

「月環境学の創成」

西野真木（宇宙航空研究開発機構）、臼井英之（神戸大学大学院システム情報学研究科）

NASA のアルテミス計画への日本の参加が決定した今、これまでに地上観測や月周回軌道での探査によって得られた月環境の知見を整理して今後の展望を見渡すことは重要である。本講演では、JAXA 国際宇宙探査専門委員会・アルテミス分科会での議論をふまえ、新たな学際的学術分野として「月環境学」の創成を提案する。

月は固有磁場を持たず濃密な大気も持たないため、その表面は常に周囲の宇宙環境にさらされている。月面の環境を決定する要因として、太陽風・磁気圏プラズマ、外圏（希薄中性大気）、表面帯電、磁気異常、高エネルギー粒子、ダスト（中性および帯電ダスト）、微小隕石が挙げられる。さらに、その場の固有の表面組成、緯度、地形、および日照・日陰も表面の温度や帯電を通じて月面環境に大きな影響を与えるものと予想される。このような月の「環境」に関することは地上観測や月周回軌道での観測、および計算機実験によって調べられてきたが、不明な点も多い。

ここでは月の「磁気異常」を例に、その環境に関するこれまでの理解と今後の展望を考えたい。月は全球スケールでの固有磁場を持たないが、表面が局所的に磁化していることが知られている（これを磁気異常と呼ぶ）。磁気異常は月面に飛来する荷電粒子をある程度反射するため、その領域は太陽風の入射量が少ない一方で、磁気異常の周辺部では太陽風の入射量が増えるものと予想される。近年の研究から、太陽風陽子の入射は月面で水分子の生成を引き起こすことが明らかになっており、磁気異常周辺の太陽風の入射量が多い地点では水の生成量も多い可能性がある。

磁気異常のうち swirl と呼ばれる白色の渦模様が存在する場所があり、宇宙風化による色変化と関連があると考えられている。「宇宙風化」は、大気を持たない固体天体表面のスペクトル変化として観測されるものである。成因として太陽風陽子、高エネルギー宇宙線、微小隕石が考えられているが、それぞれの寄与は不明である。この理解のためには、磁気異常領域からのサンプルリターンに加え、組成のわかっている土壌サンプルを Gateway の暴露部に搭載して宇宙風化による経年変化を調べる実験が有効だろう。

月面は帯電して電場が生じているが、磁気異常の付近では電場の空間構造・時間変化ともに複雑になり、月面付近に存在する帯電ダストの運動も現状では予測が難しい。全球スケールでの帯電と局所地形による帯電はメカニズムが異なる可能性もあり（三宅ほか、本研究会講演）、電場構造も含めてさらなる研究が必要である。また、静電場による帯電ダストの加速現象という理学的な興味に加えて、近い将来の人類の月面活動に向けて、尖鋭なダストによる宇宙服や宇宙機器の劣化の評価や、人体への影響の医学的評価も急務である。

本稿では磁気異常を例に、その環境の理解の現状とさらなる研究の必要性を述べた。近い将来に月面の探査を行ううえで理工連携が必須であることは周知のことであるが、放射線環境・ダスト環境を評価するにあたって医学も加わった「理工医連携」が欠かせない。「月環境学」の創成にあたり、幅広い分野の皆様のご参加をお願いしたい。

月環境学の創成

第22回 惑星圏研究会(オンライン)
2021/02/17-19

西野真木(JAXA/ISAS)、臼井英之(神戸大学)
国際宇宙探査専門委員会 アルテミス分科会

西野 連絡先 nishino@stp.isas.jaxa.jp

お伝えしたいこと

- 月の環境とは
- 月周回軌道での観測で月環境の何がわかったのか
- アルテミス時代の月環境学は何をするべきか(案)

