

# 地球型惑星衛星に起きている 物質の供給と放出

横田勝一郎(大阪大)  
第22回惑星圏研究会(SPS2021)

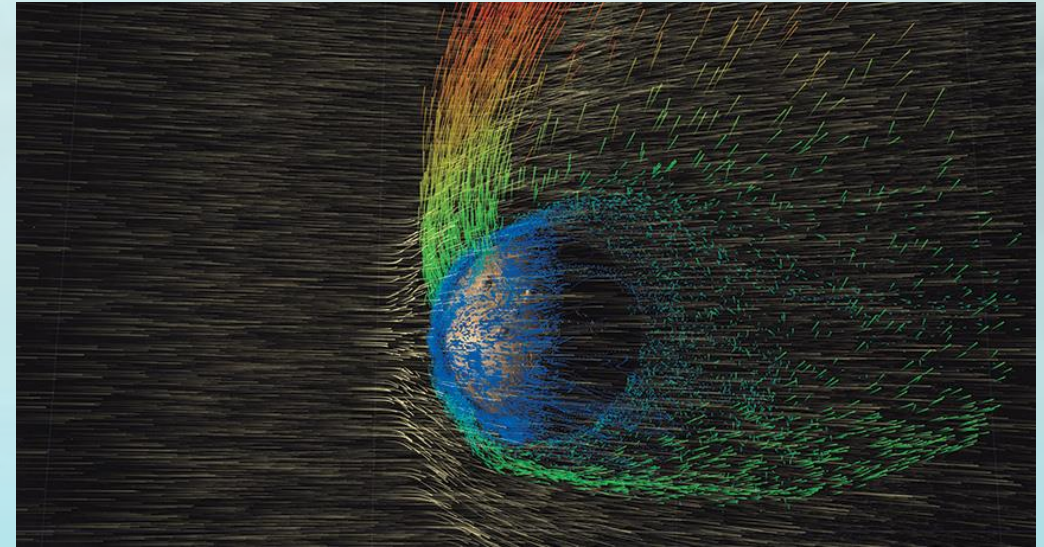
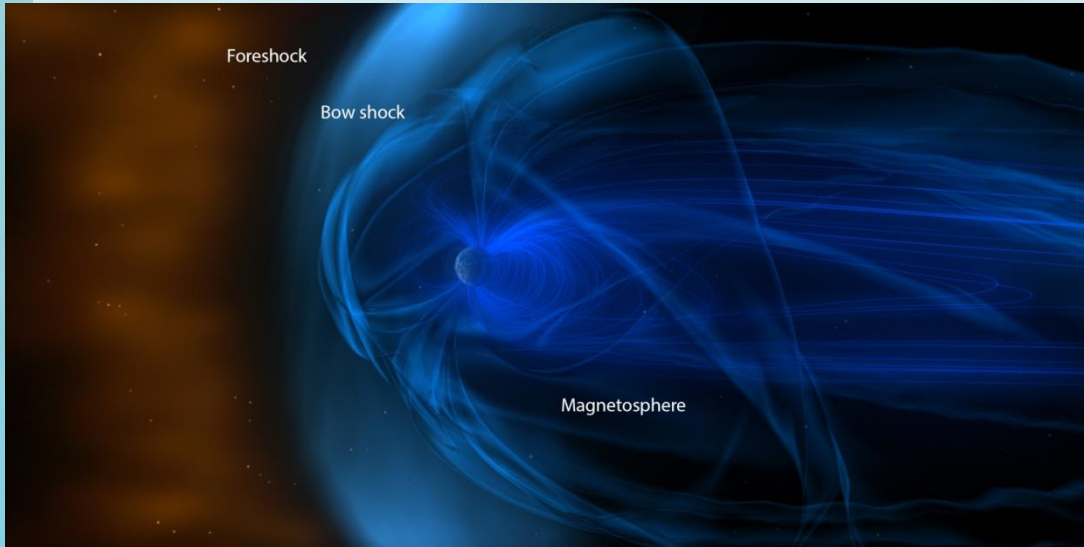
# 要旨

太陽から超音速で噴き出すプラズマ流（太陽風）に曝されている惑星は、大気構成物質を宇宙空間に喪失している。このような大気流出は惑星大気の進化を司る重要な機構の一つであるため、特に地球型惑星において盛んに研究されている。衛星や小惑星など大気を持たない小型天体でも、表層を直接宇宙空間に暴露するため表面物質の放出が起きている。反対に、物質放出を引き起こす太陽風や惑星間空間ダストは自身が吸収されることで、小型天体に対して物質供給も行っている。小型天体表層で起こる物質の輸送（放出と供給）の理解は宇宙空間での表層の進化を解明して起源の情報を引き出す上でやはり重要である。惑星に比較的近い位置にある衛星は惑星から流出する大気を吸収する機会もあるため、惑星・衛星系における物質輸送（放出と供給）は一体で考える必要がある。

地球周回衛星「あらせ」によって、流出物質としてこれまで観測例のある $H^+$ 、 $He^+$ 、 $N^+$ 、 $O^+$ に加えて分子イオン（ $N_2^+$ / $NO^+$ / $O_2^+$ ）が新規に報告された。特に顕著に観測される $O^+$ が実際に月に届いていることも月周回衛星「かぐや」の観測から報告されている。「かぐや」による質量分析データは、揮発性の高いアルカリ粒子だけではなく多岐に亘る金属イオンの放出も観測した。地球・月系において観測的に明らかとなった物質輸送は、大気流失が顕著な火星圏においてより大々的に起きていることが予想される。

惑星・衛星系において物質輸送（放出と吸収及び両者間の移動）は現在、そしてこれまでにどの程度起きているかという問題は、宇宙機搭載の質量分析器によって今後も進められる。MMX計画では、火星圏でのイオン質量分析を予定している。

