

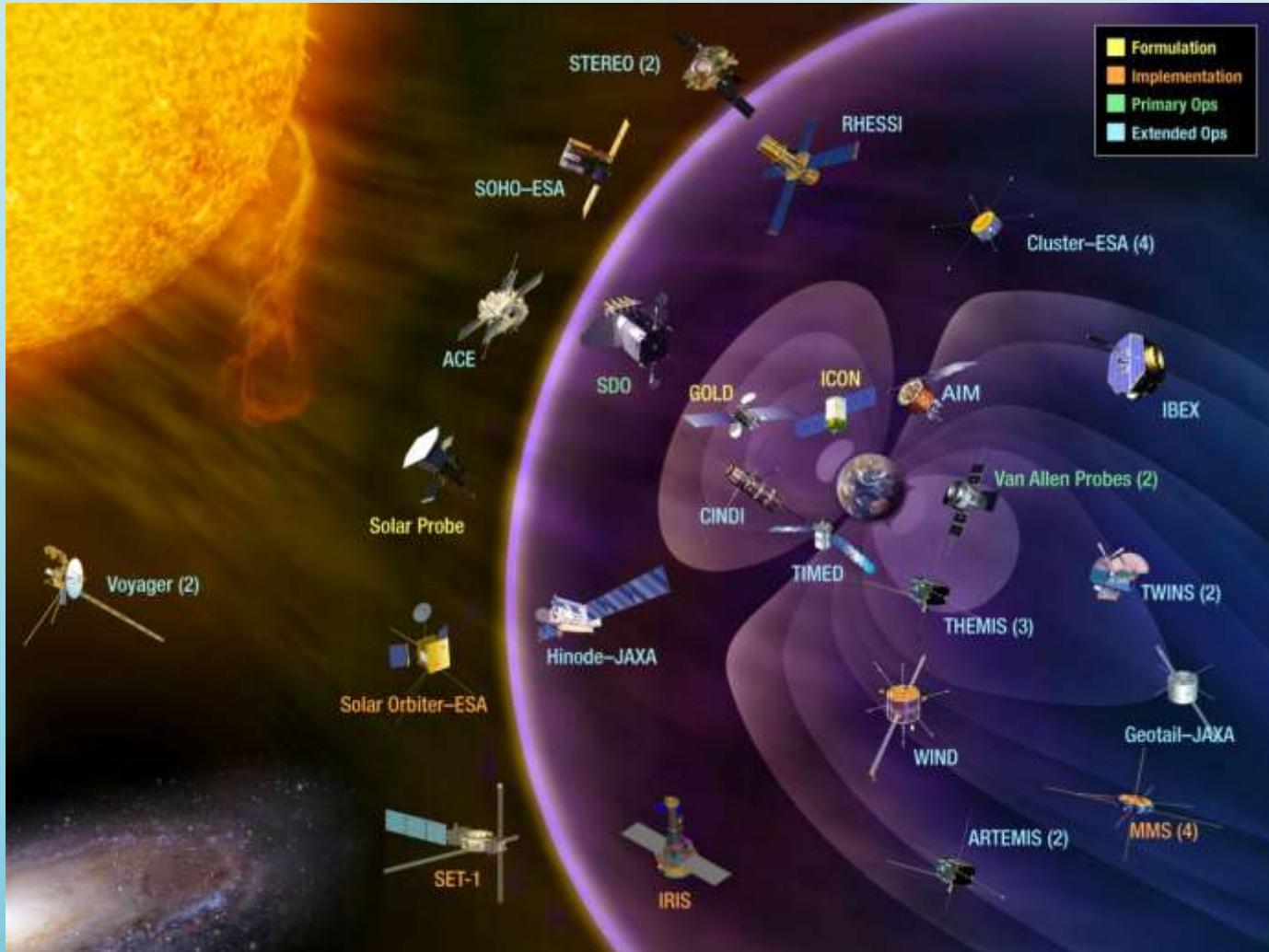


月周回及び月面での質量分析

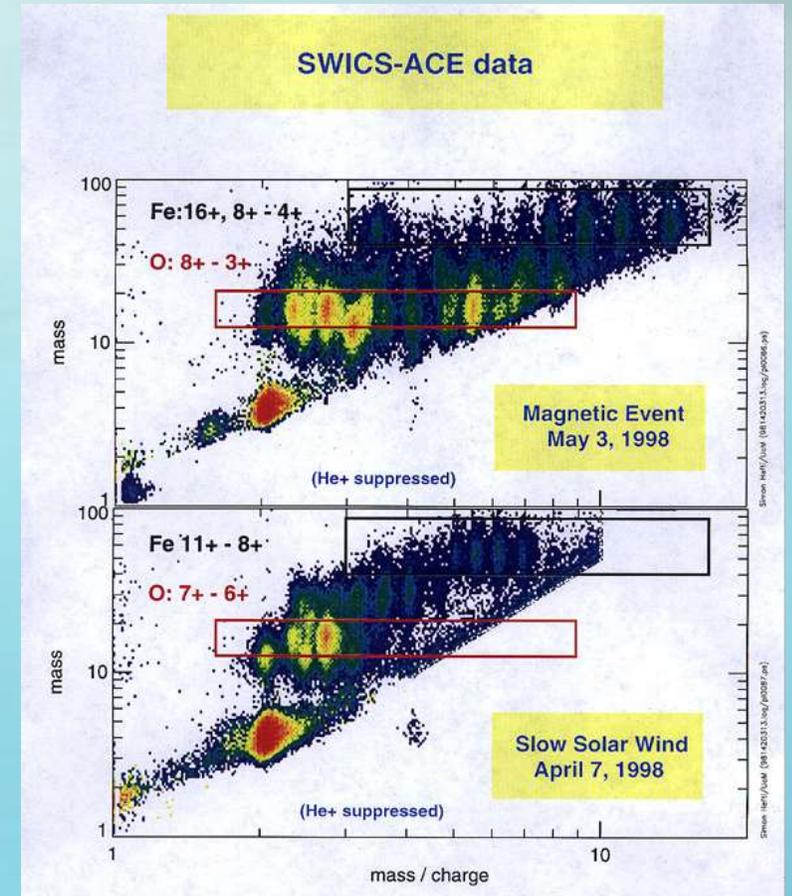
1. KAGUYA観測
2. 将来着陸探査

横田勝一郎(大阪大)
衛星系研究会2020.02.20

宇宙環境(惑星間空間)の観測的研究



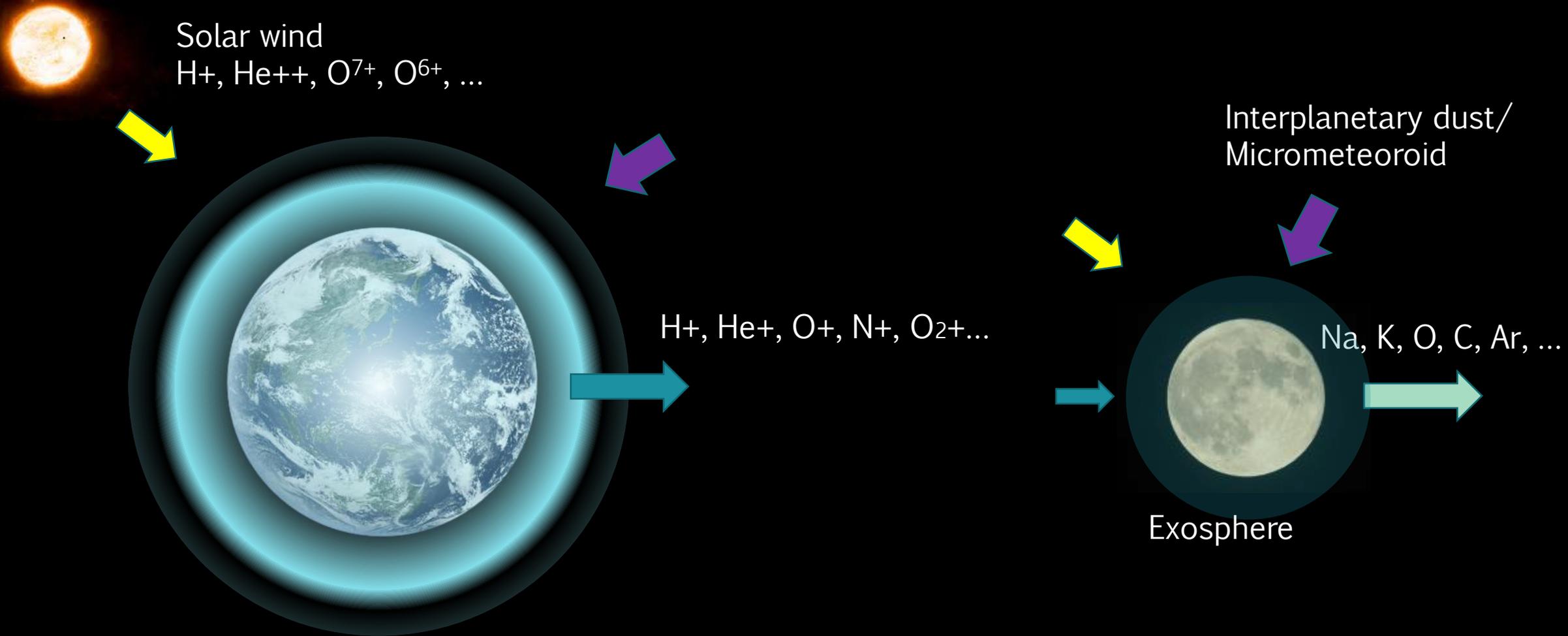
The solar wind includes:
 H^+ , He^{++} , O^{7+} , O^{6+} , ...



Spaceborne particle experiments (mass spectrometer)

Mission	Instruments	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年
SELENE(KAGUYA)	PACE	[Blue bar from 2000 to 2005]						
BepiColombo-MMO(MIO)	MIA, MEA, MSA	[Blue bar from 2000 to 2015]					[Orange bar from 2025 to 2030]	
MMS	FPI-DIS x16	[Blue bar from 2000 to 2010]			[Orange bar from 2015 to 2016]	[Orange bar from 2016 to 2017]		
ERG(ARASE)	MEPe&i				[Blue bar from 2015 to 2016]	[Orange bar from 2016 to 2017]	[Orange bar from 2017 to 2018]	
MMX	MSA				[Blue bar from 2015 to 2020]		[Orange bar from 2025 to 2030]	
月極域探査	Mass				[Light blue bar from 2015 to 2025]		[Light pink bar from 2025 to 2026]	
OKEANOS	HRMS				[Light blue bar from 2015 to 2022]			

