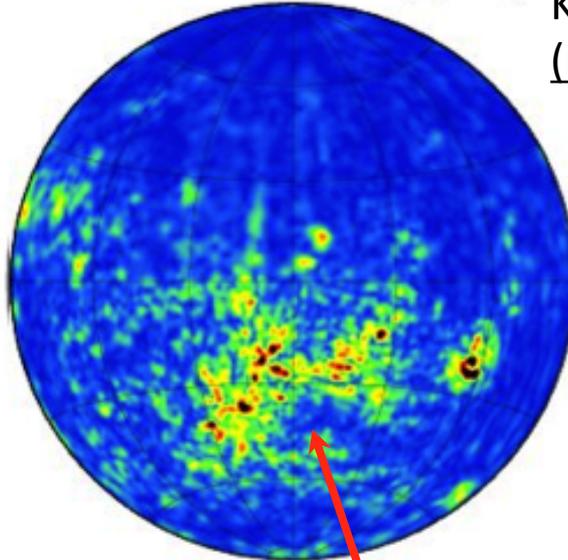
月の磁気異常

表側



Reiner Gamma

裏側



SPA (南極エイトケン) 盆地

Kaguya LMAG 30 km 高度.
(model field in vacuum)

月の半径 = 1738 km

磁気異常の空間スケール
~ 100-1000 km

磁化領域の広さは
イオンのジャイロ半径
と同程度



高度	影響
100 km	1-2 nT
30 km	~20 nT
表面	300 nT

Cf. 地球軌道付近での太陽風磁場 ~ several nT

太陽風と月面、太陽風と磁気異常

月面への陽子の入射・反射、中性化

BEN (衛星より低い高度でESW励起?)

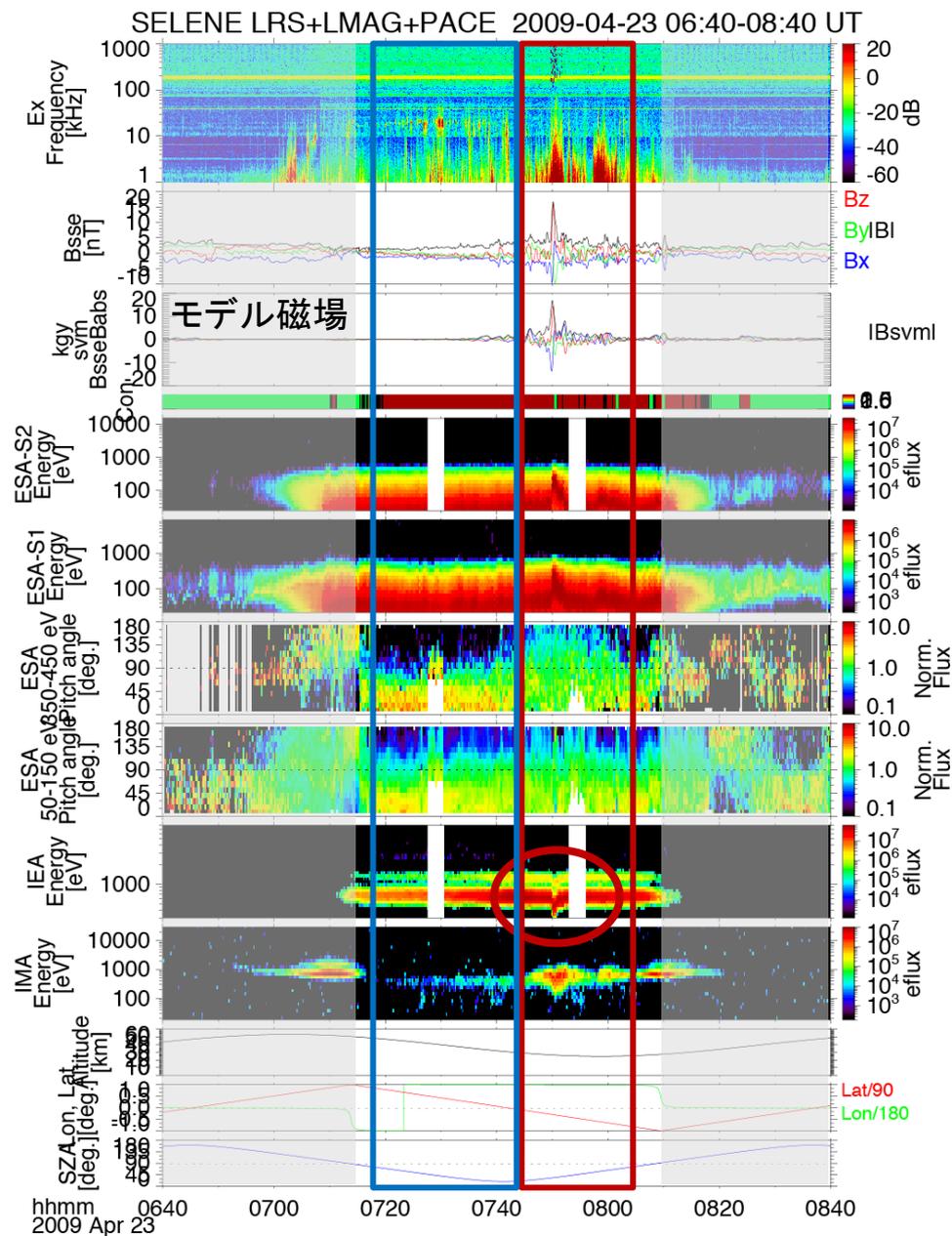
太陽風電子の下向き加速

磁場が月面に接続しているとき
電子はロスコーン分布

磁気異常上空で太陽風イオンが減速

磁気異常でイオン反射

月面でイオン反射
重イオンの存在



磁気異常の上空で起きている物理

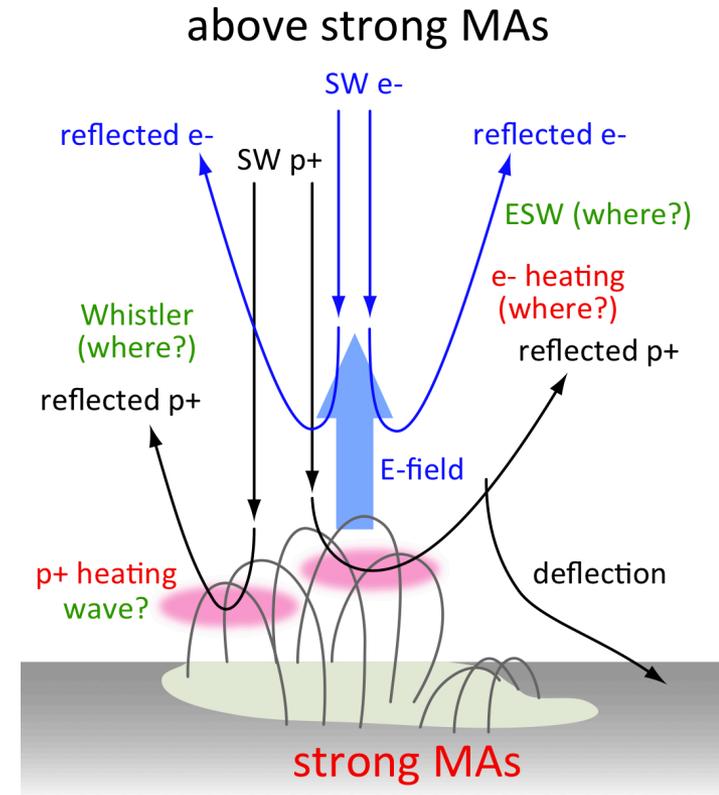
- 上向き電場

- 太陽風陽子の減速と磁場増大に相関あり (Hall-MHD効果)
- 正電荷と負電荷の運動の差による分極電場

$$\mathbf{E} = -\mathbf{V}_i \times \mathbf{B} + \frac{1}{n_e e} \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \frac{1}{n_e e} \nabla P_e \quad (1)$$

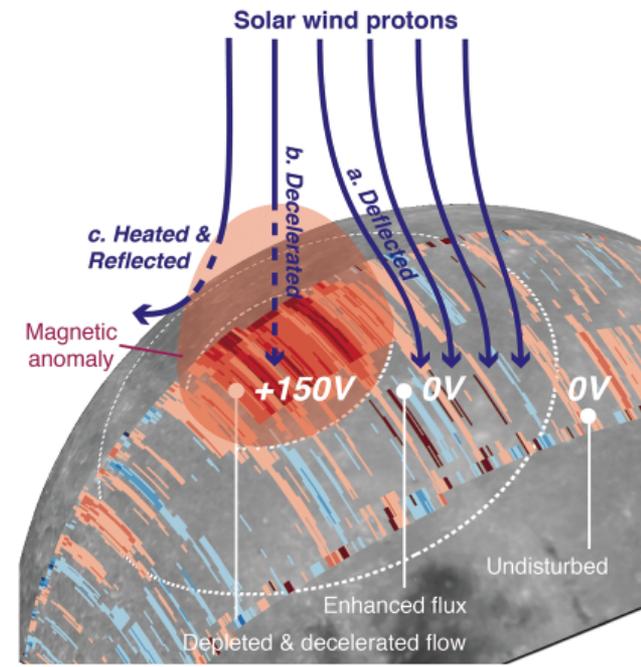
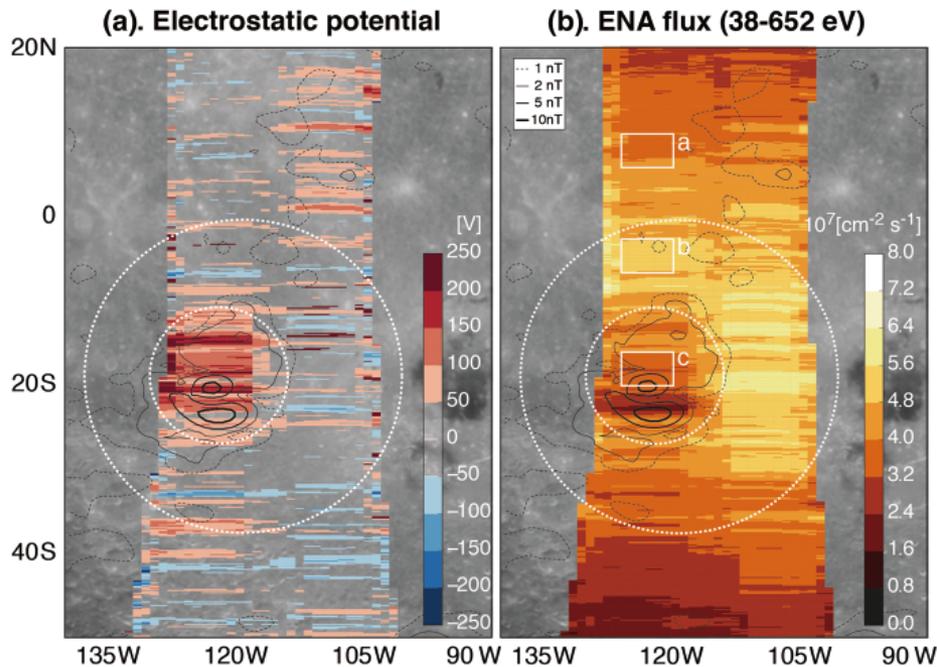
$$= -\mathbf{V}_i \times \mathbf{B} + \frac{1}{\mu_0 n_e e} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} - \frac{1}{n_e e} \nabla P_e \quad (2)$$