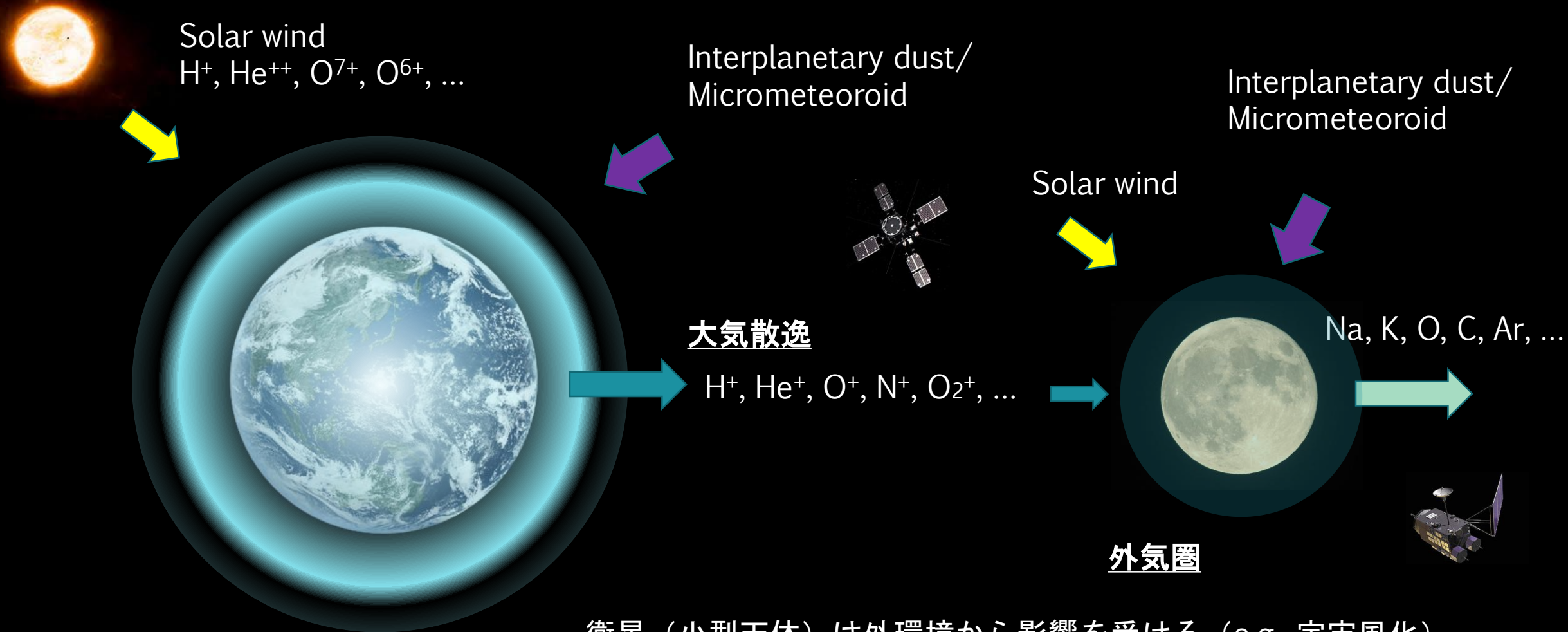
# 地球型惑星・衛星系での物質の放出と供給



- 地球型惑星（地球、火星、金星、水星）
  - 固有磁場、大気により天体表面は保護される
  - 大気（の一部）は上空から流出する。
- 小型天体（月、小惑星）
  - 天体表面が直接外部環境（太陽風、UV、ダスト）に晒される
  - 表面構成物質が流出する→外気圏を形成
  - 外部起源物質の吸着、風化



# 地球型惑星・衛星系での物質の放出と供給



衛星（小型天体）は外環境から影響を受ける（e.g. 宇宙風化）  
物質の輸送に着目する

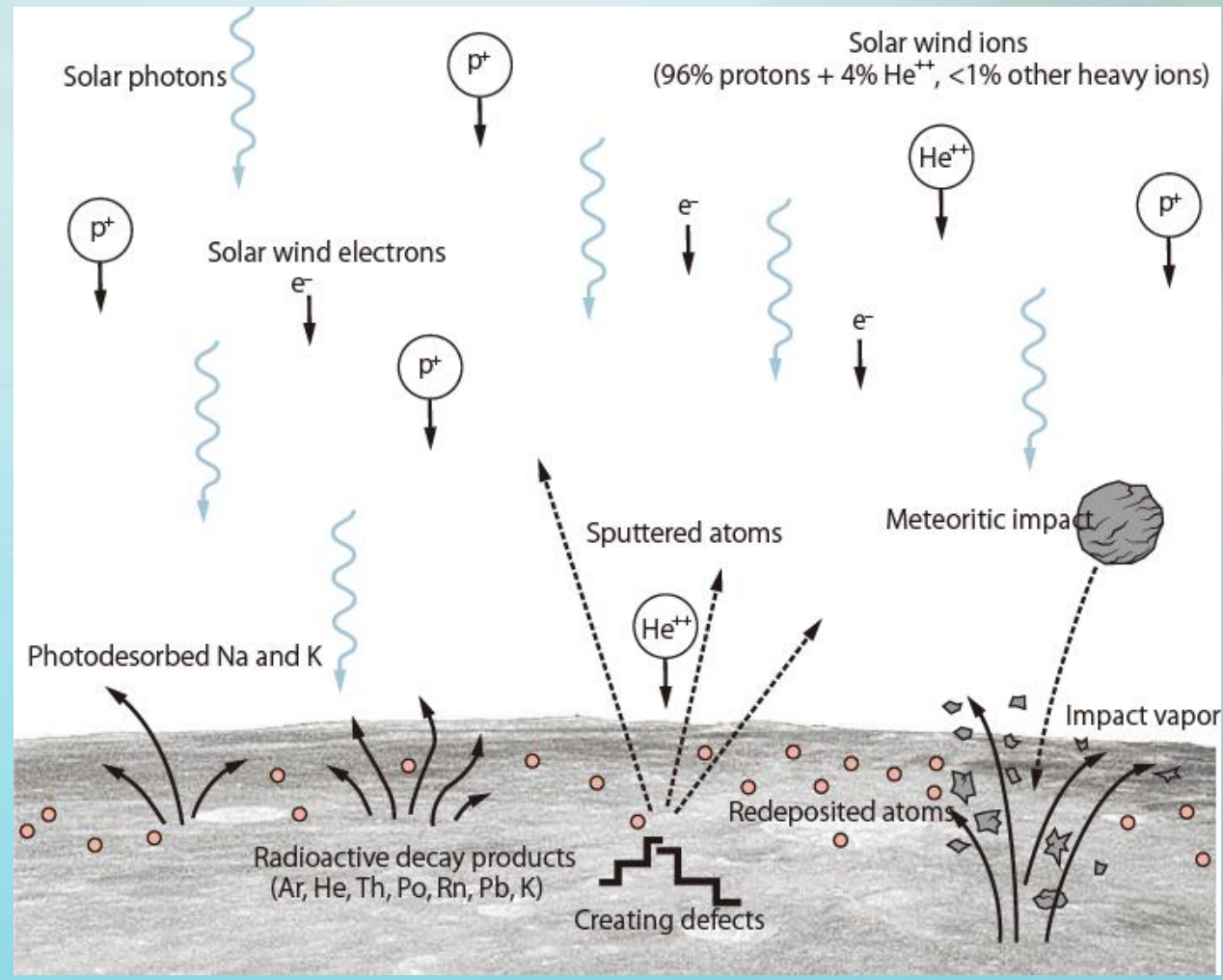
# 衛星（小型天体）表面での物質放出と供給

## 供給

- 太陽風( $H^+$ ,  $He^{++}$ ,  $O^{7+}$ ,  $O^{6+}$ , ...)  $10^8$  ions/cm<sup>2</sup> s
- 惑星からの散逸大気
  - 地球( $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $O_2^+$ , ...)  $10^4$  ions/cm<sup>2</sup> s
  - 火星( $H^+$ ,  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $CO_2^+$ , ...)  $10^4-7$  ions/cm<sup>2</sup> s
- IPD/Micrometeoroid  $10^{-16}$  g/cm<sup>2</sup> s