地球型惑星・衛星系での物質の放出と供給



地球型惑星・衛星系での物質の放出と供給

• 月への物質供給

- 太陽風(H^+ , He^{++} , O^{7+} , O^{6+} , ...)
- Interplanetary dust/Micrometeoroid
- 地球からの散逸大気(H^+ , He^+ , O^+ , N^+ , O_2^+)
Terada+2017, Yokota+2017, Seki+2019

• 月からの物質放出

- 外気圏 Exosphere →
- Pickup ions

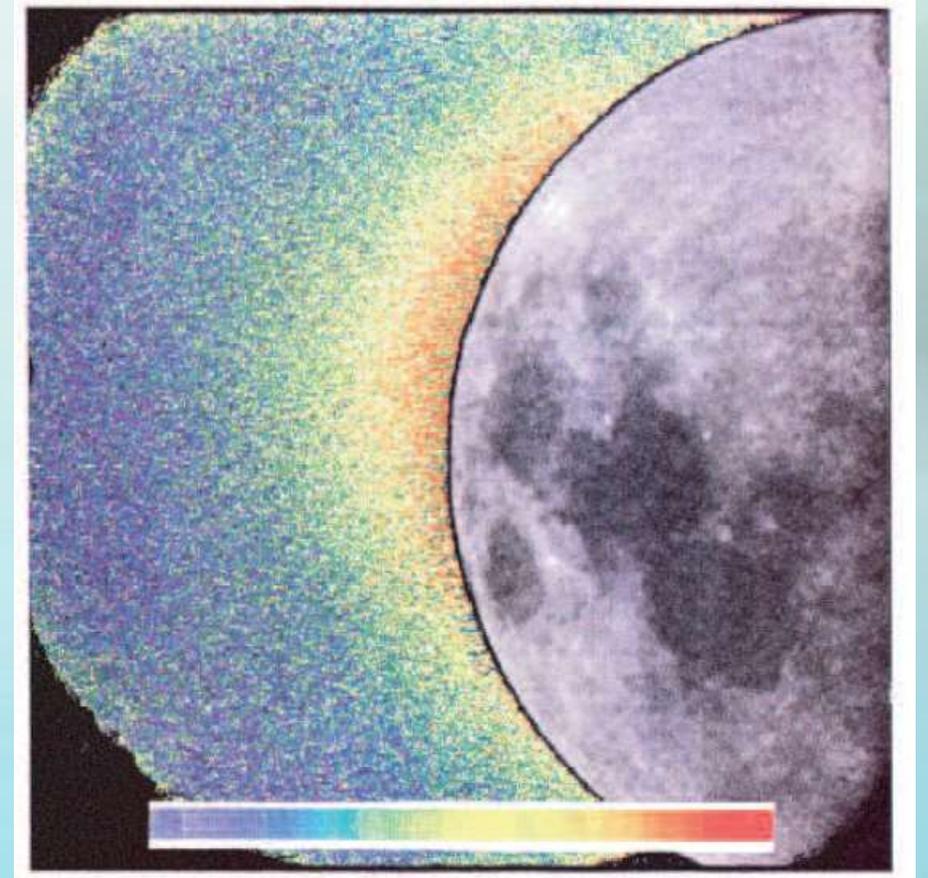
Species	Surface Density or tangent column density:	Sensed by:	Reported by:
^{40}Ar	$8 \times 10^4/cm^3$	LADEE NMS	Benna et al., 2015
He	$3 \times 10^4/cm^3$	LADEE NMS	Benna et al., 2015
Ne	$3 \times 10^4/cm^3$	LADEE NMS	Benna et al., 2015
Energetic H	~20% of incident SW flux	IBEX, Chandrayaan-1 SARA	McComas et al., 2009; Futaana et al., 2012
H_2	10-50% of incident SW flux	LRO/LAMP	Stern et al., 2013; Hurley et al., 2017
CH_4	$450/cm^3$	LADEE NMS	Hodges, 2016
Na	$5 \times 10^9/cm^2$ column	LADEE UVS	Colaprete et al., 2016b
K	$4 \times 10^8/cm^2$ 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_2O	$> 100/cm^3$	LADEE NMS/meteor streams	Benna et al 2015b