Kaguyaの成果
Saito et al. 2012 EPS



観測事実 磁気異常と反射水素原子

- 月面から反射する高速の水素原子
 - 磁気異常の中心部の上空では反射水素原子が少ない
 - 磁気異常で太陽風が逸れていることの決定的証拠



Chandrayaan-1の成果

Wieser+2010 GRL, Futaana+2013 JGR

太陽風陽子と月面・磁気異常の相互作用

磁化のない月面

太陽風陽子 太陽風陽子

磁気異常が無ければ(十分に弱ければ)
太陽風は**月面に衝突**する。

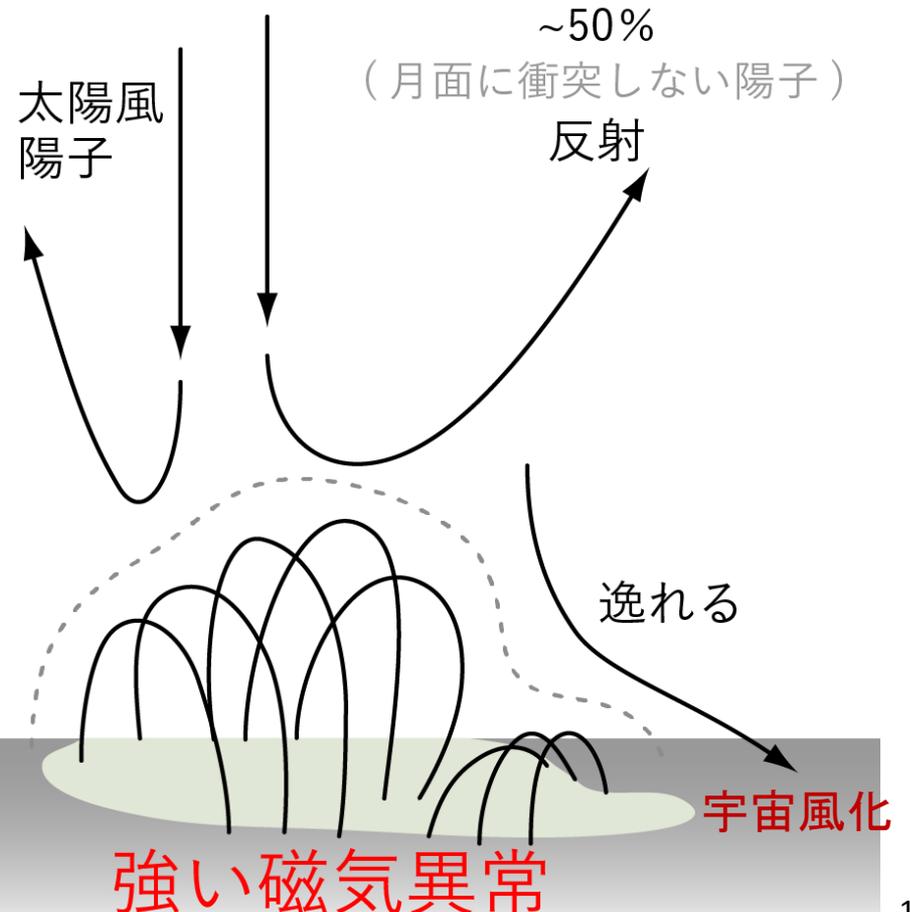
1-3%
陽子として散乱

20%
水素原子

中性化
OH/H₂O 生成?
月面

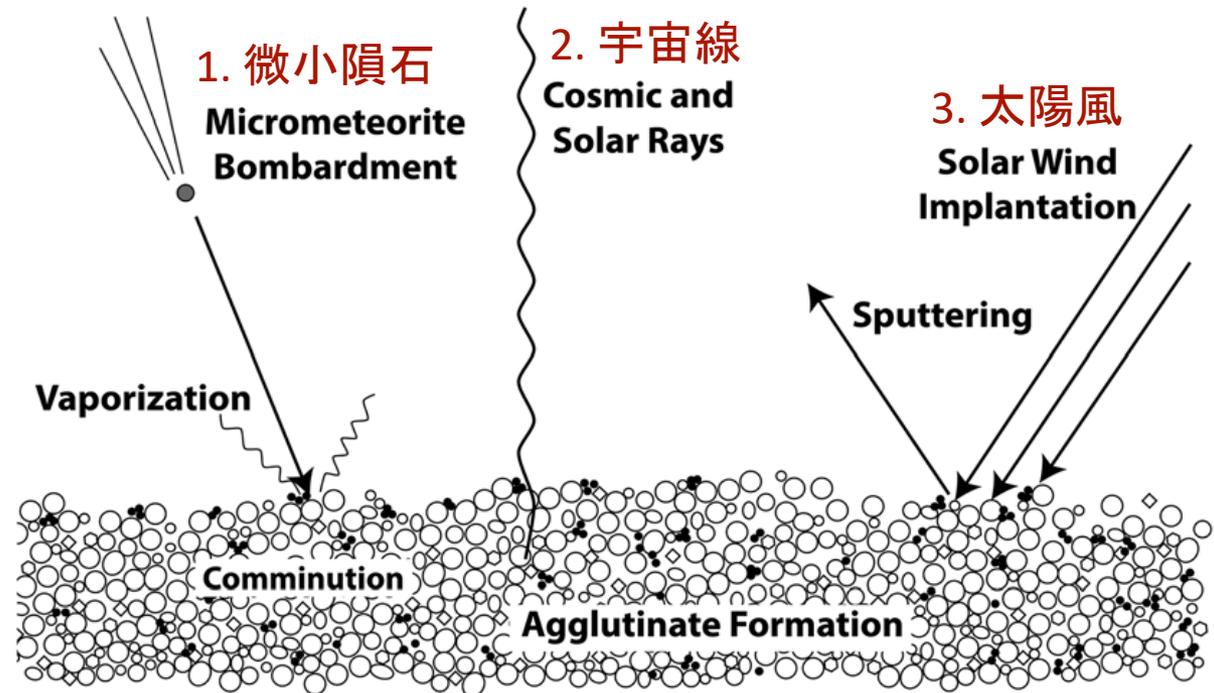
強い磁気異常の上空

一部の太陽風イオンと電子は、月面に衝突せず、磁気異常の上空で反射される。



宇宙風化

- 無大気天体(水星、月、小惑星、等)の表面の色変化
- 考えられる原因
 1. 微小隕石
 2. 宇宙線
 3. 太陽風



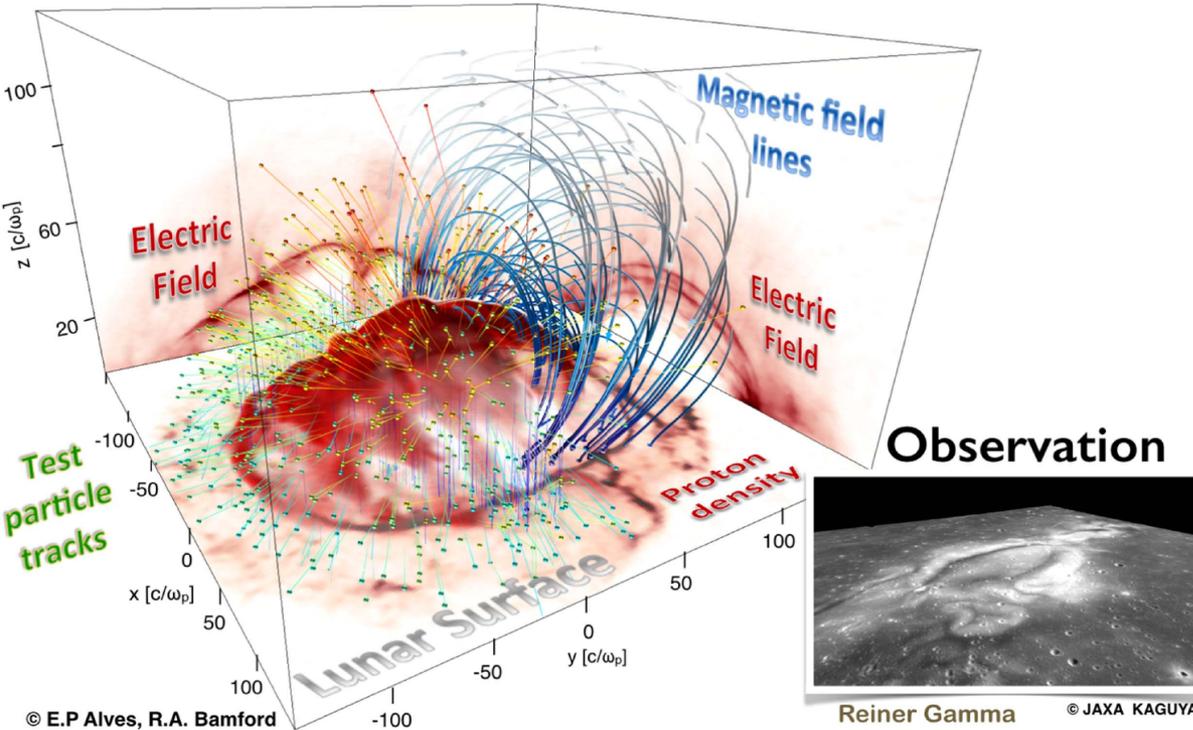
時間スケールは数億年？

Pieters & Noble 2016 JGR

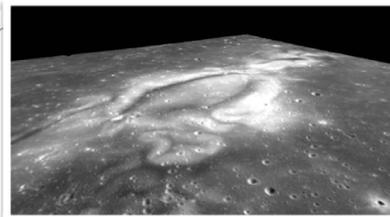
磁気異常と宇宙風化

- 磁気異常と宇宙風化には関係があると考えられている

Simulation



Observation



月のサンプル：
無酸素、600°C以上で強く帯磁。
→ 磁気異常は火成活動と関連か

Hemingway & Tikoo 2018

Swirlと呼ばれる
白い渦状模様

Bamford+2017

ただし、Swirlの白色模様の大さは
イオンの運動スケールより小さい？

磁気異常のモデル

複数のダイポールで近似できる

アルベド問題:
→ 宇宙風化?

Reiner Gamma Magnetic Anomaly

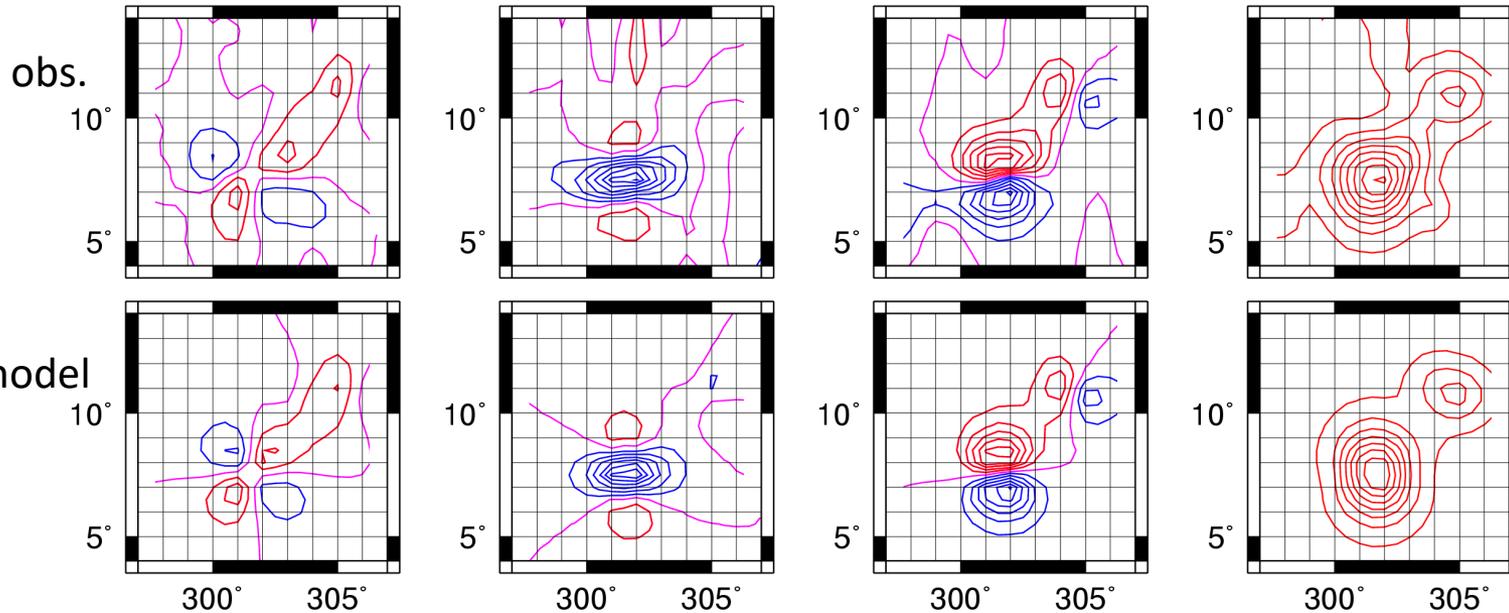
24/05/09

East

North

Radial

Total

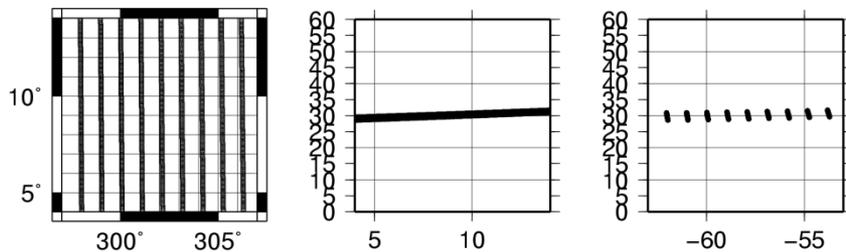


Albedo
(Blewett et al.
GRL 2007)

PATH

Alt.

Alt.