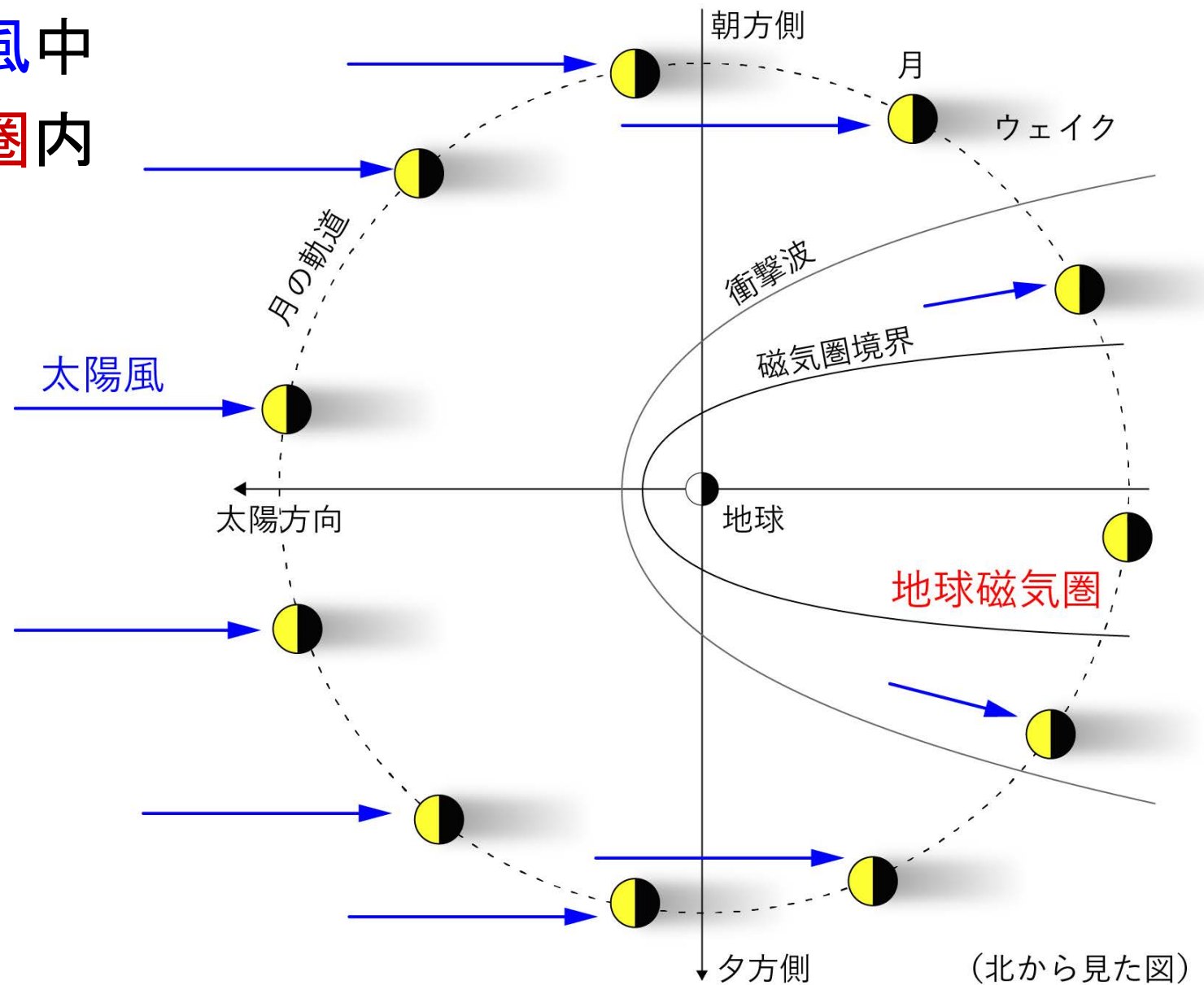
新たに「月環境学」をぜひ一緒に進めていきましょう

月面の環境要因

- 太陽風・磁気圏プラズマ
 - 外圏(希薄中性大気)
 - 表面帯電
 - 磁気異常
 - 高エネルギー粒子
 - ダスト(中性および帯電ダスト)
 - 微小隕石
-
- 表面組成、緯度、地形、、、
 - 日照/日陰(→帯電および温度)

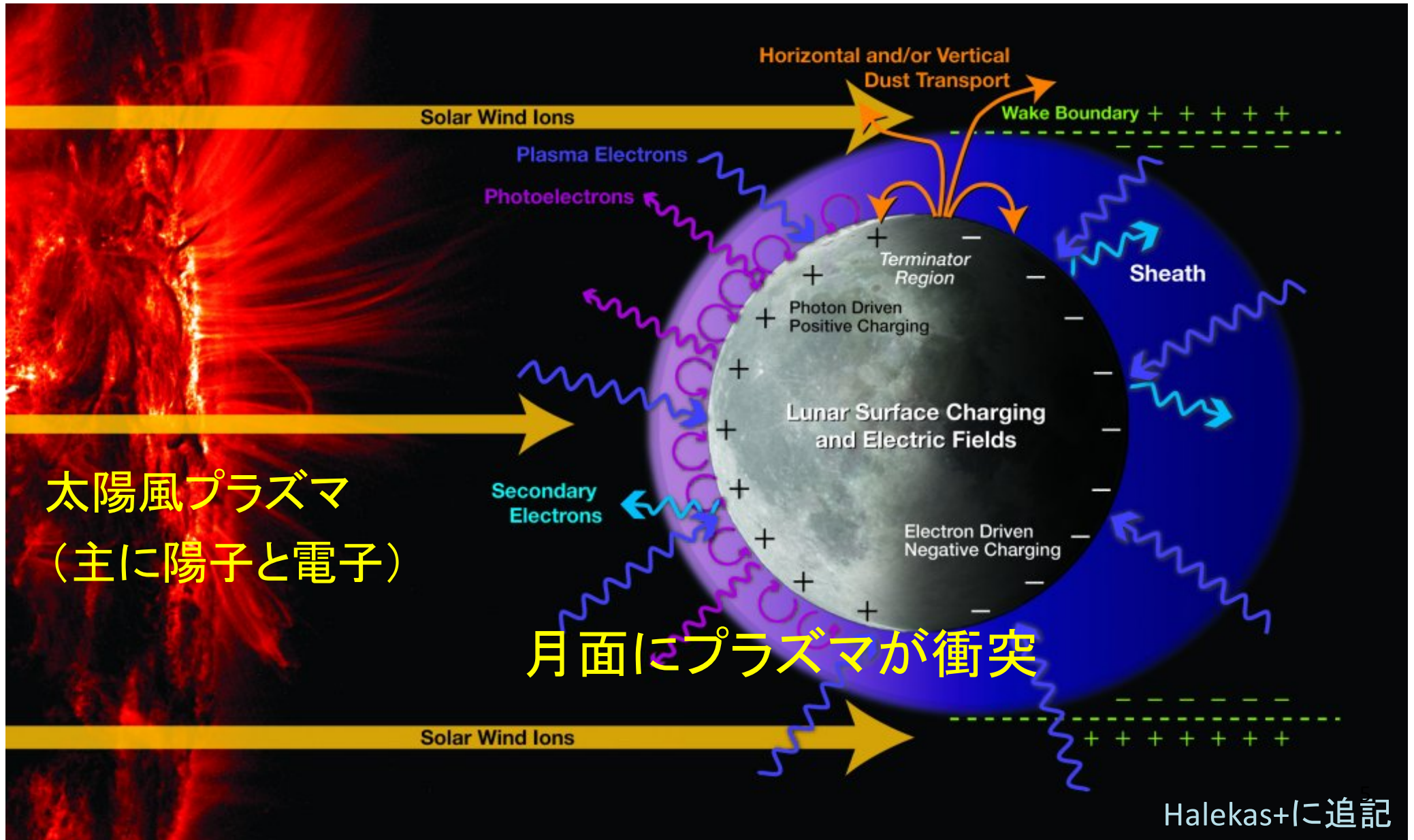
月のプラズマ環境(太陽風、磁気圏)