## 放出・外気圏(Exosphere)の形成

- 太陽紫外線による励起放出
- IPD/Micrometeoroid衝突
- 太陽風スパッタリング
- 熱脱離



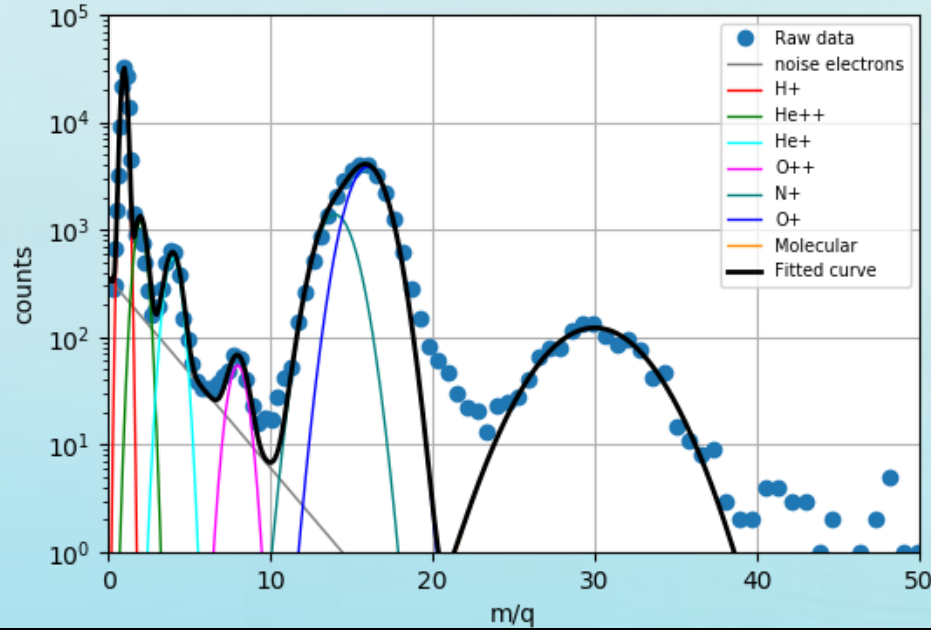
表層物質の改変

⇔外部環境情報（母惑星の大気）の保存

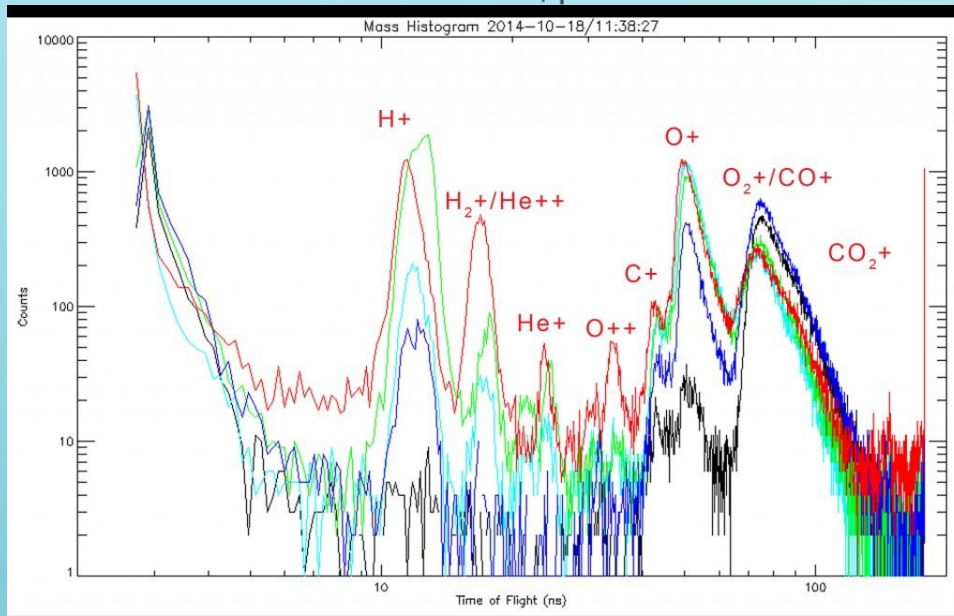
Duke & Hurley, 2016

# 地球型惑星の散逸大気

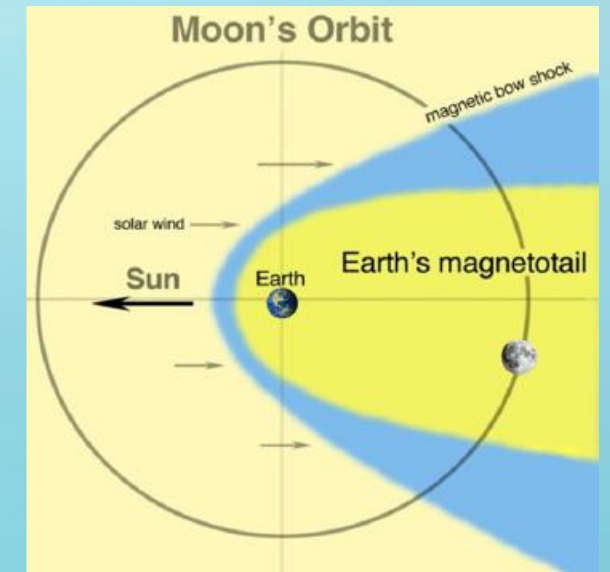
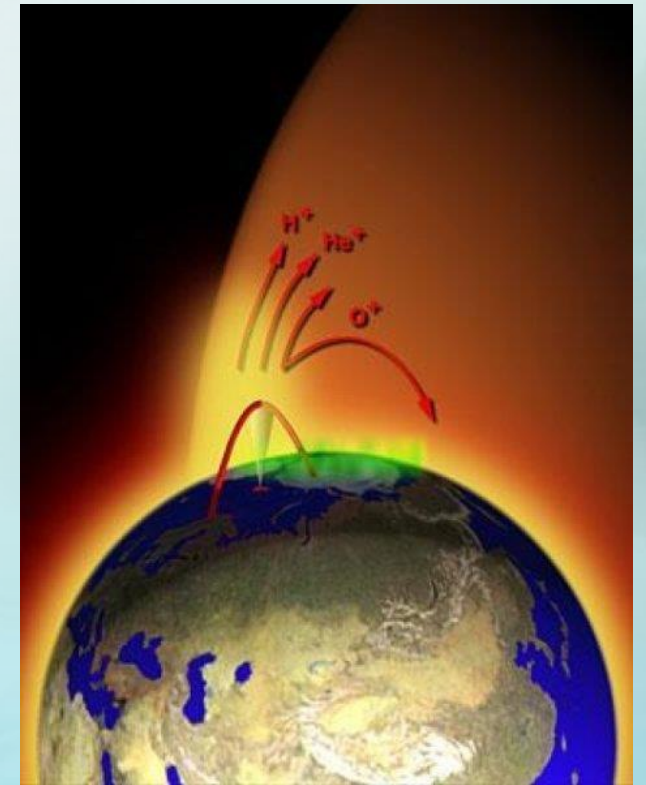
• 地球