SELENE LMAG
(by Dr. Takahashi)
Cf. Kurata+2005 GRL

将来探査のイメージ 磁気異常の例

- Kaguyaは上向き電場の中にいたが、、、
- 太陽風の反射は衛星軌道より低い場所で起きている

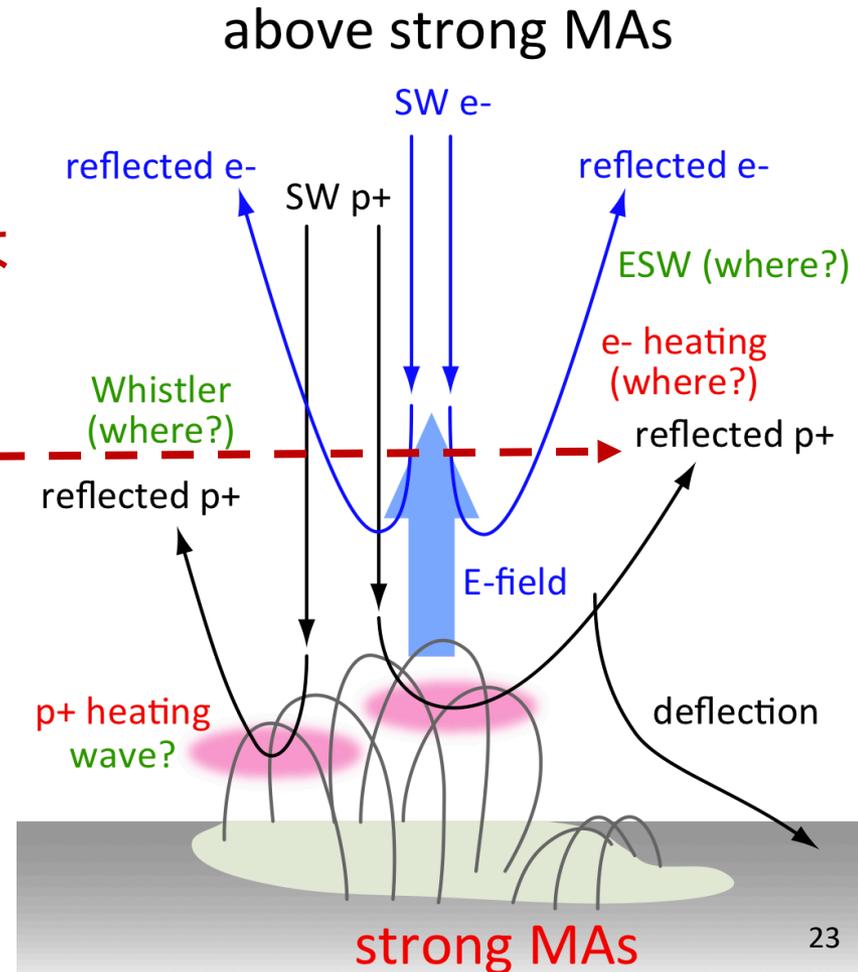
磁気異常での物理素過程を知るには
高度20km以下の探査が必要

イオン反射、電子反射、
加熱、加速、波動励起

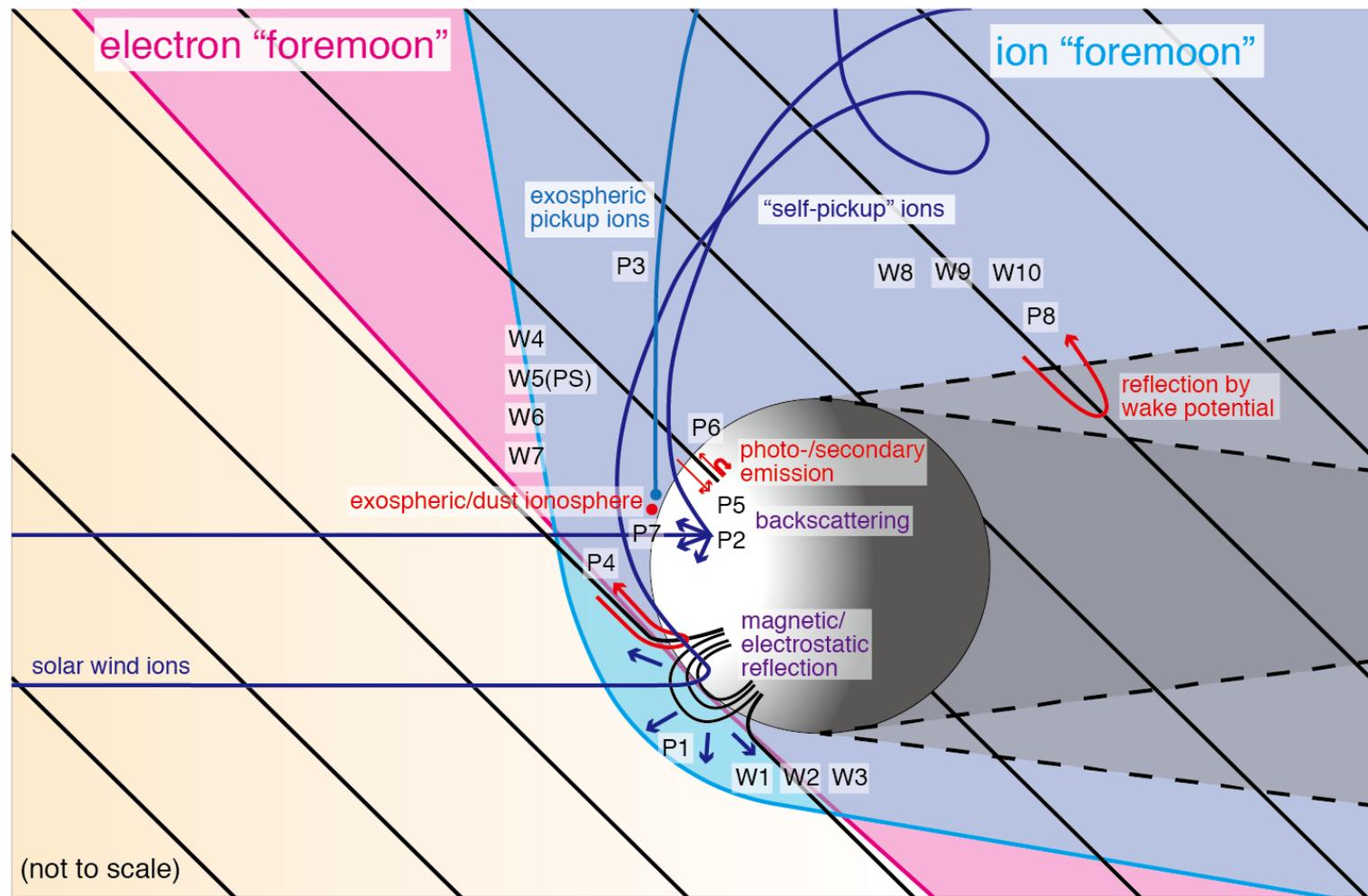
月面

20 km

Kaguya軌道