月からの物質放出

- 希薄な中性大気
 - Na, K アルカリ大気の地上観測
 - He, Ne, Ar 貴ガスの観測(LADEE)

生成機構

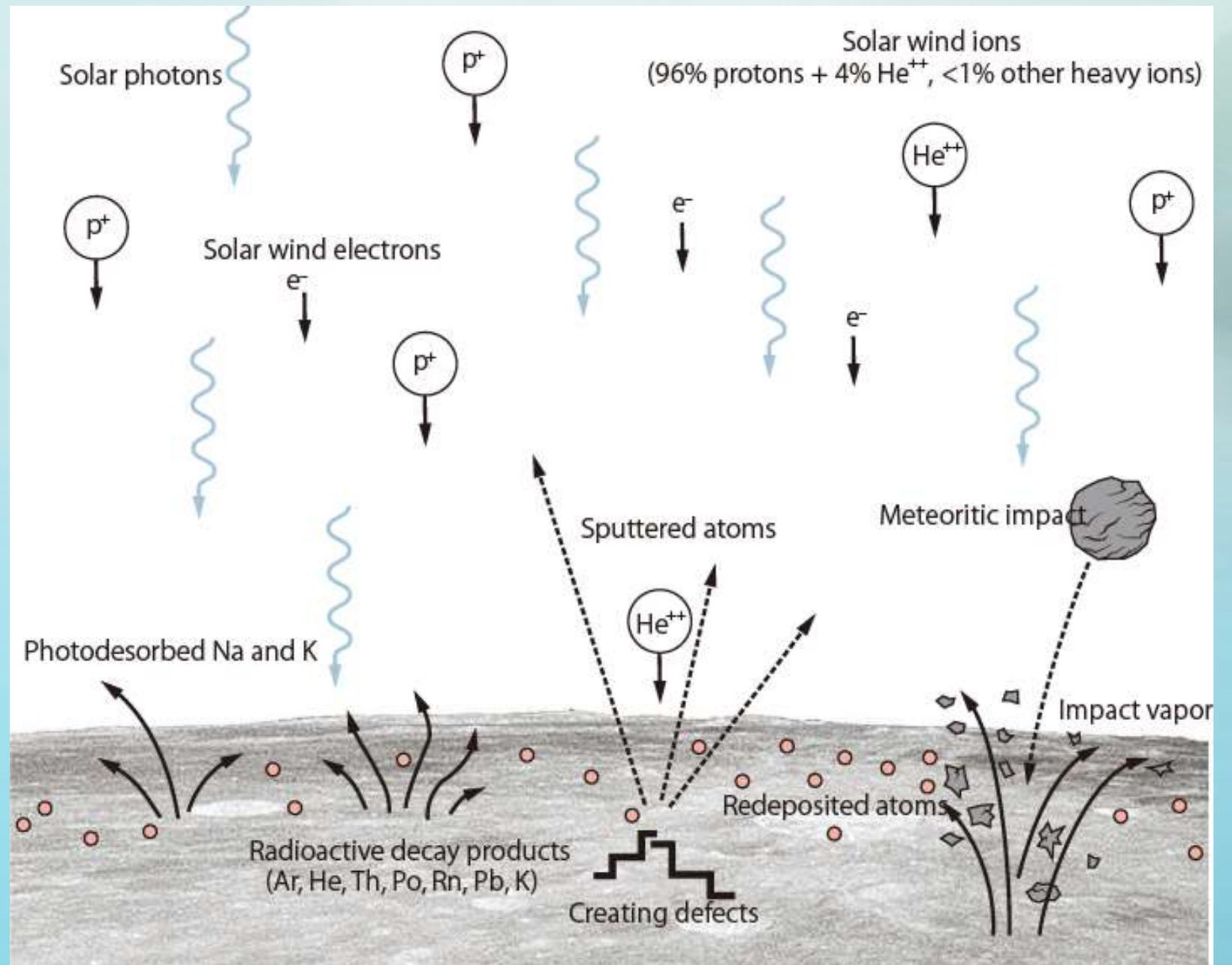
1. 光脱離
2. 隕石衝突
3. 太陽風スパッタリング
4. 熱脱離



Ground observation (Potter&Morgan 1998)

放出される月物質から月の情報が得られるか？

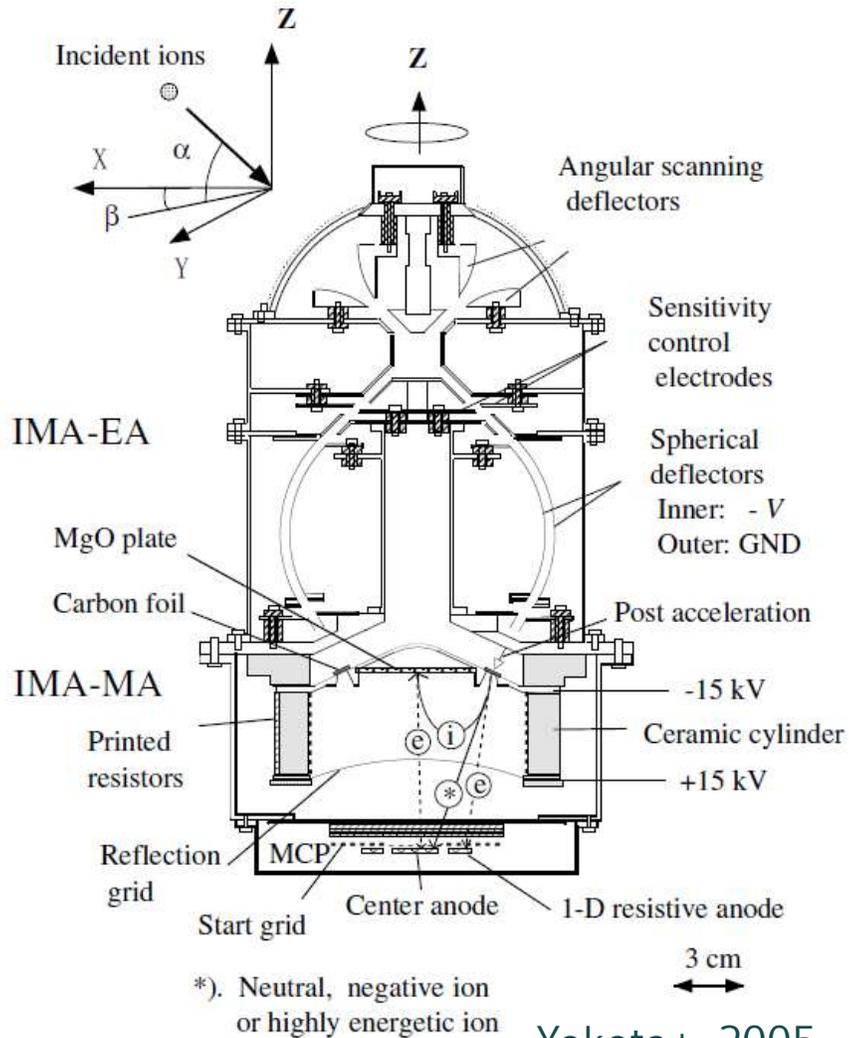
放出物質は表面の組成を反映しているのか？



月の表面では物質の供給と放出が行われている

KAGUYA Obs.