- 8割は太陽風中
- 2割は磁気圏内



太陽風・太陽光と月面

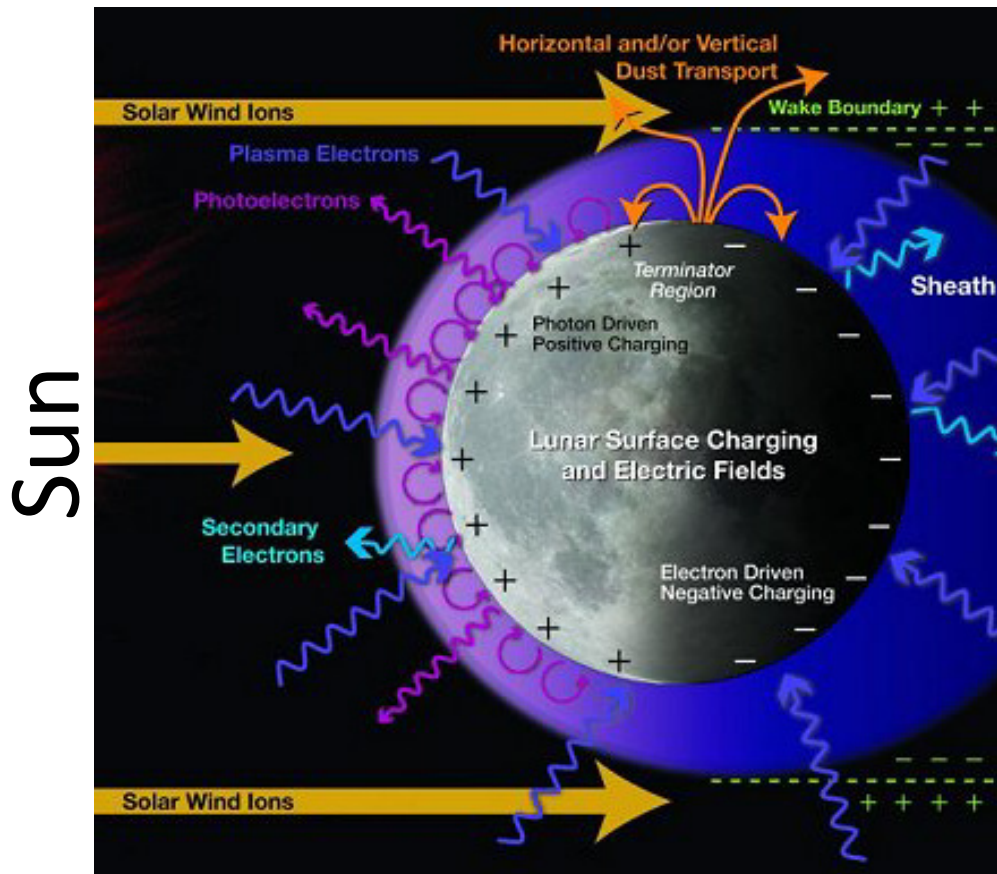
日照・日陰による違いがある。



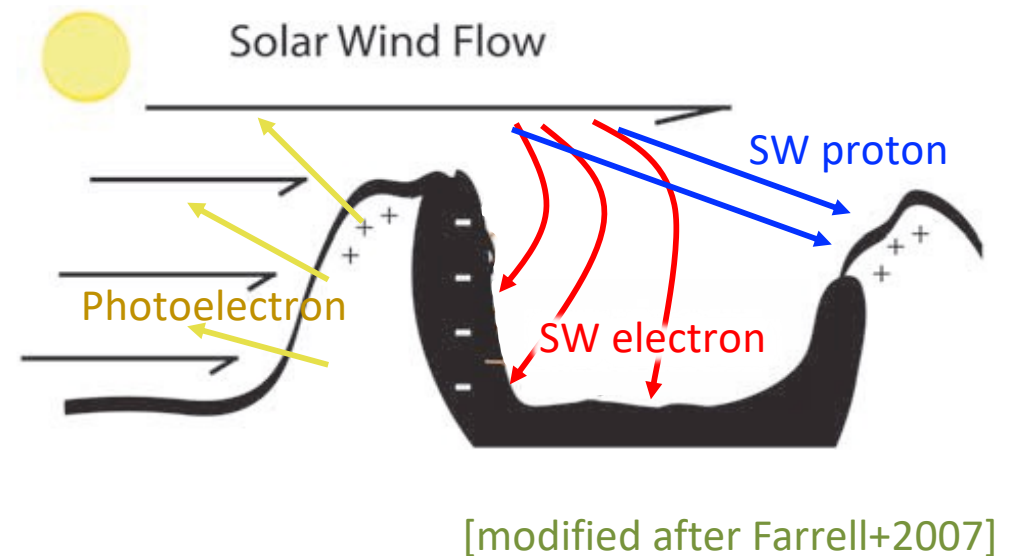
問題意識：月表面と宇宙プラズマの相互作用

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]

プラズマ & 帯電ダスト

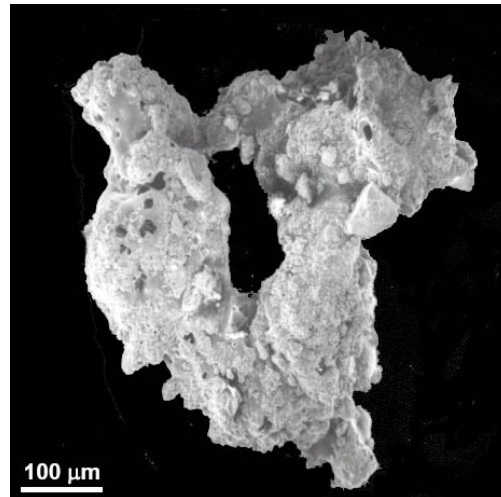
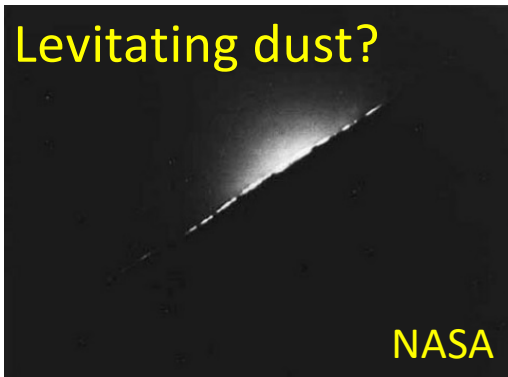
[Credit: Halekas & Delory of U.C. Berkeley, and Farrell & Stubbs of the Goddard Space Flight Center]

月面近傍の帯電ダスト環境

三宅先生
(神戸大)

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?