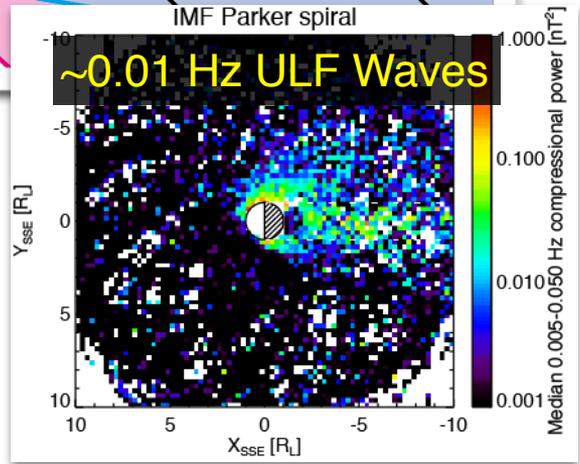
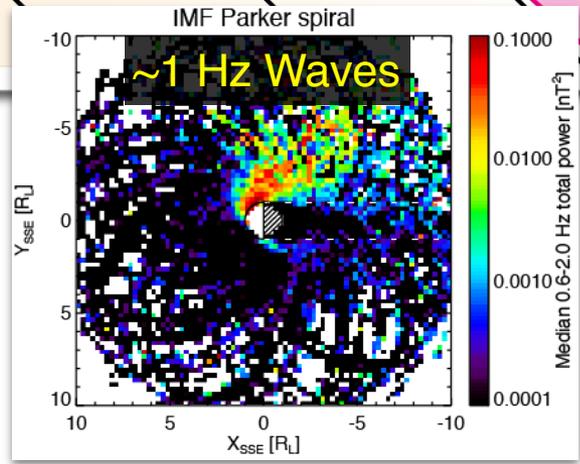
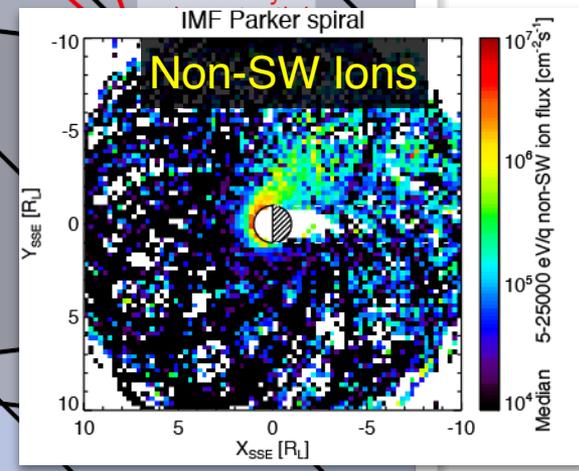
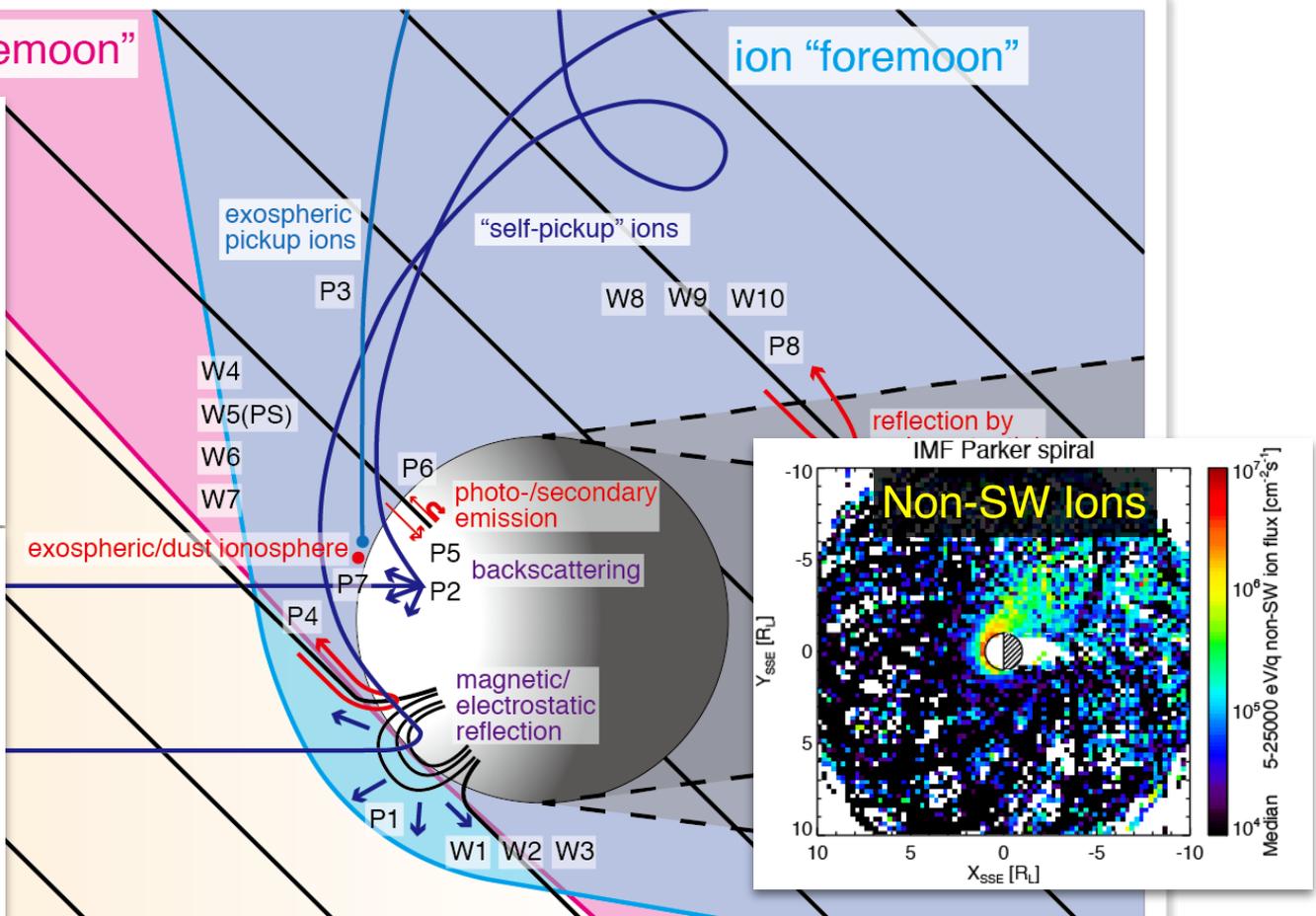
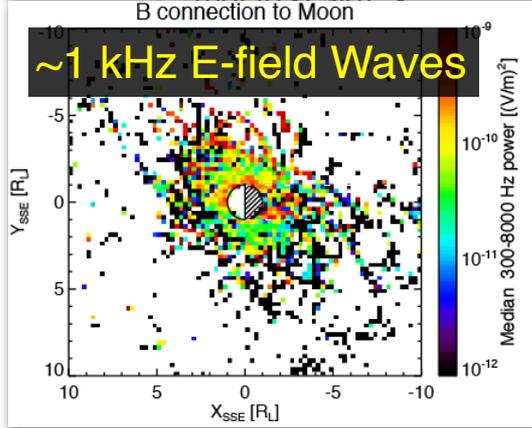
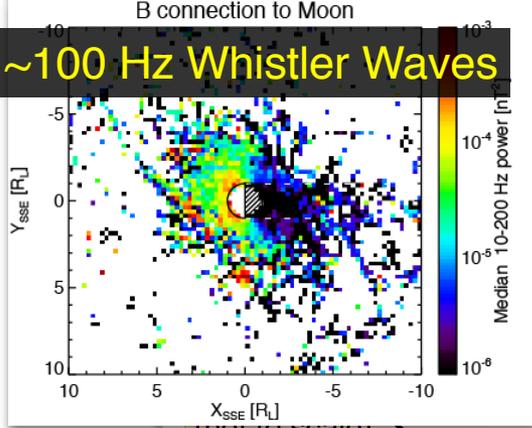
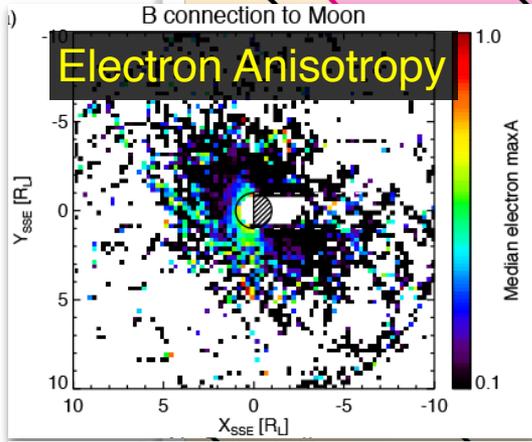
月周辺の宇宙空間への影響