• 火星



Arase MEPI



MAVEN STATIC Instrument



# 地球型惑星の散逸大気

## • 地球→月

### – 酸素(月岩石中の同位体異常)

- 16O-rich成分: 太陽風起源 Hashizume&Chaussidon 2005, Ireland+2006
- 16O-poor成分: 地球(オゾン層)起源: KAGUYA/IMA Terada+2017

### – 窒素

- 地球磁気圏形成前に大量の窒素が流出 Ozima+2005, 2008

### – 水

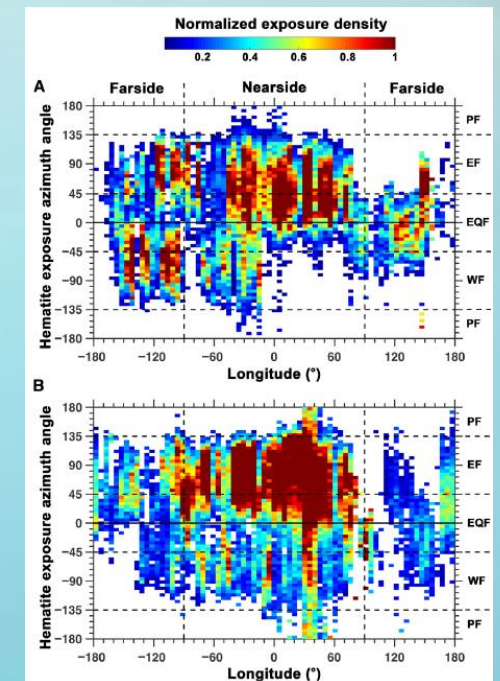
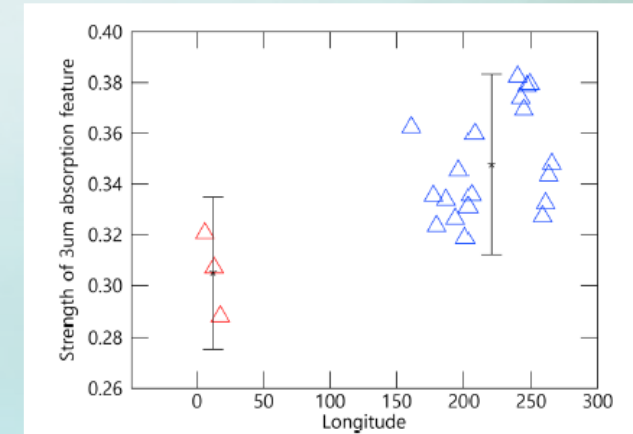
- 地球の水の起源を示す?
- Hは太陽風起源(Farサイドで吸収特性が大) Chandrayaan-1/M3 Cho+2018
- Hは地球起源もある(高緯度地域でも吸収特性が大) Chandrayaan-1/M3 Wang+2021

### – 酸素

- Hematite( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) のOは地球起源(Nearサイド、高緯度に分布) Chandrayaan-1/M3 Li+2020

## • 火星→フォボス

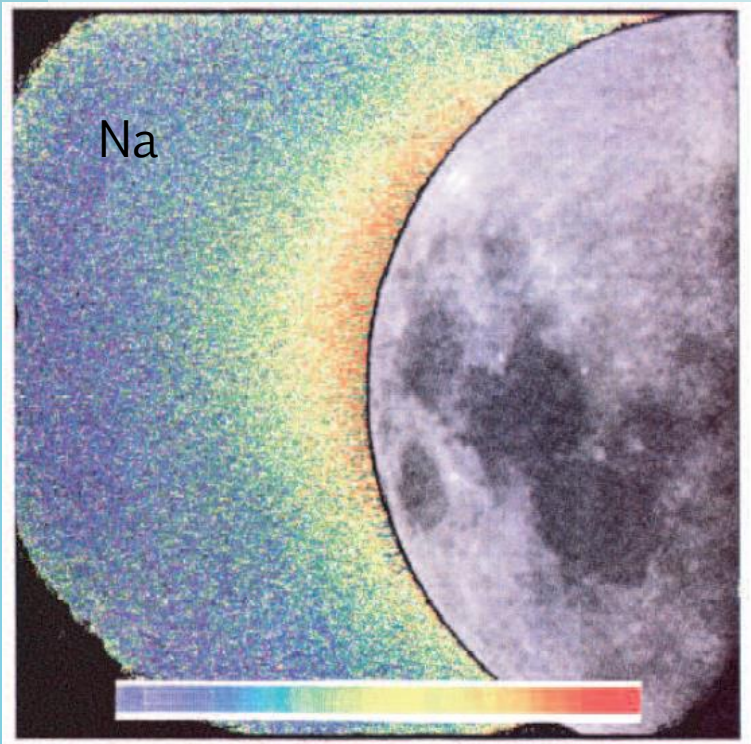
- 散逸大気の到来(Nearサイド) Nenon+2019, 2021



衛星(表層)は太陽風や母惑星大気を保存している

# 衛星からの物質放出

- 外気圏 Exosphere の形成 →



Potter&Morgan1998

Species	Surface Density or tangent column density:	Sensed by:	Reported by:
<sup>40</sup> Ar	$8 \times 10^4/\text{cm}^3$	LADEE NMS	Benna et al., 2015
He	$3 \times 10^4/\text{cm}^3$	LADEE NMS	Benna et al., 2015
Ne	$3 \times 10^4/\text{cm}^3$	LADEE NMS	Benna et al., 2015
Energetic H	~20% of incident SW flux	IBEX, Chandrayaan-1 SARA	McComas et al., 2009; Futaana et al., 2012
H <sub>2</sub>	10-50% of incident SW flux	LRO/LAMP	Stern et al., 2013; Hurley et al., 2017
CH <sub>4</sub>	$450/\text{cm}^3$	LADEE NMS	Hodges, 2016
Na	$5 \times 10^9/\text{cm}^2$ column	LADEE UVS	Colaprete et al., 2016b
K	$4 \times 10^8/\text{cm}^2$ column	LADEE UVS	Colaprete et al., 2016b
Ti	TBD*	LADEE UVS	Colaprete et al 2016a
Fe	TBD*	LADEE UVS/meteor streams	Colaprete et al 2015
Al	TBD	LADEE UVS	Colaprete et al 2015
Ca	TBD*	LADEE UVS/meteor streams	Colaprete et al 2015
Mg	TBD	LADEE UVS	Colaprete et al 2016a
O	TBD*	LADEE UVS/meteor streams	Colaprete et al 2015
OH	TBD*	LADEE UVS/meteor streams	Colaprete et al 2015
H <sub>2</sub> O	$> 100/\text{cm}^3$	LADEE NMS/meteor streams	Benna et al 2015b