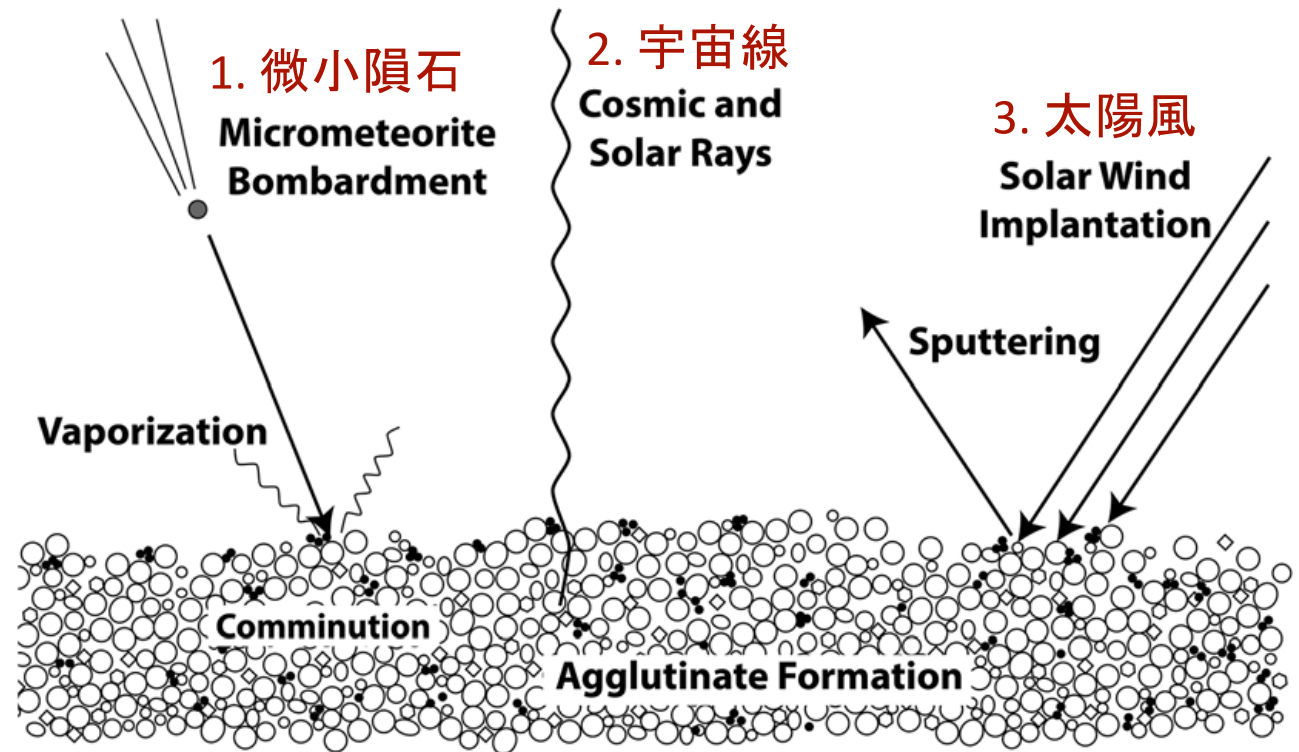
CME=Coronal Mass Ejection
太陽からの大規模な質量放出

- 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

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？
いや、もっと短い？

H₂Oの供給・生成とも関連あり

Pieters & Noble 2016 JGR

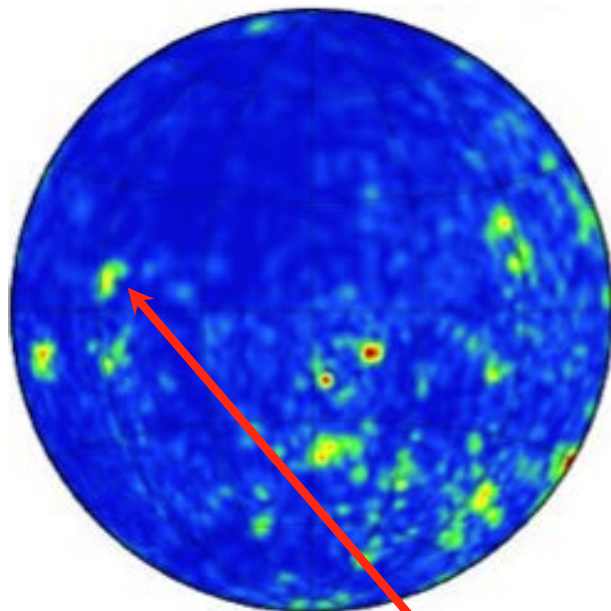
1000年で飽和 Nakauchi+2021

月の磁気異常

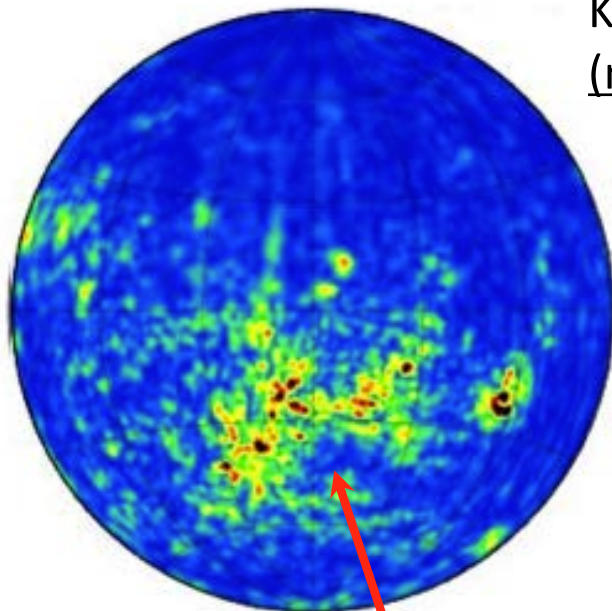
表側

裏側

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



Reiner Gamma



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

SPA (南極エイトケン) 盆地

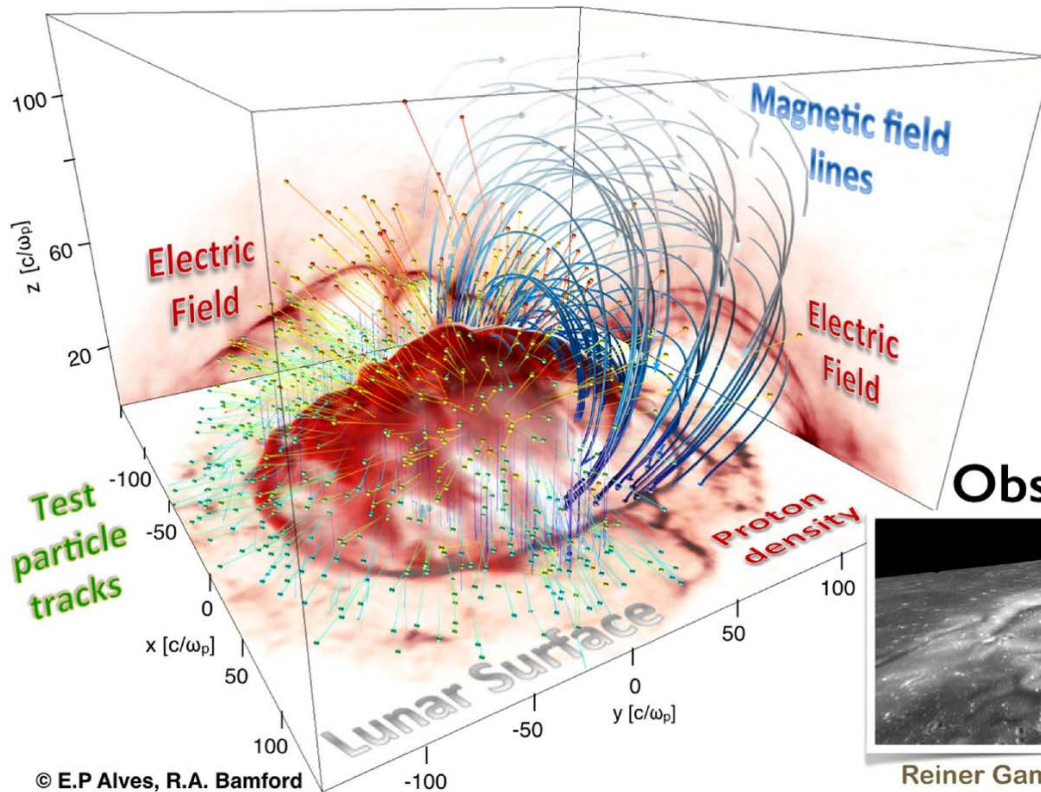
高度	影響
100 km	1-2 nT
30 km	~20 nT
表面	300 nT