Harada & Halekas 2016
 doi:10.1002/9781119055006.ch18

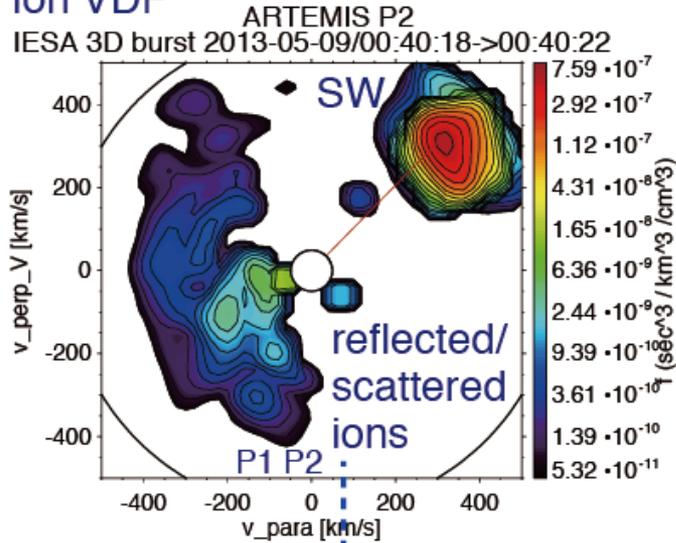
electron "foremoon"

ion "foremoon"

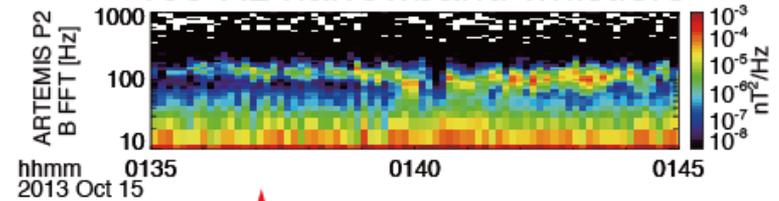


非等方な速度分布関数による波動励起

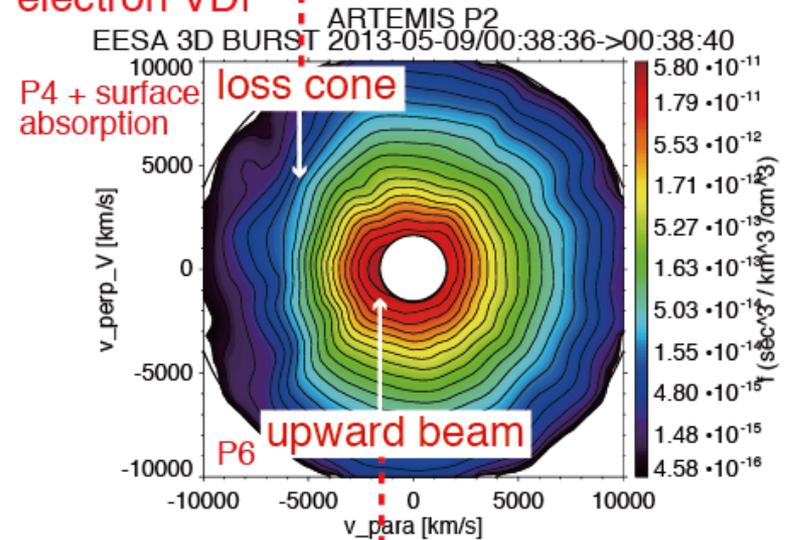
ion VDF



W4 ~ 100 Hz narrowband whistlers

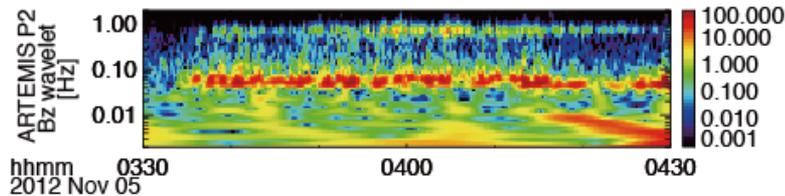


electron VDF

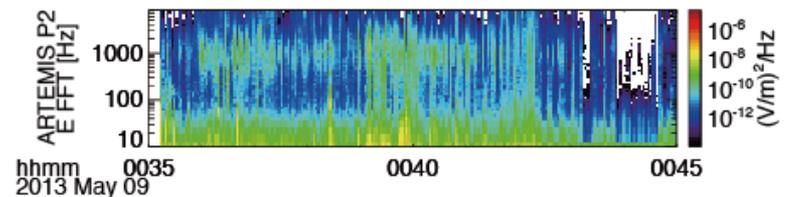


W3 ~ 1 Hz narrowband whistlers

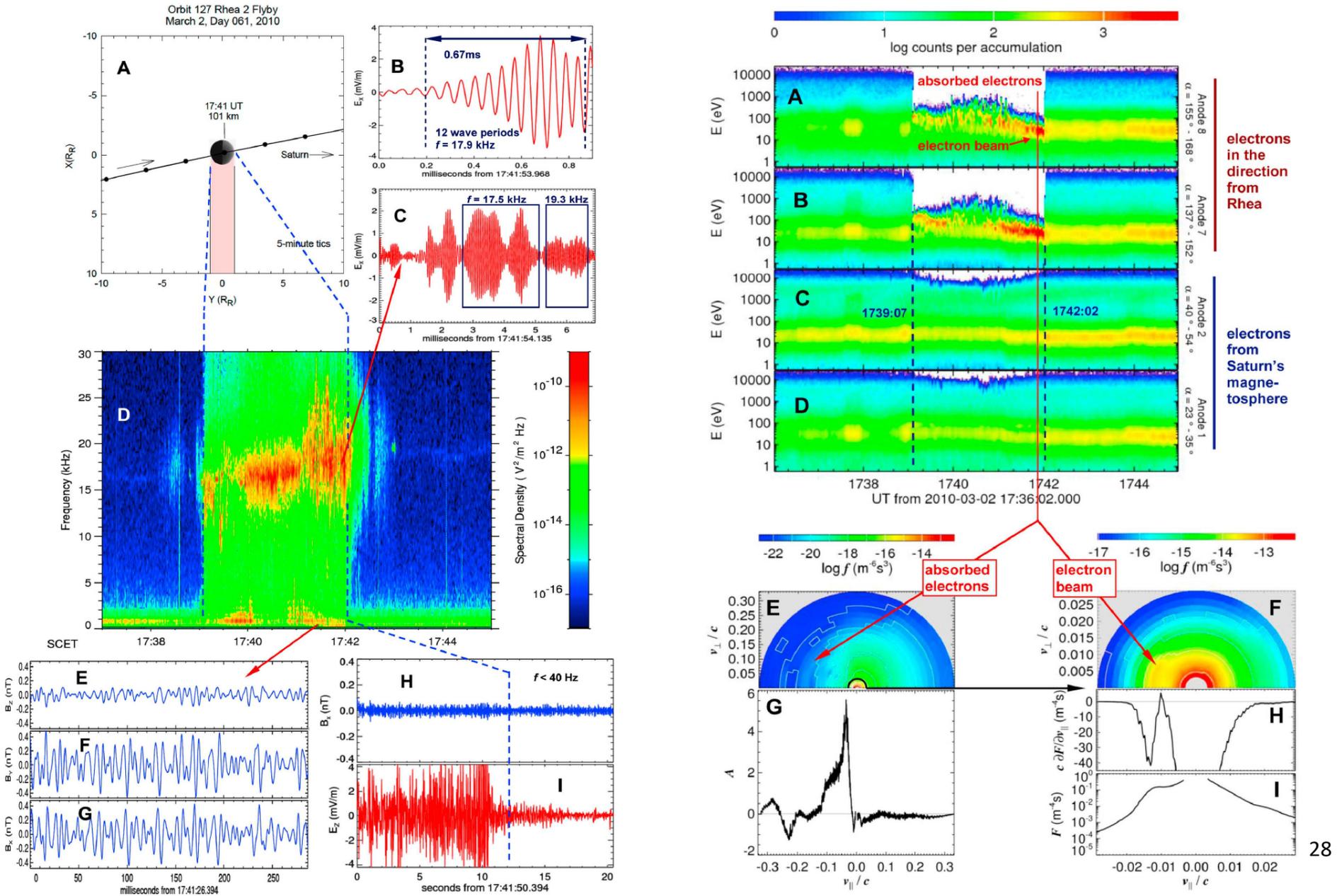
W1 ~ 0.01-0.1 Hz narrowband ULF waves



W6 broadband electrostatic emissions



Rhea (Saturn's moon)