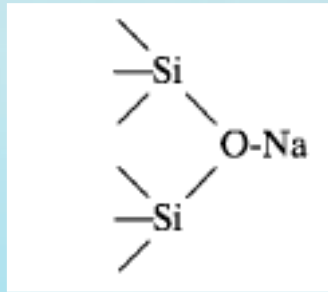
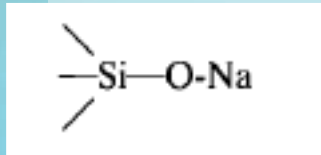
放出される月物質から月の情報が得られるか？

放出物質は表面の組成を反映しているのか？

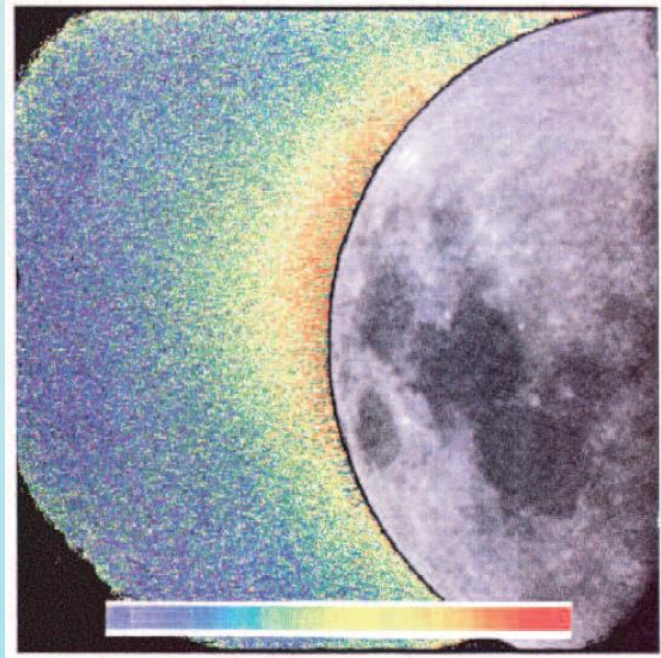


# 衛星からの物質放出

アルカリ外気圏 Na, K



格子欠陥の先に付着したアルカリ粒子を放出  
Madedy+1998



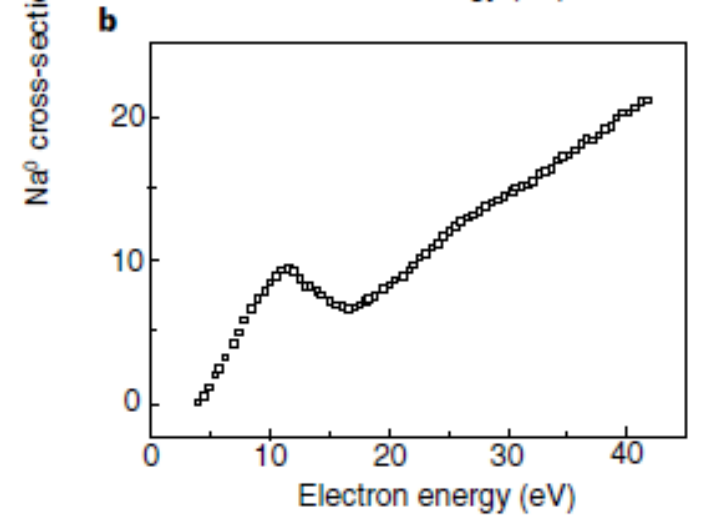
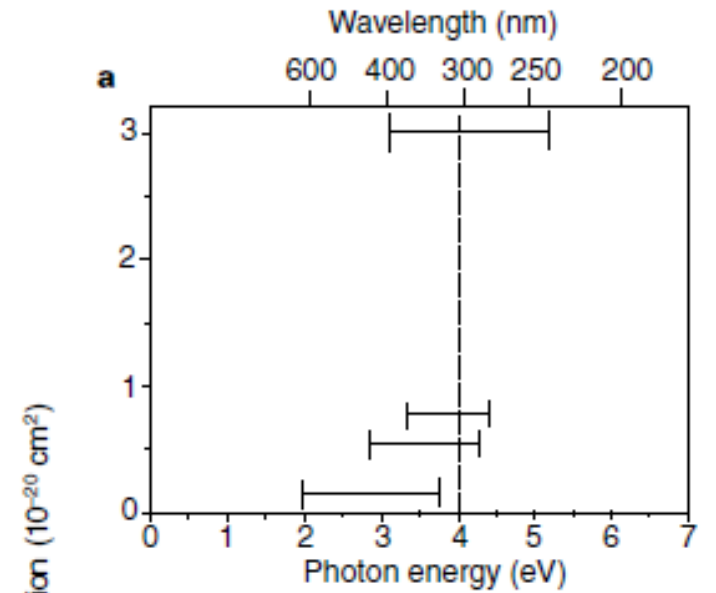
Potter&Morgan1998

アルカリ粒子の放出は太陽光UVによる励起脱離が支配的

Yakshinskiy+1999

月表面物質そのものではなく表面付着物

(朝から夕にかけて放出量は50%減るが翌朝までに復帰 Yokota+2014 )