Cf. 地球軌道付近での太陽風磁場 ~ several nT

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
- 着陸探査、サンプルリターンの標的

Simulation

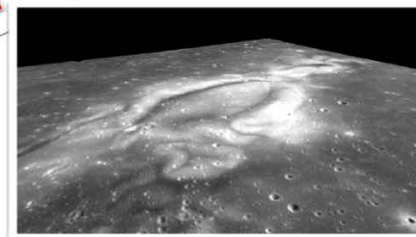


Bamford+2017

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

Observation



Reiner Gamma

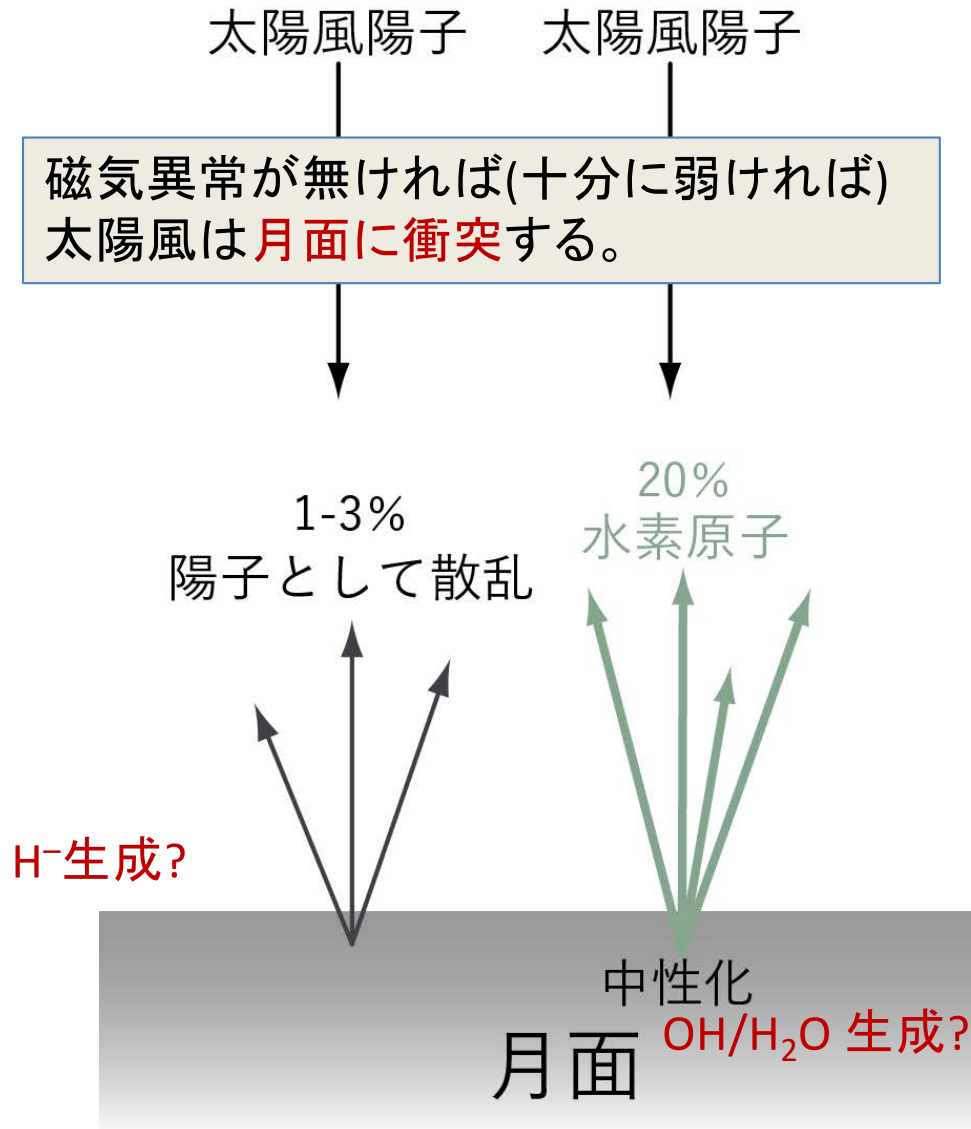
© JAXA KAGUYA

Swirlと呼ばれる
白い渦状模様

ただし、Swirlの白色模様の大きさは
イオンの運動スケールより小さい？

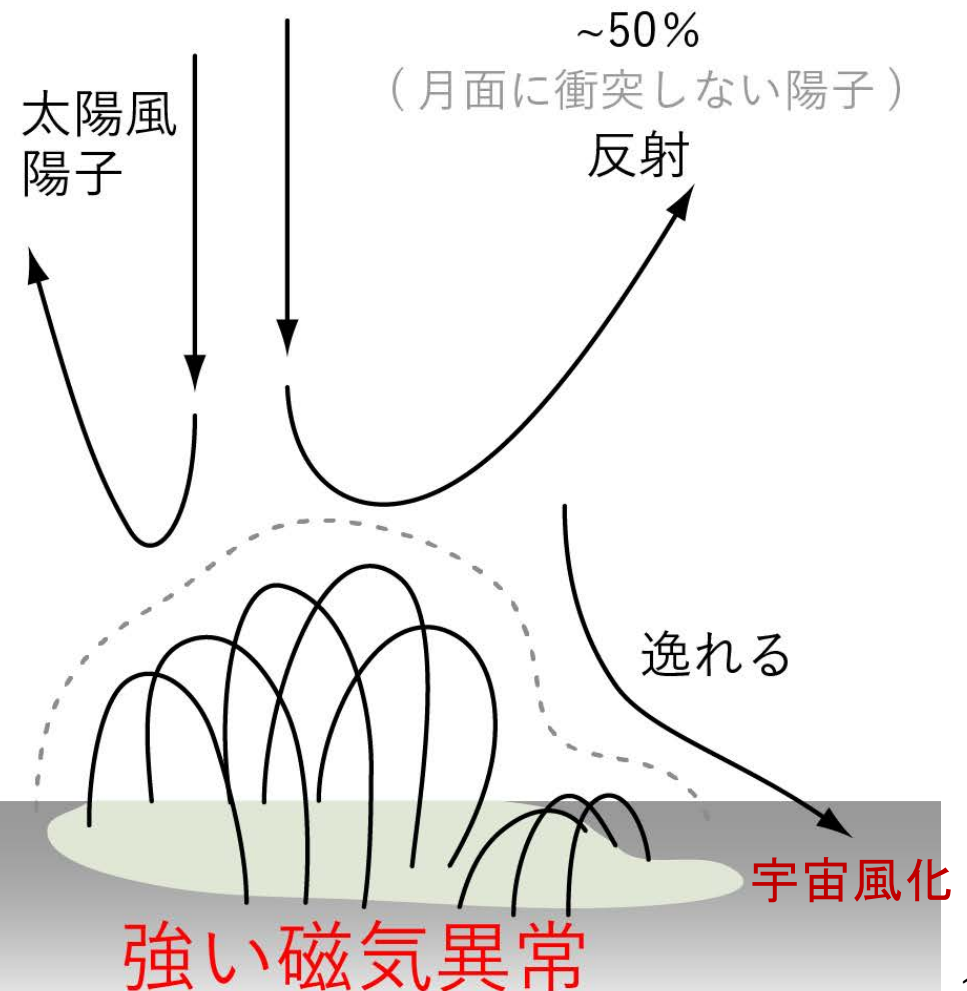
太陽風陽子と月面・磁気異常の相互作用