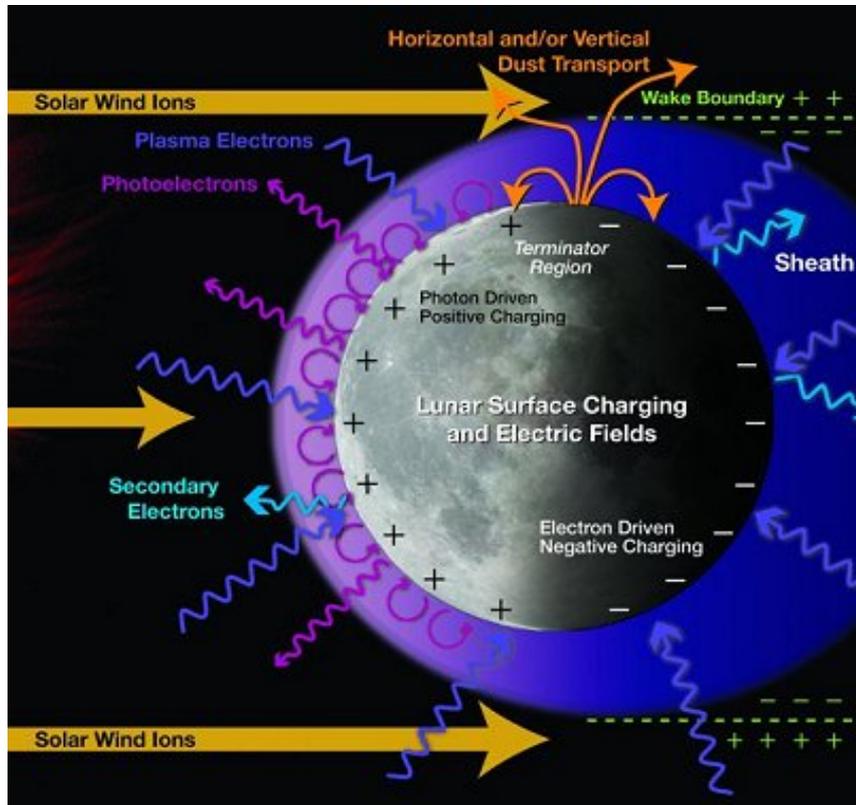


地形と電磁環境の関係

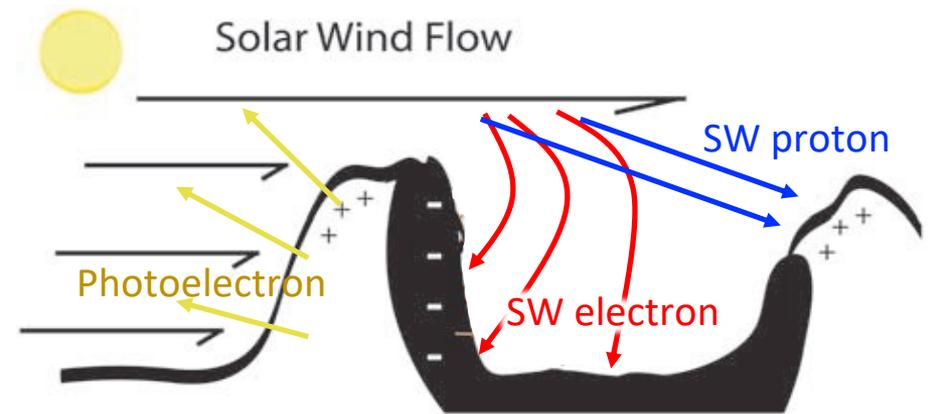
問題意識：月表面と宇宙プラズマの相互作用

天体表面と宇宙プラズマ・光電子の電気力学相互作用 ⇒ 帯電

全球スケール



局所的なスケールでも？



[modified after Farrell+2007]

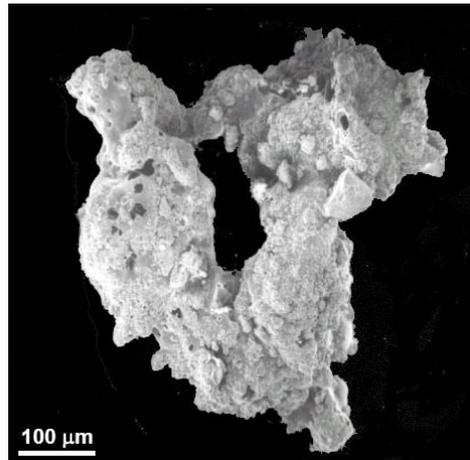
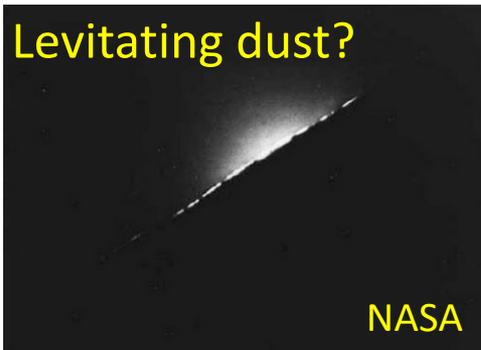
ダストの運動をどう変えるか？
H⁺の供給？

[Credit: Halekas & Delory of U.C. Berkeley, and Farrell & Stubbs of the Goddard Space Flight Center]

月面近傍の帯電ダスト環境

帯電した月表層レゴリスが静電気力により浮遊

Horizontal glow
[e.g., Criswell, 1973]

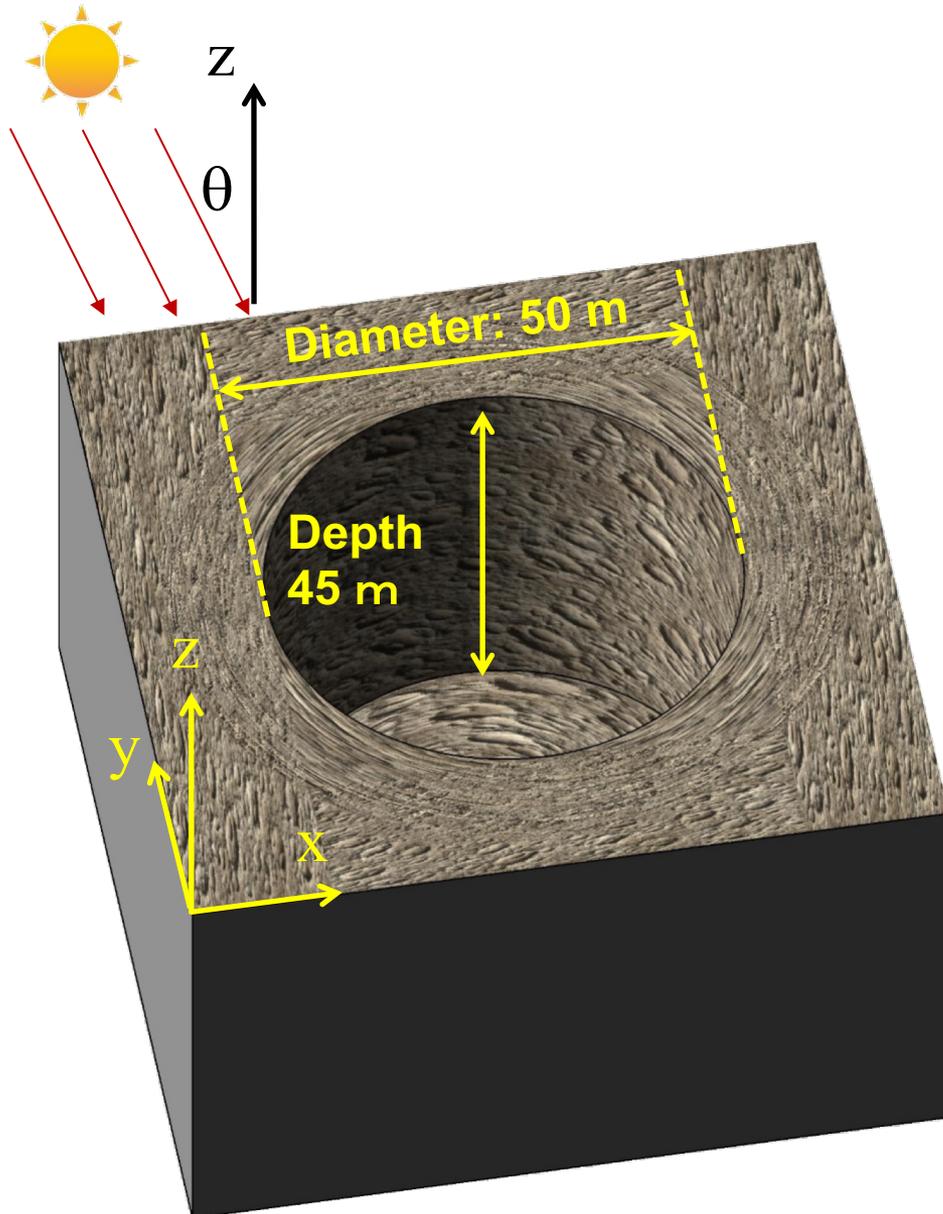


- 尖った表面
- プラズマ環境中で帯電
- 電磁気力による浮遊
- 最小で10 nmサイズか [Greenberg, 2005]
- CME等の極端環境では?