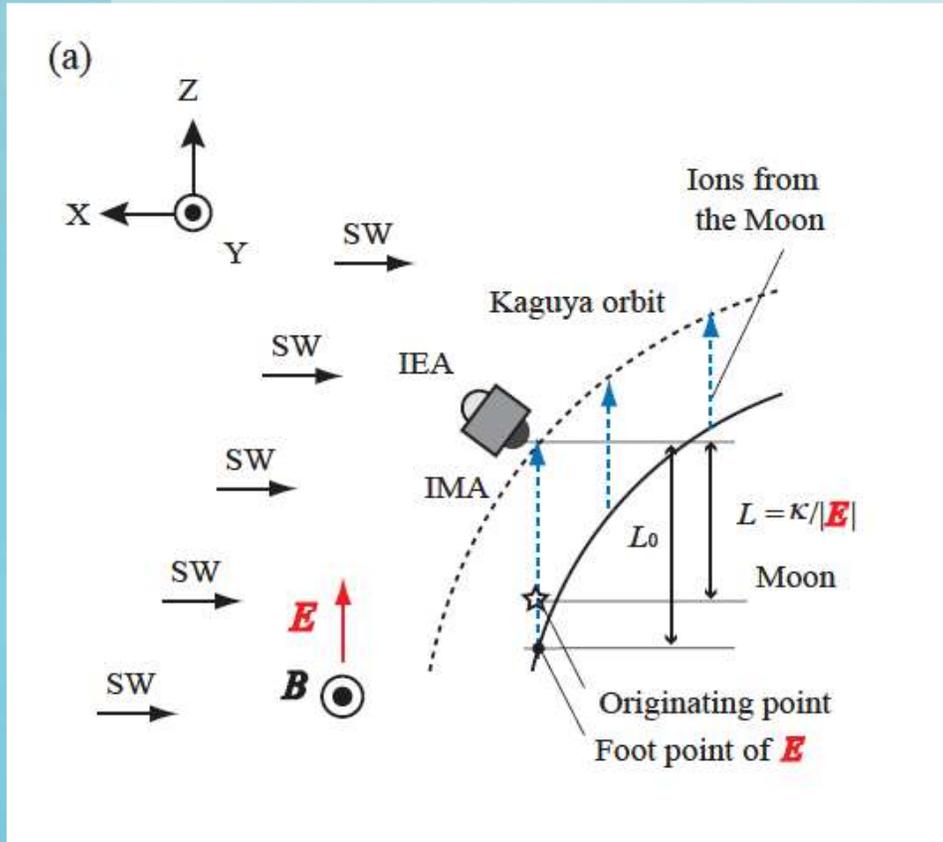
Linear-electric-field Time-of-flight mass spectrometer



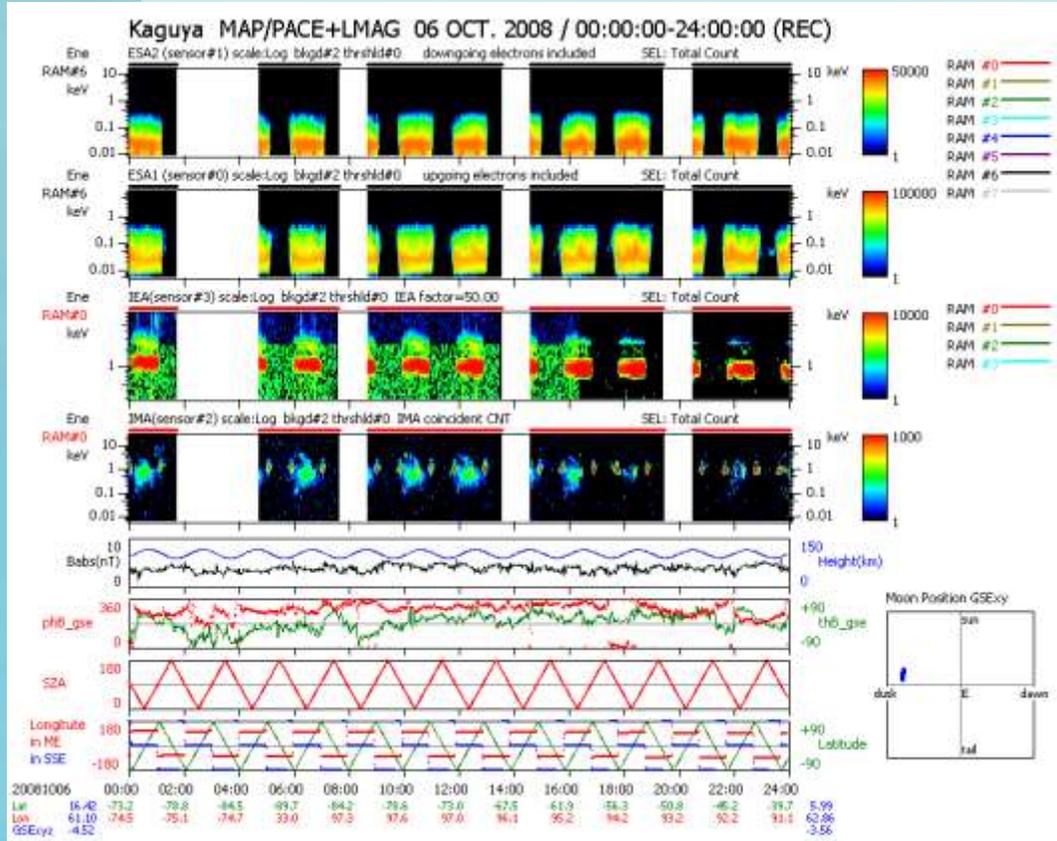
Jan. 2008—Jun. 2009 30—100 km altitude

月面表層から放出する粒子

- 二次イオン初期エネルギー<10eV
- 直ちに太陽風によりピックアップ
→周回高度まで到達
 - $E = -V \times B$ (磁場計測が重要)
 - LE で加速(広いエネルギー分布)
 - 磁気異常の影響