供給源がある？

# 衛星からの物質放出

太陽風  $C^{5+}$ ,  $C^{6+}$

$He^{++}$   $3.4 \times 10^5$  ions/cm<sup>2</sup> s

$He/O$  &  $C/O = 83.2$  &  $0.672$  Reisenfeld+2013

$2.7 \times 10^4$  atoms/cm<sup>2</sup> s

Micrometeoroid  $10^{-16}$  g/cm<sup>2</sup> s

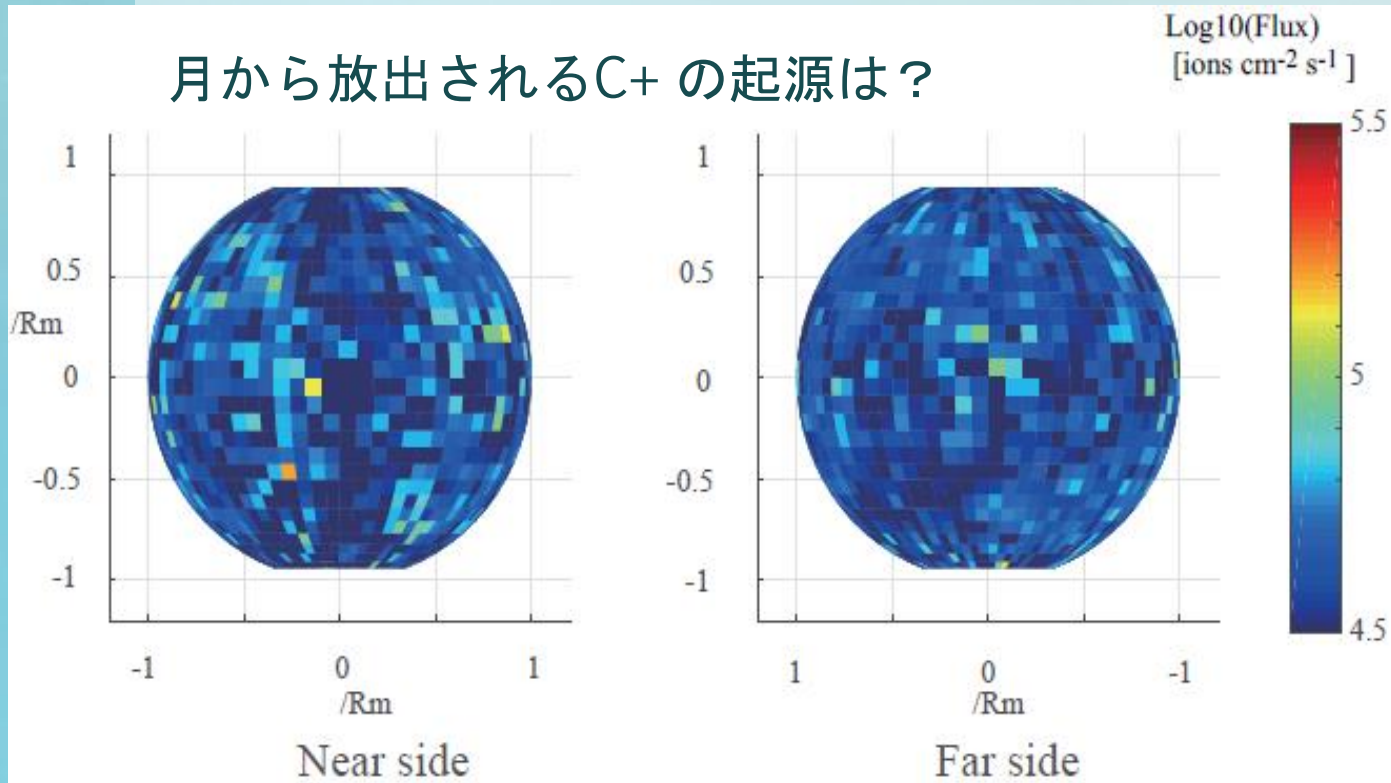
Meteorite flux to the Earth Cremonese+2013

Zolensky+2006

普通コンドライト80%,  
炭素質コンドライト4.2%

$1.5 \times 10^4$  atoms/cm<sup>2</sup> s

月から放出される $C^+$ の起源は？



KAGUYA/IMA  
Yokota+2020

磁気異常と反相関

海( $5.1e4 \pm 5.4\%$  ions cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) > 高地( $4.5e4 \pm 2.4\%$  ions cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

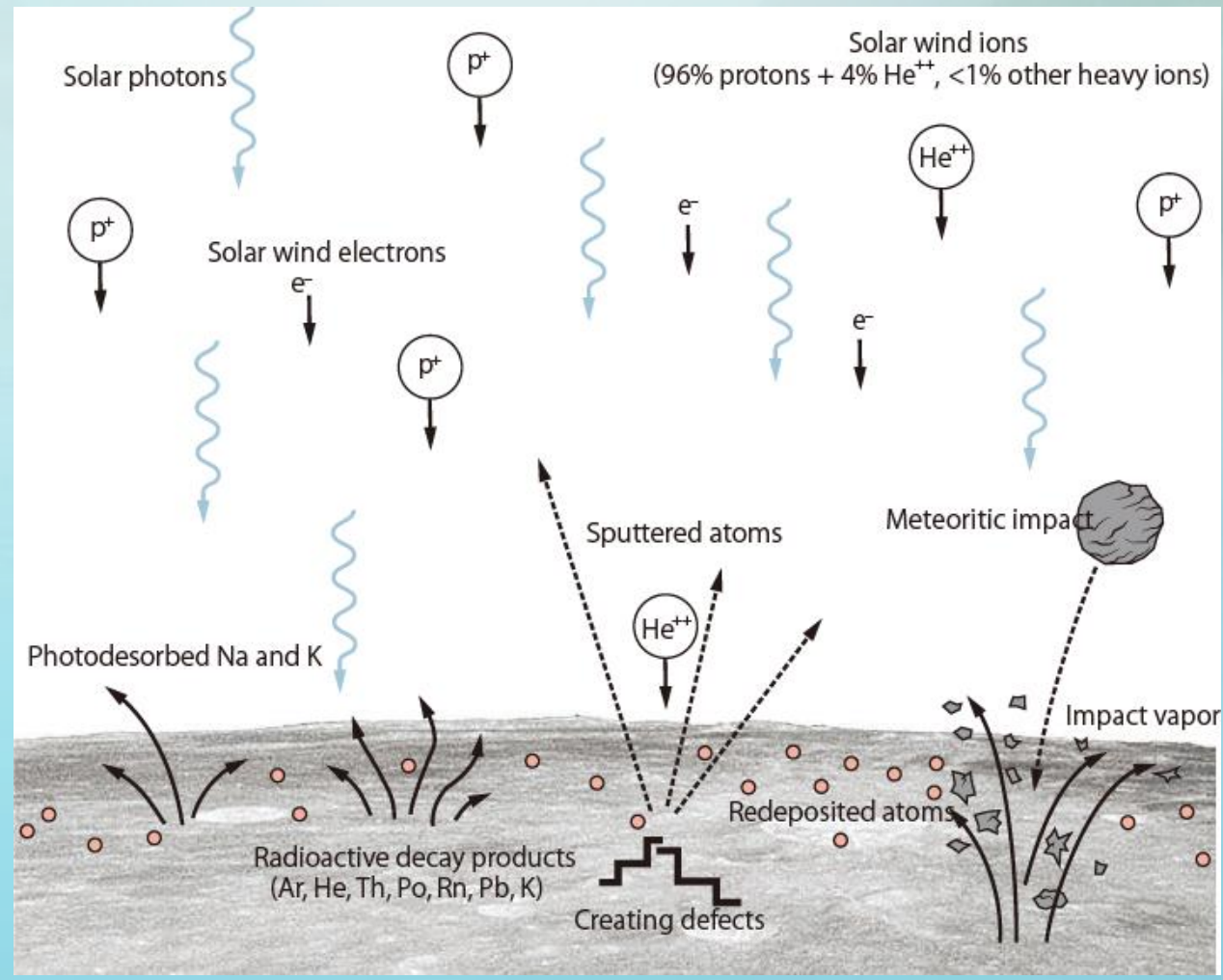
# 衛星（小型天体）表面での物質放出と供給

## 供給

- 太陽風(H<sup>+</sup>, He<sup>++</sup>, O<sup>7+</sup>, O<sup>6+</sup>, ...) 10<sup>8</sup> ions/cm<sup>2</sup> s
- 惑星からの散逸大気
  - 地球(H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, ...) 10<sup>4</sup> ions/cm<sup>2</sup> s
  - 火星(H<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, ...) 10<sup>4-7</sup> ions/cm<sup>2</sup> s
- IPD/Micrometeoroid 10<sup>-16</sup> g/cm<sup>2</sup> s