- 探査機機器類・太陽電池パネル・宇宙服性能劣化
 - 健康被害
- 月面探査、月面開発に影響

月面近傍のプラズマ・ダスト環境の予測が必須

静電環境の計算例(縦孔)



典型的な太陽風・光電子条件

- 太陽風: 5 /cc, 8.6 eV, 450 km/s, 5 nT
- 光電子: 4.5 mA/m², 2.2 eV [Willis+1973]

計算メッシュ幅: 50 cm

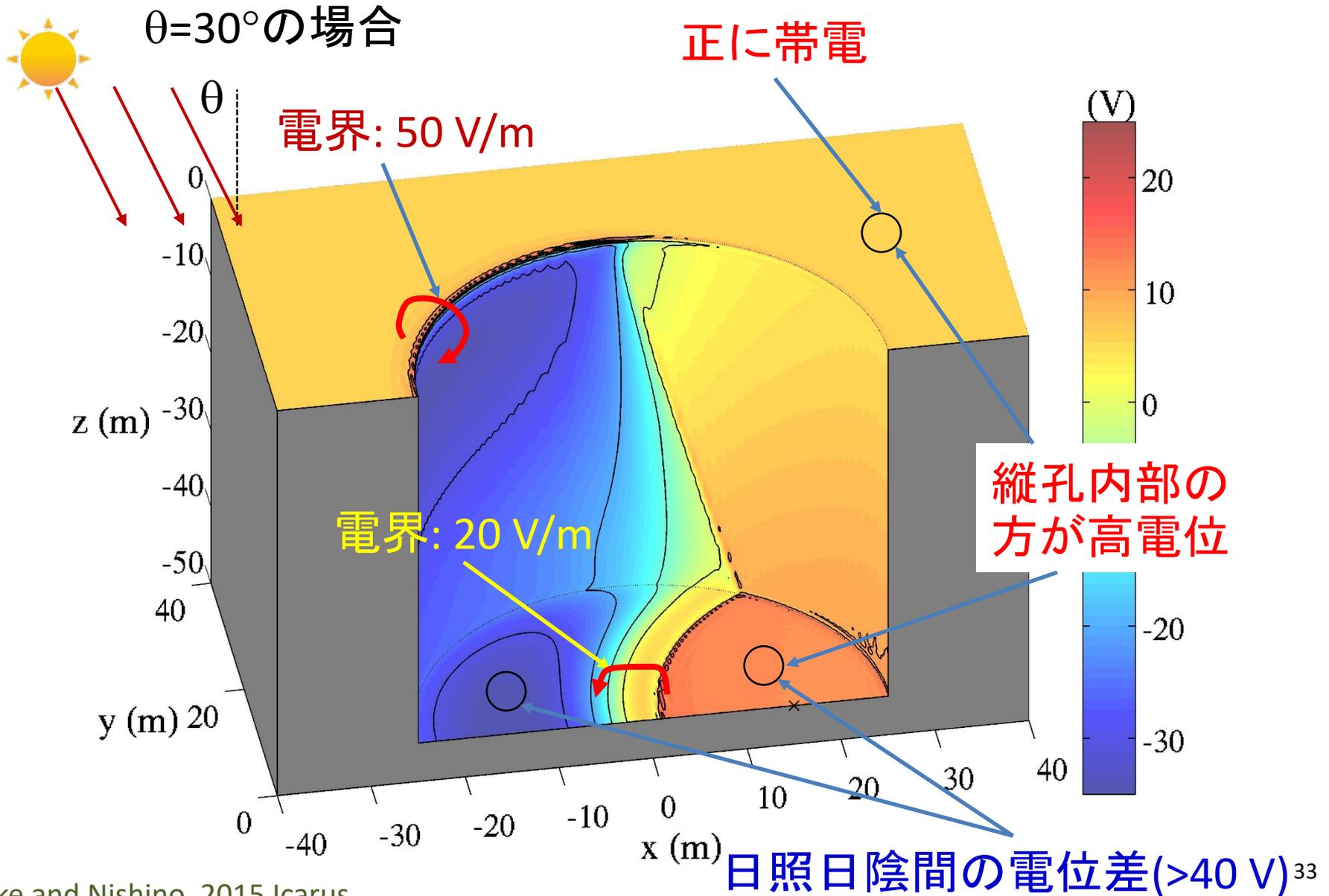
計算領域: 200 × 200 × 1000 m³

粒子数: $\sim 10^{10}$

⇒ スーパーコンピュータの利用、 10^3 並列度

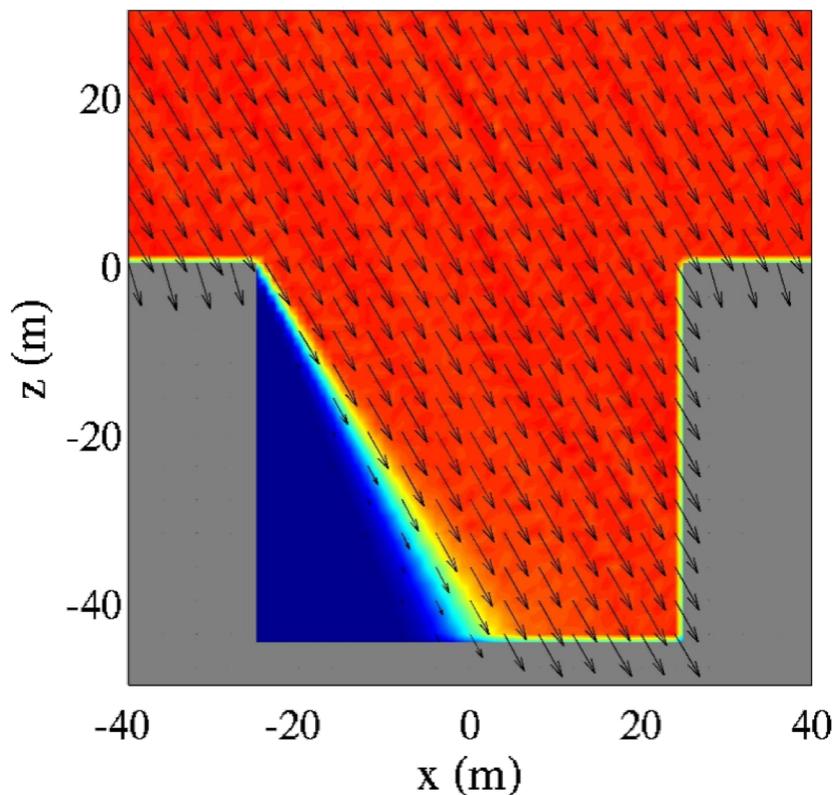


月面帯電(表面電位分布)