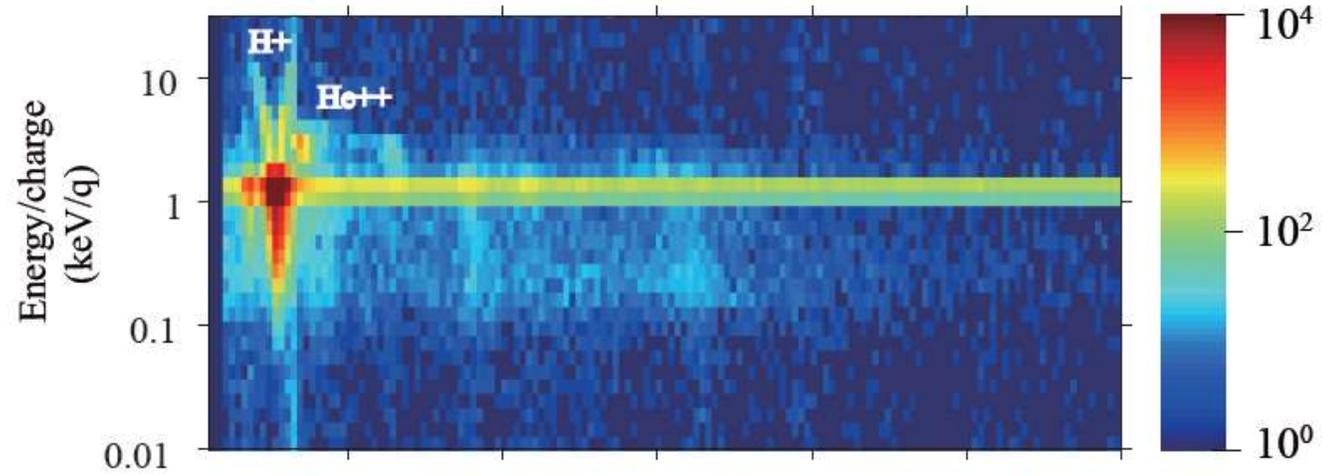


KAGUYA Obs.

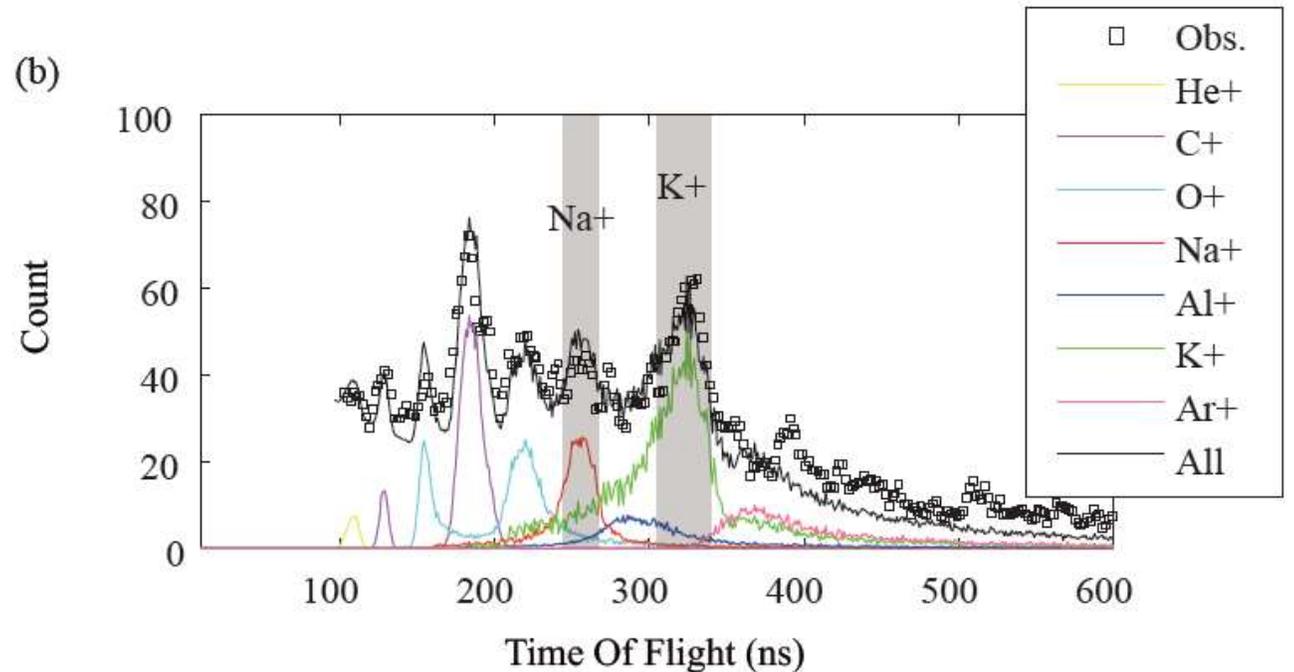


(a)

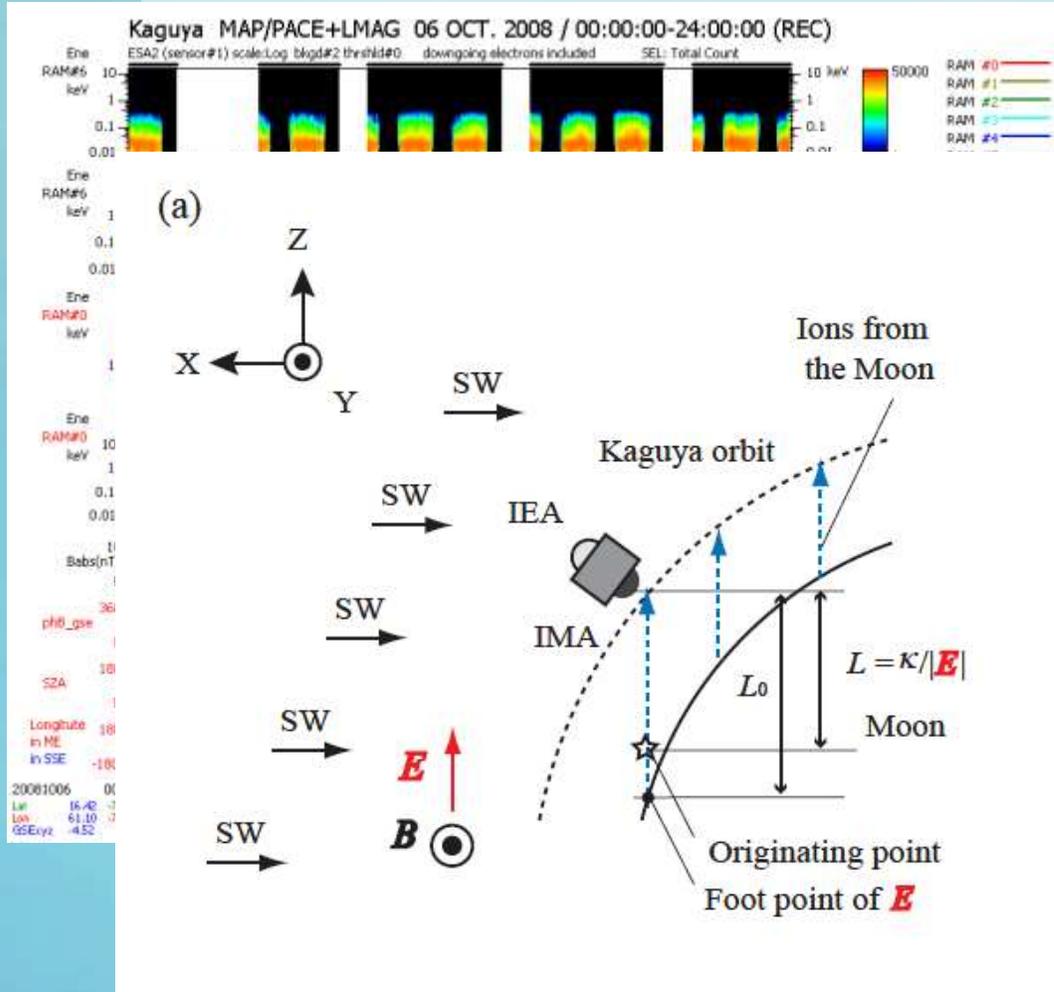
Kaguya MAP-PACE-IMA TOF Profile
06-Oct-2008