C 1.5 x 10<sup>4</sup> atoms/cm<sup>2</sup> s  
 Na ~5 x 10<sup>22</sup> atoms/s Bruno+2007

月Na外気圏のうち宇宙空間への消失量  
 5.3x10<sup>22</sup> atoms/s Tenishev+2013



Duke & Hurley, 2016

小型天体のアルカリ外気圏の起源はIPD/Micrometeoroid ?<sub>11</sub>



# 衛星からの物質放出 まとめ

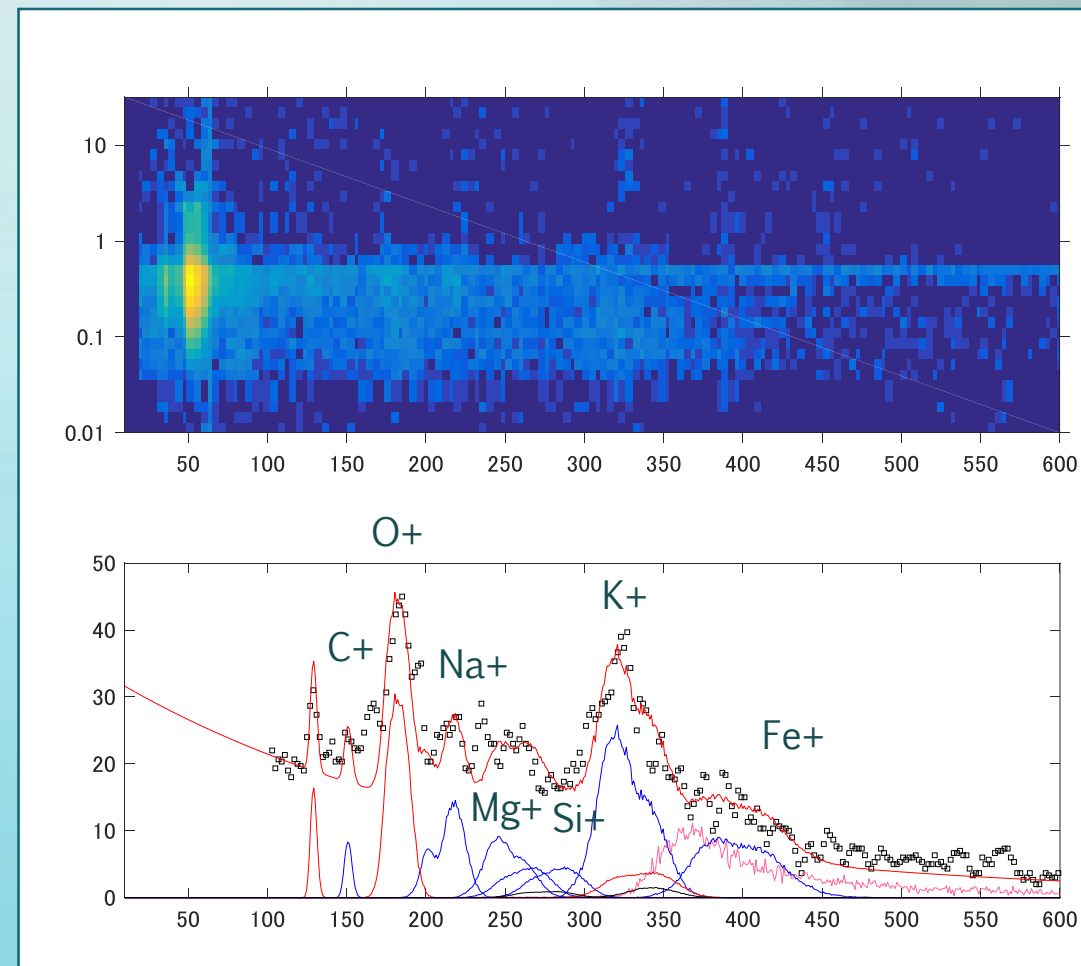
- 揮発性物質: Na, K, C
  - 月起源物質の保証は小さい
  - 表面組成の反映は小さい
  - 外部起源物質の寄与を考慮する必要がある