磁化のない月面



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。



水関連のサイエンス

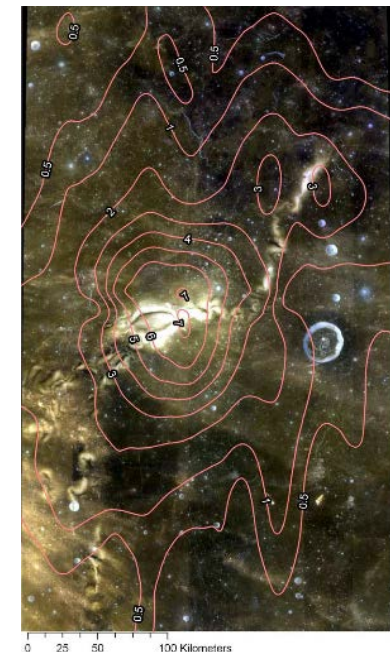
- 太陽風/電離層 H^+ の入射による H_2O (または OH) の生成
 - 月表面の Fe と反応? FeO の $Fe^{(2+)}$ を還元?
- 太陽風 H^+ によるスパッタリングで H_2O が消失?
- 磁気異常の白色領域 (風化していない) では H_2O/OH が少ない?
- SPA (磁場が強い領域) で OH が少ない
- 地球電離圏の O^+ の寄与もある

Nakauchi+2020 Icarus

Wöhler+2017 Science Advances

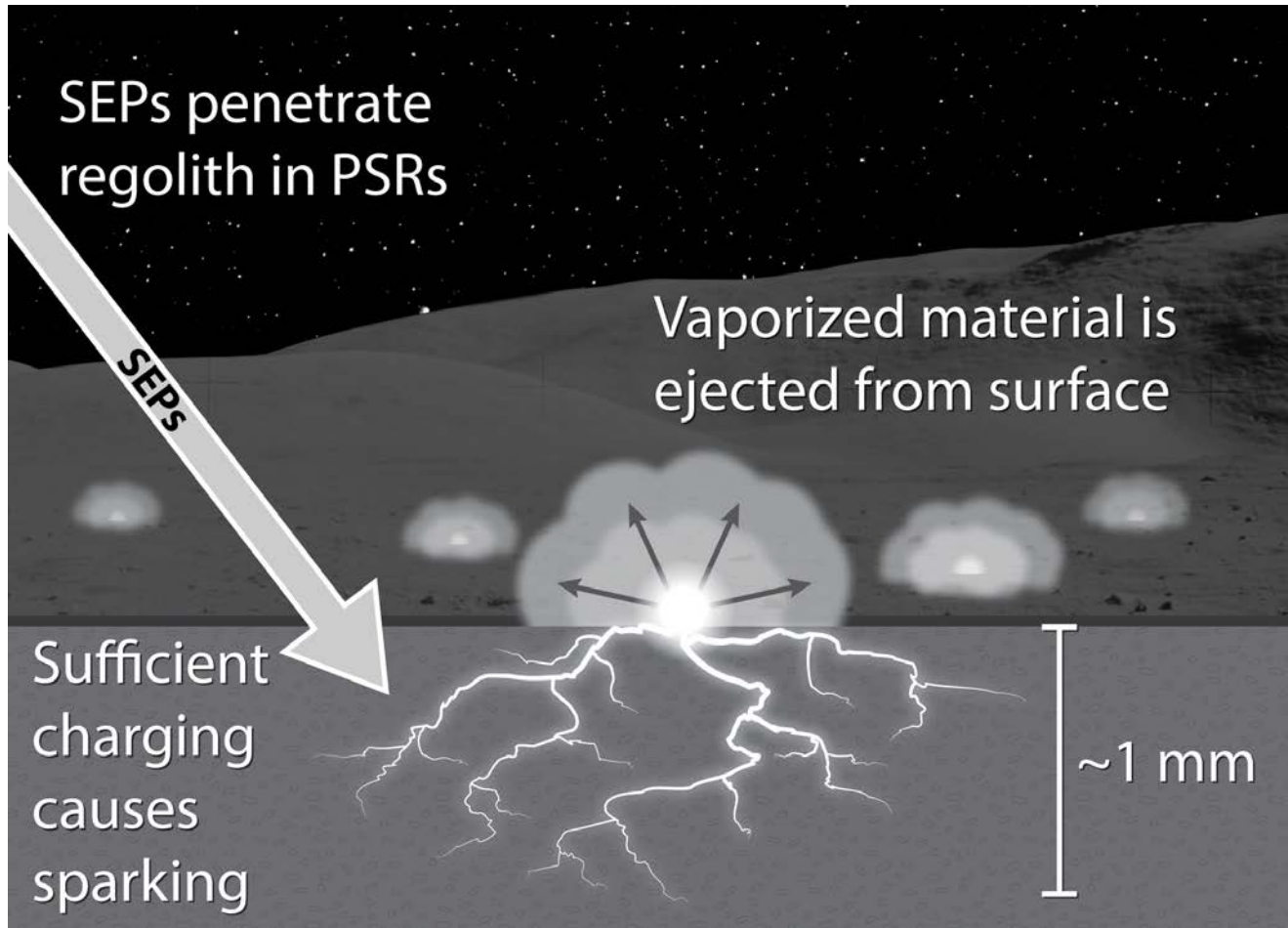
Terada+2017 Nature Astron.