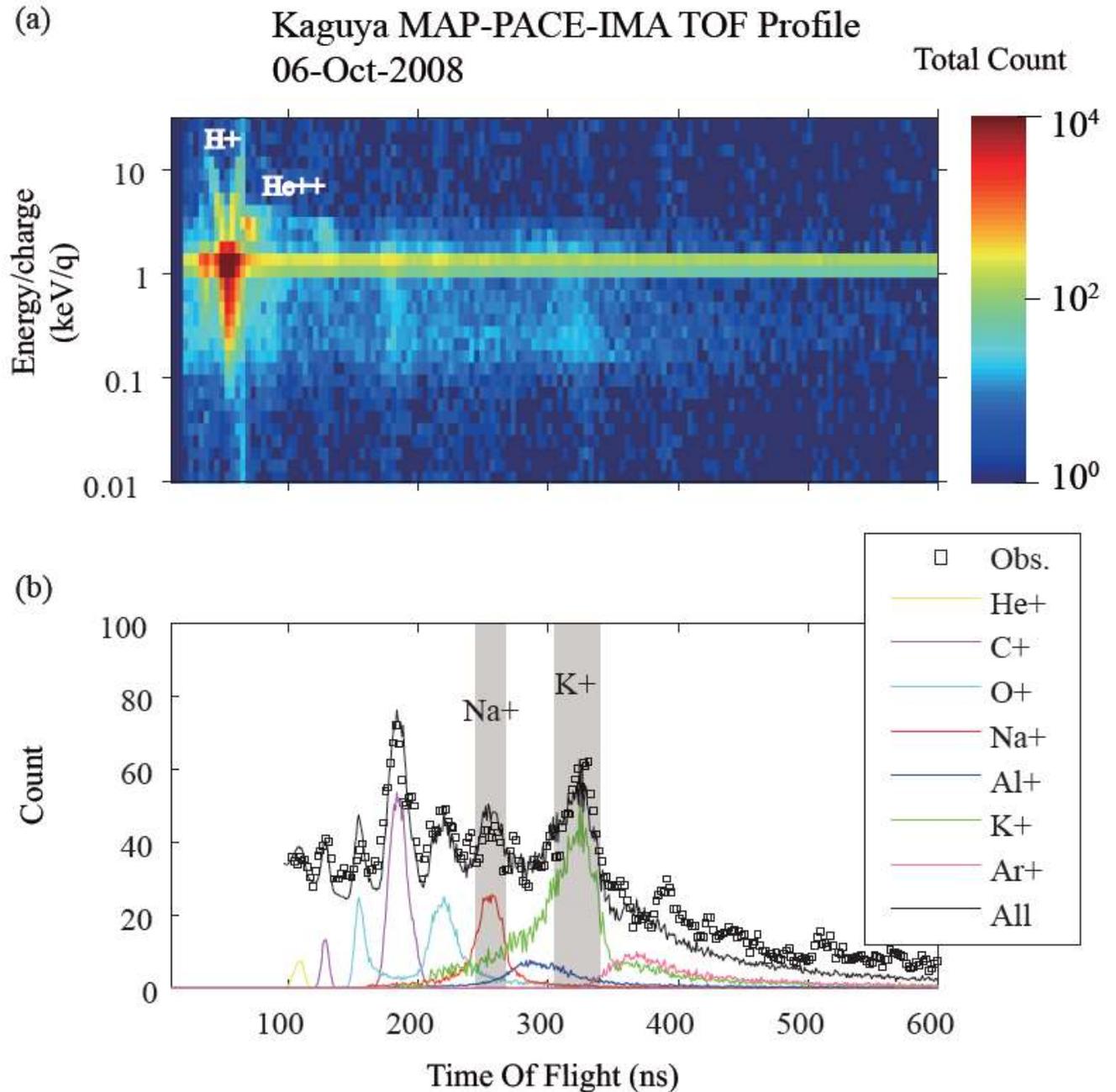
(b)



KAGUYA Obs.