- 貴ガス: He, Ne, Ar
  - 内部からの湧き出し, Th/U放射壊変, 太陽風

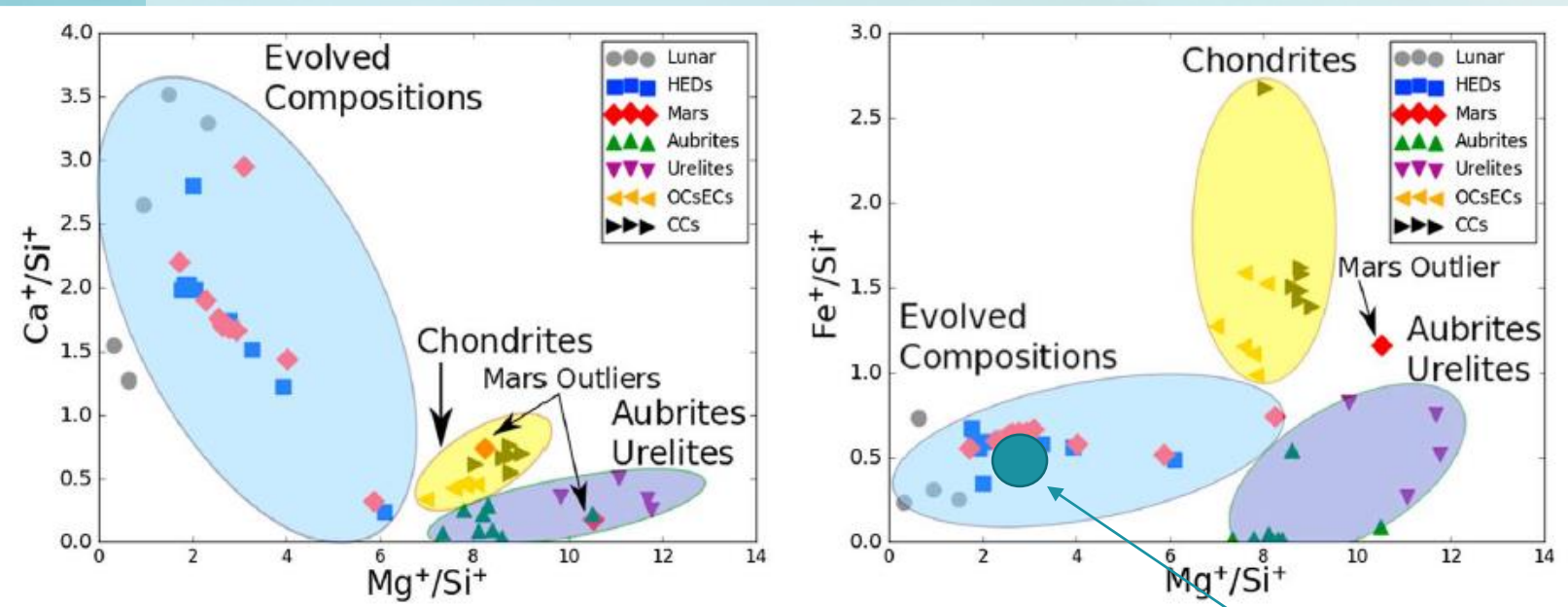
LADEE/NMS Benna+2015

- 難揮発性物質: Ca, Mg, Fe, Si
  - 表面組成の情報が得られる?

KAGUYA-IMA



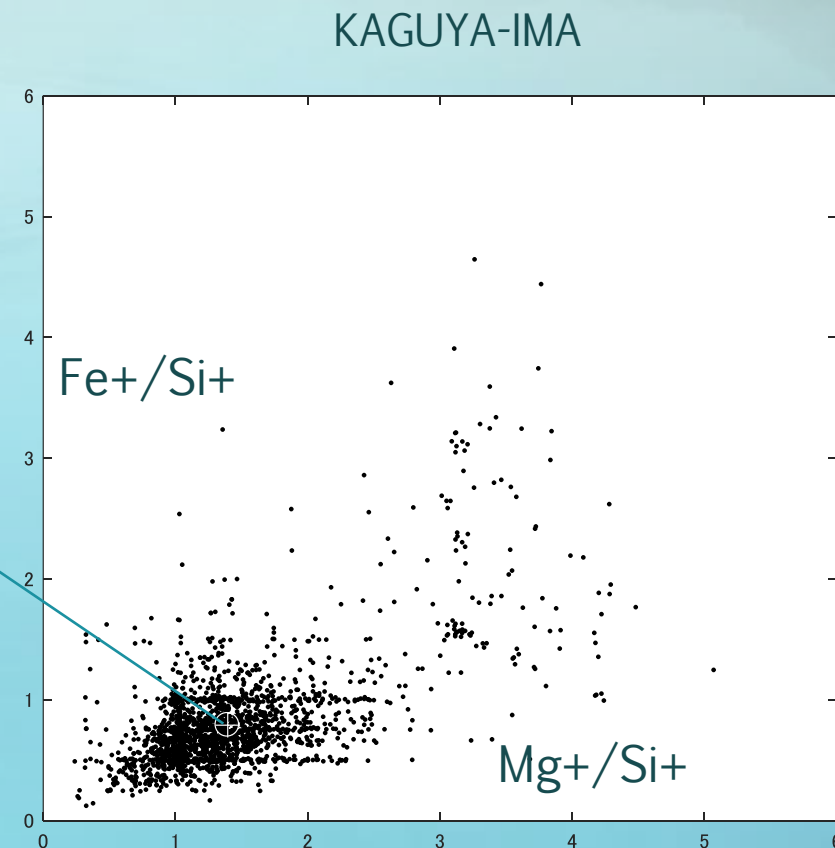
# 衛星からの物質放出



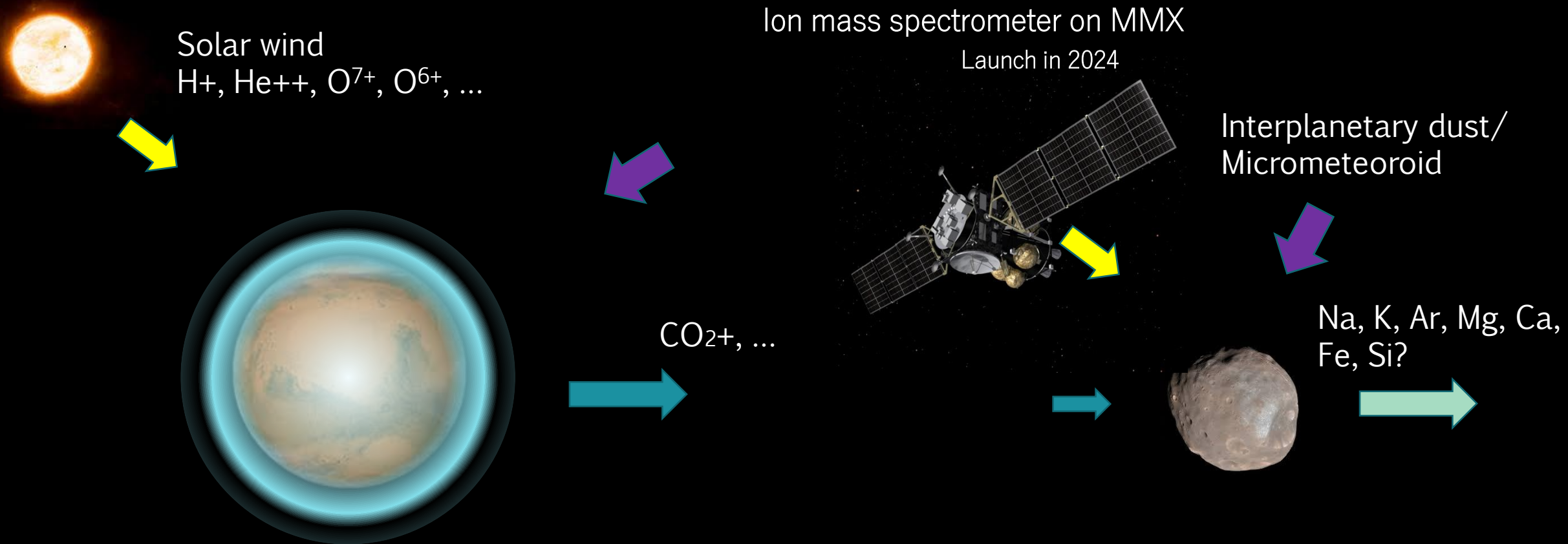
Schaible et al., 2017

- 難揮発性物質: Ca, Mg, Fe, Si
  - 表面組成の情報が得られる

放出されるイオンの観測から「天体が始原的か？」の判別ができる



# 地球型惑星・衛星系での物質の放出と供給



MMXイオン質量分析器により、フォボスからの放出イオンや火星大気から散逸するイオンを観測し、フォボスの起源や火星大気散逸の情報を得る。