SPA = 南極エイトケン盆地



Blewett+2007 GRL

SEPsと月レゴリス



Solar Energetic Particles
=太陽高エネルギー粒子
(~10 MeV protons)

揮発性物質を効率的に放出
する可能性

Jordan, Stubbs, et al. 2017 Icarus

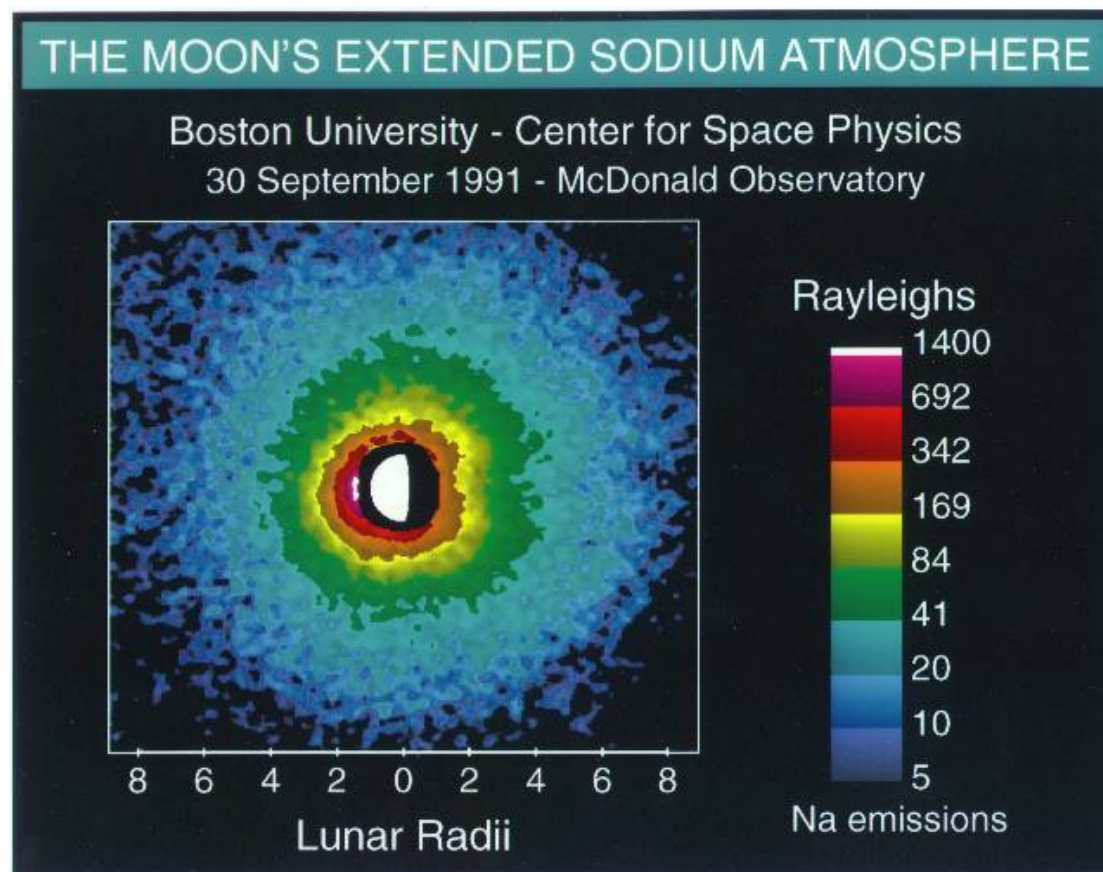
永久影に限らず、SEPが月の帯電環境をどう変化させるか？
宇宙風化にも影響を与える可能性があるだろう。
Gateway暴露部で土壌サンプルを宇宙風化させる実験が有効。

極端イベント時の月面環境

- SEP (太陽高エネルギー粒子、10MeVの陽子)の影響
 - 通常の太陽風の外に、突発的に高エネルギー粒子が来る
 - SEPが永久影の表層(深さ1mm程度)で絶縁破壊を引き起こし、**月面の物質を蒸発させる可能性**
 - SEPによる絶縁破壊で**H₂Oが生成**される可能性あり
 - 人体や構造物に対する影響を評価する必要がある
 - SEE (太陽高エネルギー電子)の影響?
- 将来的に月面環境予報システムの構築を目指す
 - (宇宙天気予報の月面版)
 - 磁化・非磁化領域、日照・日陰領域の環境評価
 - SEP到来時を含め、**各地点の放射線/帯電/ダスト運動を予測**

月の外圏 (Exosphere)

- 希薄な中性大気
 - Na, K 等が主成分と言われてきた
 - 月の表面から放出
- 生成過程の候補
 1. 光脱離
 2. 隕石衝突
 3. 太陽風スパッタリング
 4. 熱脱離(?)



Ground observation (Mendillo+ 1993)
<http://sirius.bu.edu/planetary/moon.html>

LADEE/NMS観測により、希ガス(Ar, He, Ne)が多いことが判明。
Heの2割は月起源(ThとUの放射壊変)。

月面衝突閃光 Lunar Impact Flash (LIF)

阿部新助氏(日大)

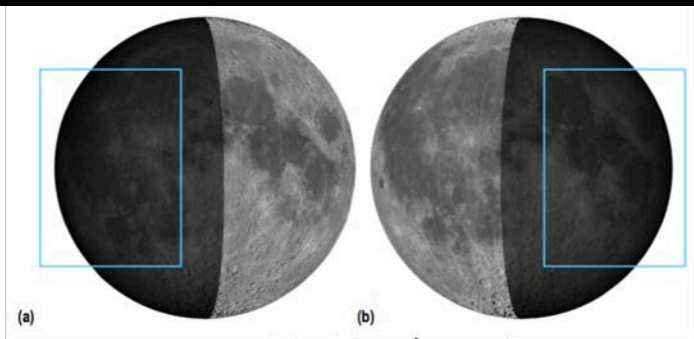
月面衝突閃光(LIF)とは？ 彗星・小惑星起源のメテオロイド(流星体)が月面に超高速衝突する際に生じる短時間の閃光現象のこと. 1999年の「しし座流星群」に伴うLIFが初めて観測 (Ortiz, Aceituno & Aceituno 1999).

- 典型的なLIFの継続時間; 1/10秒~1/100秒程度.
- 地上からの可視等級; 5~12等級, 発光波長; 可視光~近赤外(2000~3000Kの黒体放射が支配的)
- 発生頻度; 8 meteoroids/hr (Mass<100g, diameter<5cm) (Liakos+, 2019, Yanagisawa+, 2020)