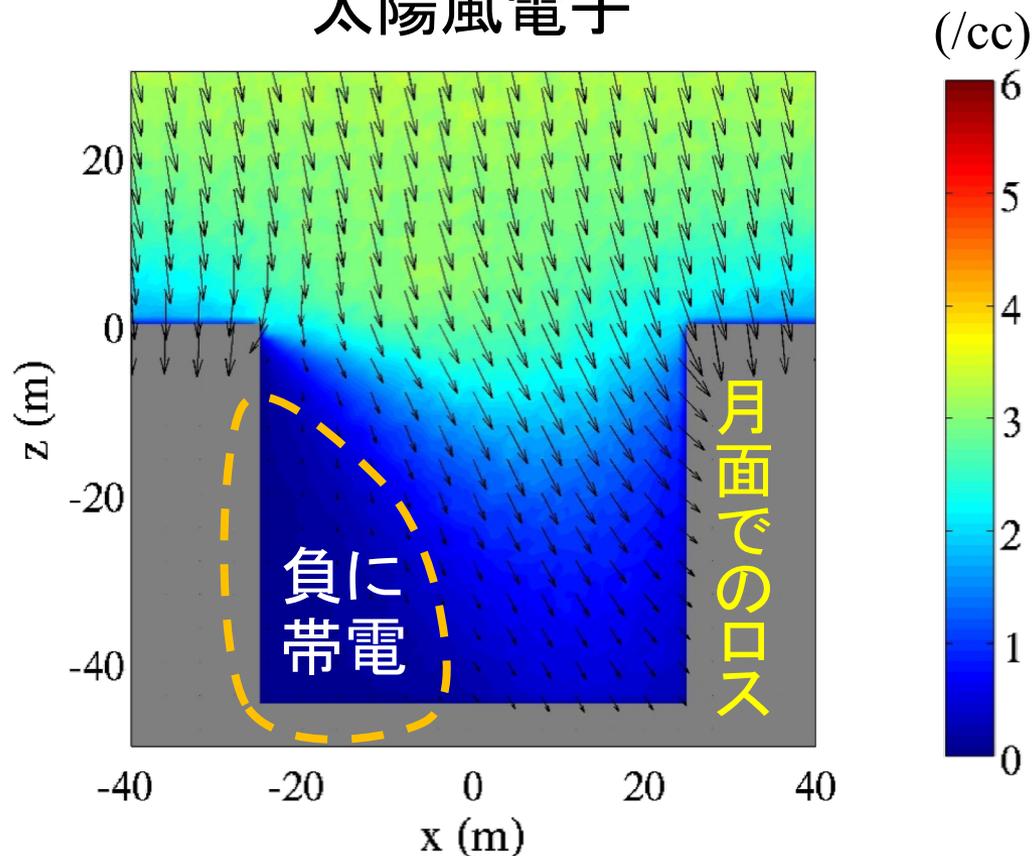
太陽風プラズマの空間分布と挙動

太陽風プロトン



Ballistic motion

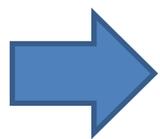
太陽風電子



Limited penetration of electrons

縦孔の外部: $J_i < J_e$

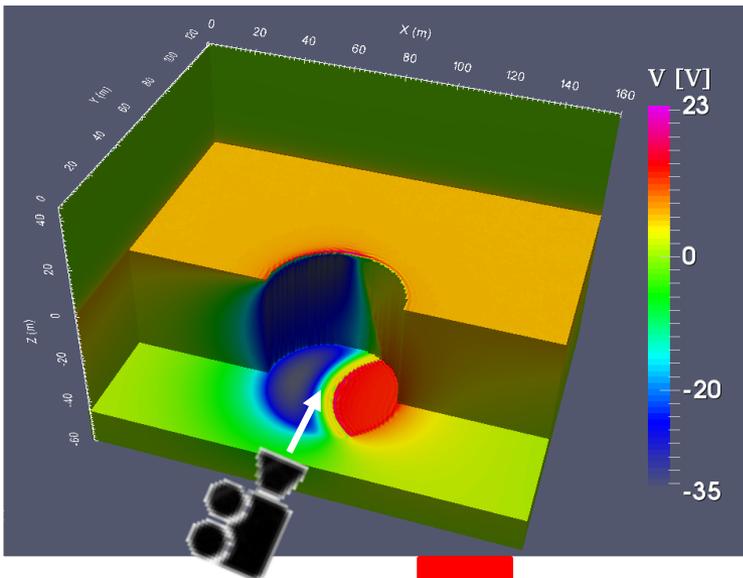
縦孔の内部: $J_i > J_e$



縦孔底部の方が高電位

縦孔周辺でのダストの帯電と運動

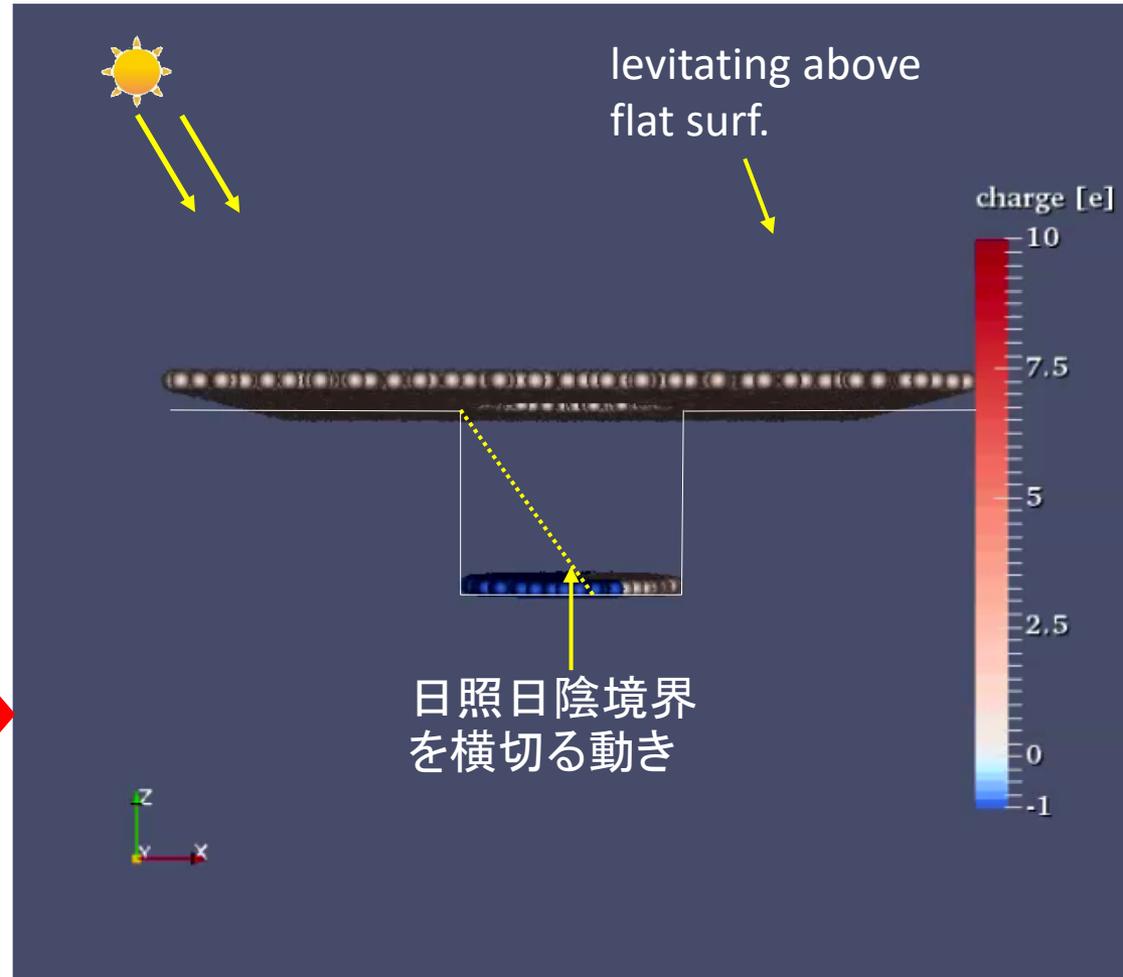
1. 電場環境を求める



Outputは
電場、電流

Input

2. ダストの帯電と運動

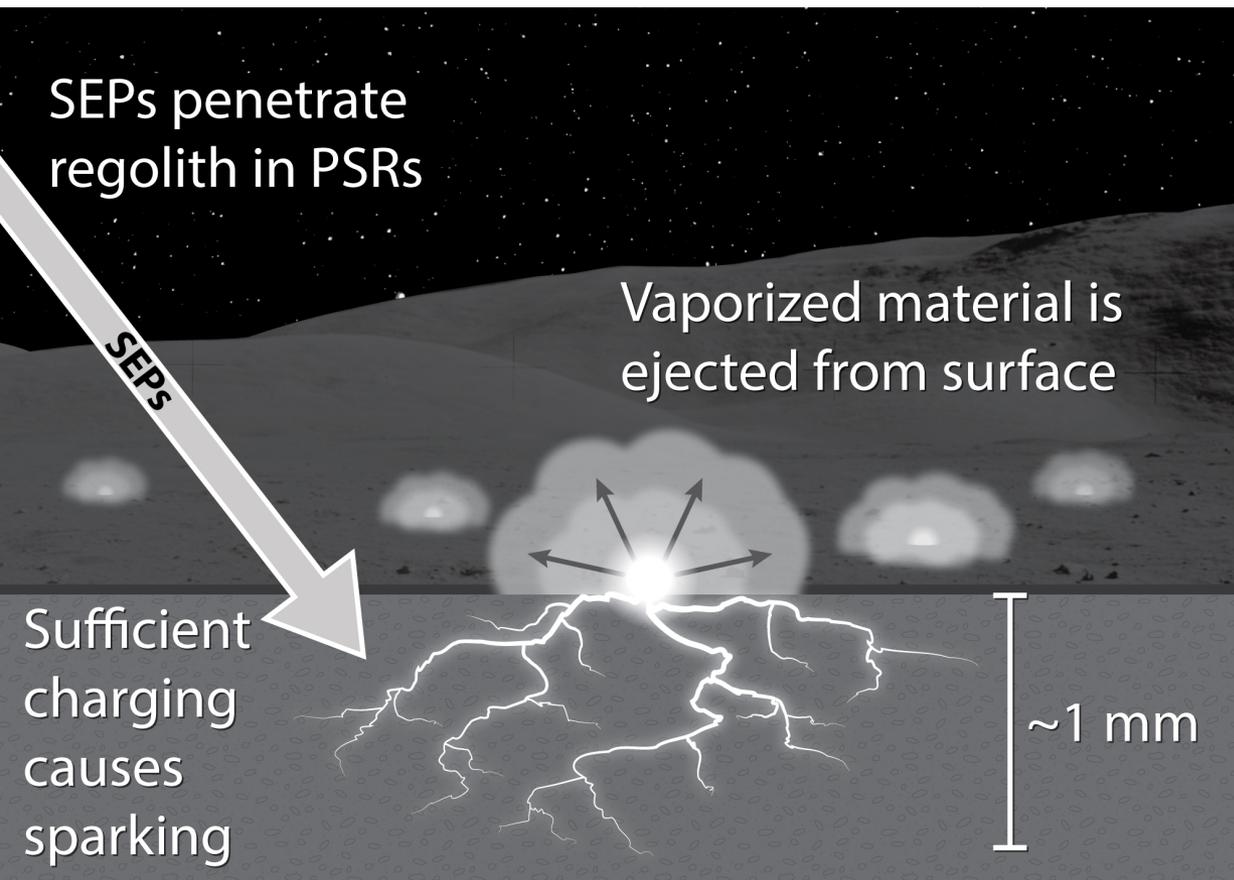


10 nm級の小さなダストに着目した計算

まとめ

1. 月のプラズマ・電磁環境の理解の現状を述べた
 - 岩石天体と宇宙プラズマの直接相互作用
 - 磁気異常 or 非磁化領域
 - ローカルな地形の効果もある
 - 帯電ダストの運動
2. 特に、磁気異常の領域
 - 今後は低高度(2~20 km)での直接観測を目指す
3. 月・水星・火星衛星での「その場」観測(+地上+モデル)
 - 木星・土星衛星系や太陽系外惑星系への応用

今後の重要な課題 SEPと月レゴリス



太陽高エネルギー粒子
(~10 MeV protons)

揮発性物質を蒸発させる？

Jordan, Stubbs, et al. 2017 Icarus

永久影に限らず、SEPが月の帯電環境をどう変化させるか？
着陸探査・有人探査へ向けて環境評価が必要。