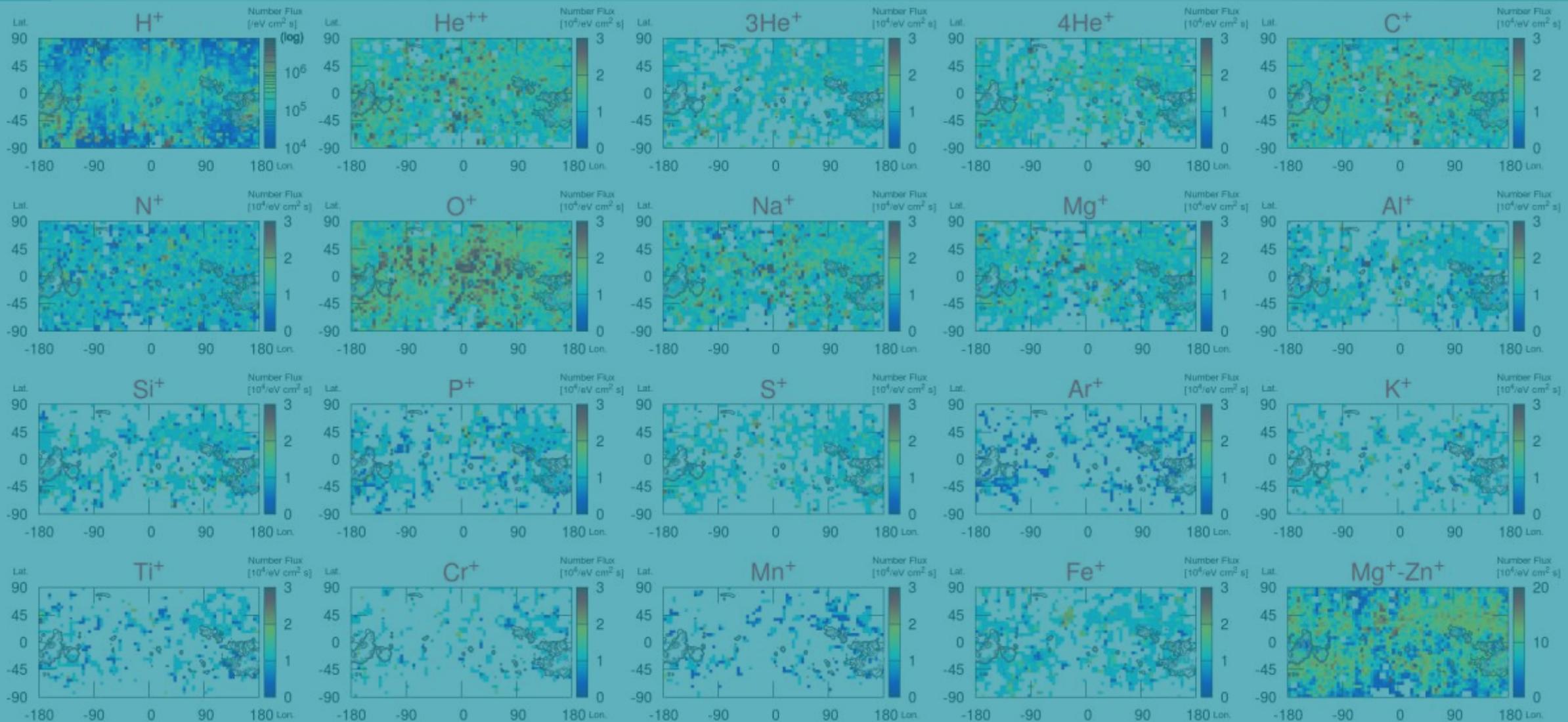
放出地点を求めてMAPを作成



Yokota+, 2014

KAGUYA Obs.

Ion abundance map of the Moon



KAGUYA Obs.

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？

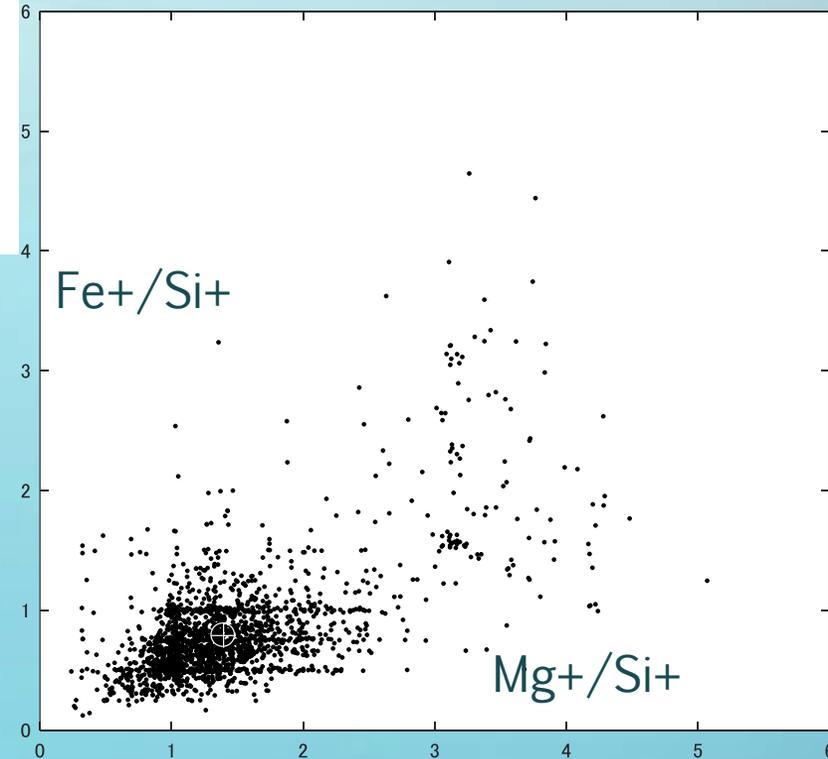
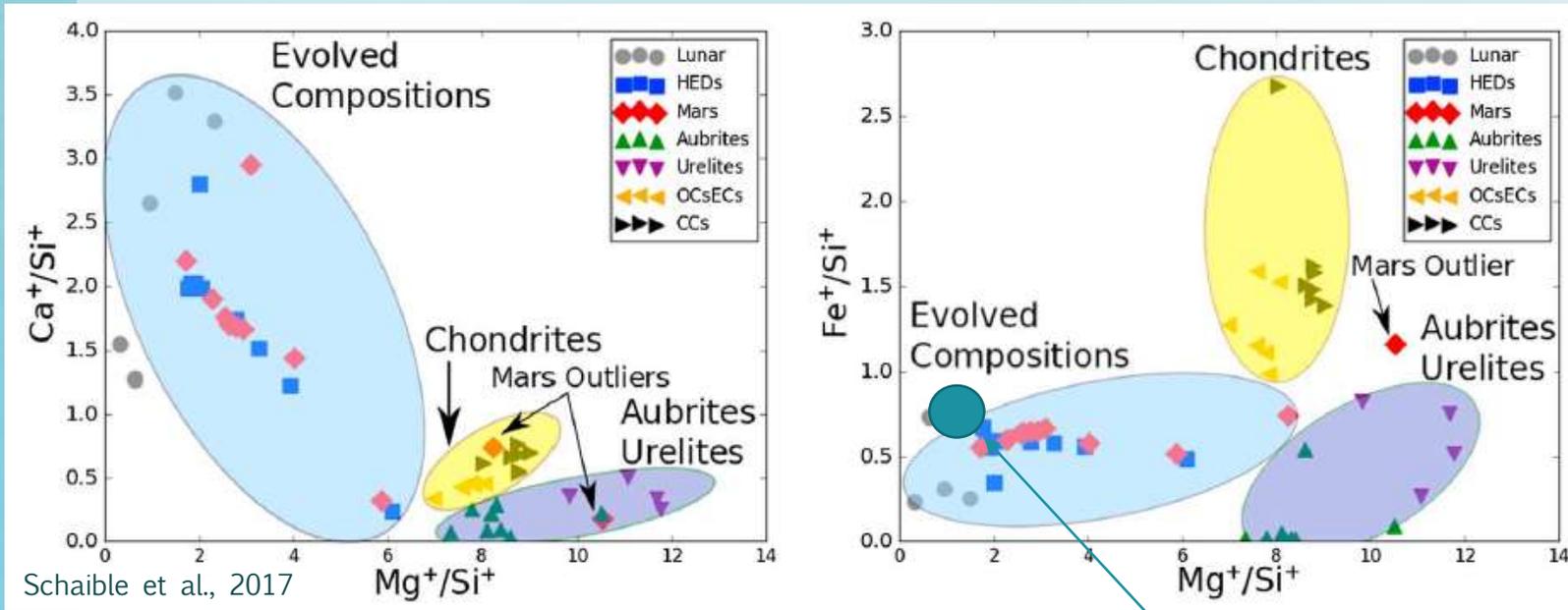
月の表面では物質の供給と放出が行われている

- 貴ガス: He, Ne, Ar
 - 内部からの湧き出し, Th/U放射壊変, 太陽風
- 難揮発性物質: Ca, Mg, Fe, Si
 - 表面組成の情報が得られる

Yokota+ SPS2020
Schaible+2017
- 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

Yokota+2014&2020
- H₂O ...