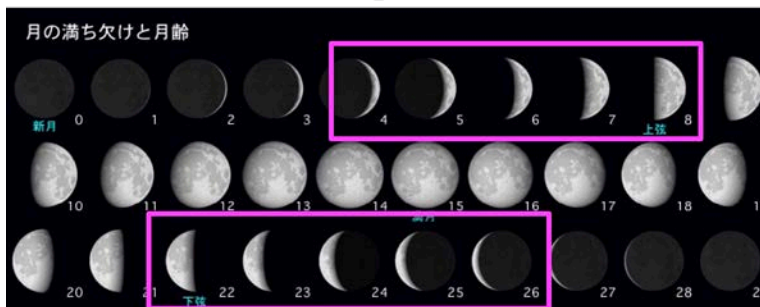
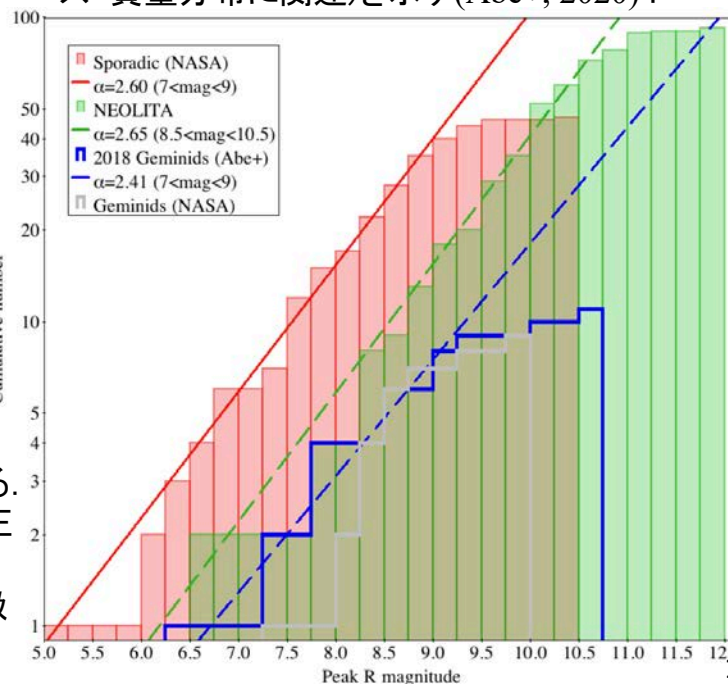
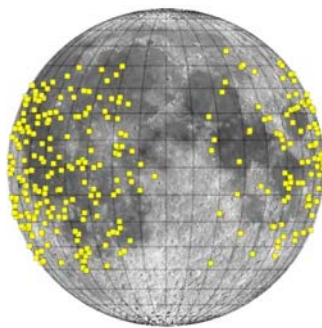
観測史上最も明るいLIF (2013/3/17 by NASA)



- ✓ NASAの月周回衛星LROは, この数年の間に新たに形成された直径50m弱までのクレータ計200数十個を発見. これは, 従来のメテオロイド・衝突モデルより3割以上多い(詳細は不明).
- ✓ NASA(2005年~400イベント以上), ギリシア/ESA・NELIOTA(2015年~100イベント以上), スペインなどが定常観測を実施, 日本国内では, 電通大-日大-JAXA-会津大-台湾で期間限定協定観測を実施. 2018年ふたご座流星群では, 3時間で10イベント以上を記録. 下図は, 地上観測で得た等級分布(サイズ・質量分布に関連)を示す(Abe+, 2020).

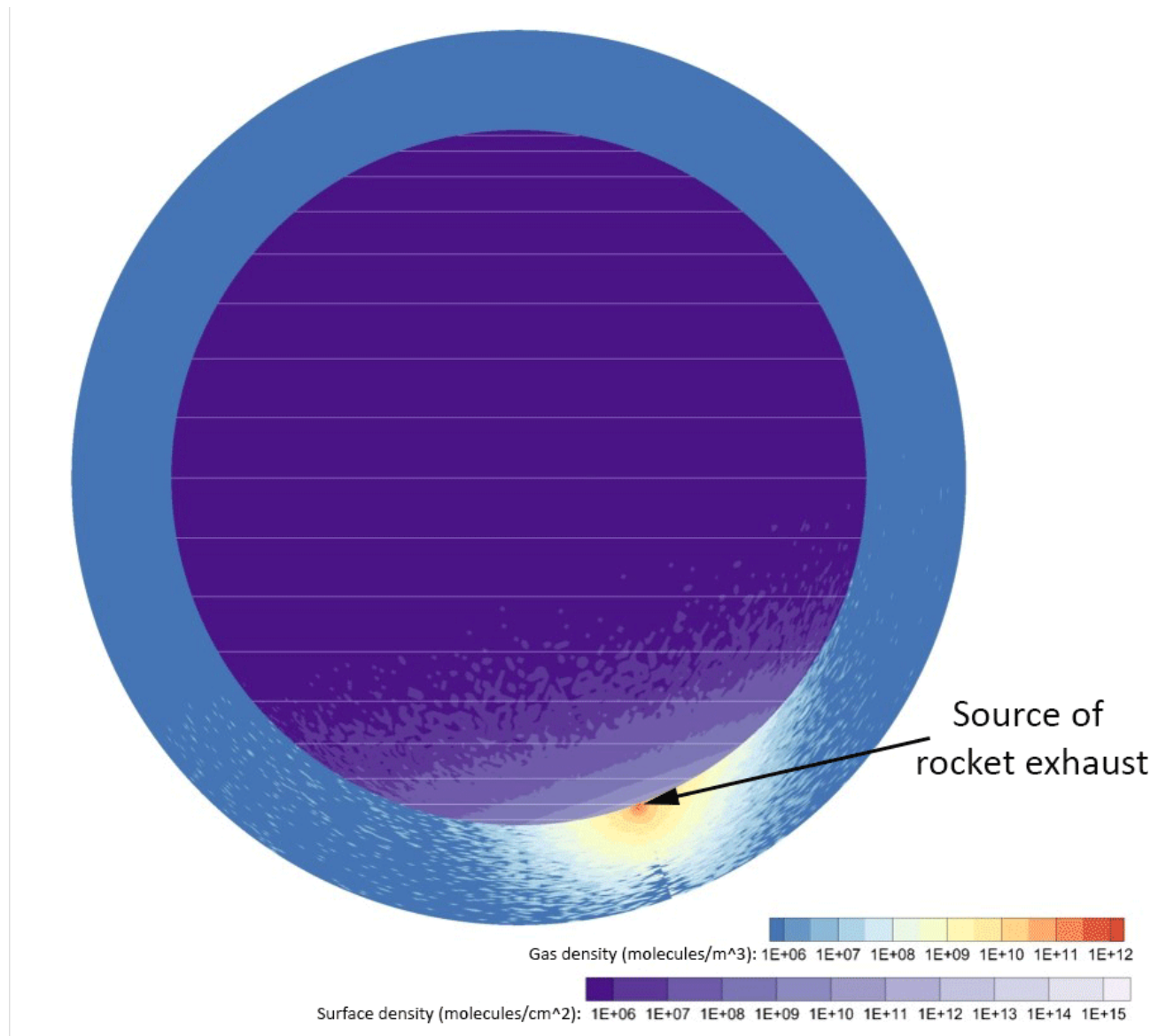


~10 nights / month



地上からは, 月面夜側かつ月齢半月以下(夕方の西空か明け方の東天)で観測可能となる. 昼側からの照り返しで極域と正面は観測困難, また, 地球照の影響で観測可能な限界等級は約12等である.

着陸機の排気が水資源を汚染する？



お伝えしたいこと

- 月の環境とは
 - 宇宙空間に月面が存在することで生じる複雑な相互作用
- 月周回軌道での観測で月環境の何がわかったのか
 - プラズマ環境の一端が解明されたが、、、
- アルテミス時代の月環境学は何をするべきか(案)
 - 帯電、ダスト、H₂O、磁気異常、外圏、、、理工医連携
 - Gateway/HERMESのプラズマ観測

新たに「月環境学」をぜひ一緒に進めていきましょう