(Natural) SIMS analyses of small bodies

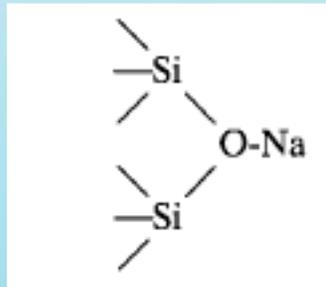
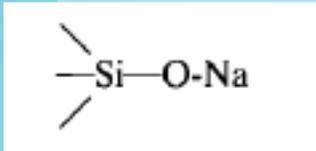
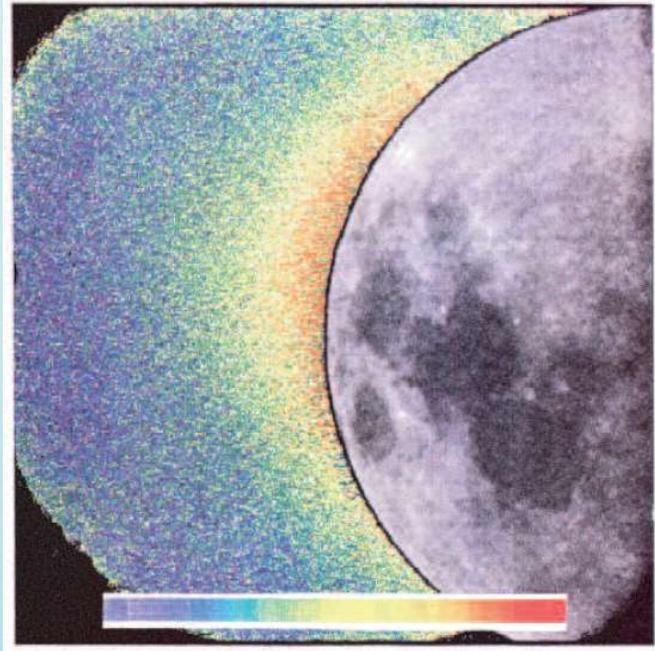


KAGUYA obs. shows that the lunar materials are evolved composition,

→ supporting not capture but giant impact theory

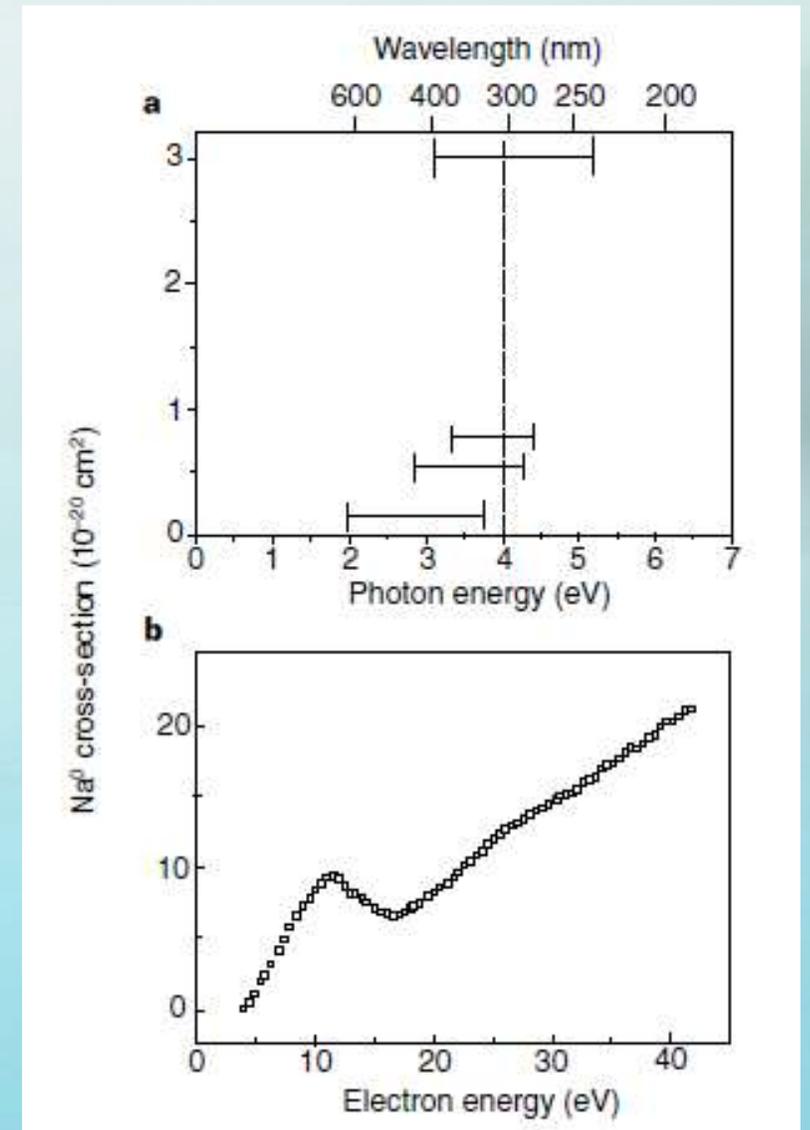
KAGUYA Obs.

アルカリ粒子 Na, K



アルカリ粒子の放出は太陽光脱離Photon-stimulated desorption (PSD)が支配的

格子欠陥の先に付着したアルカリ粒子を放出 Madey+1998



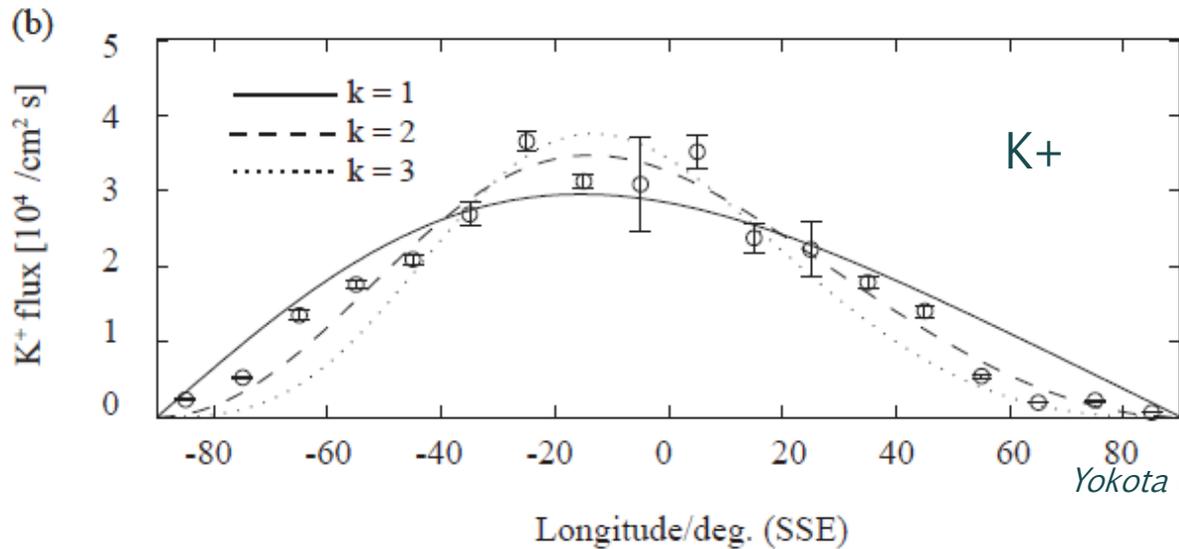
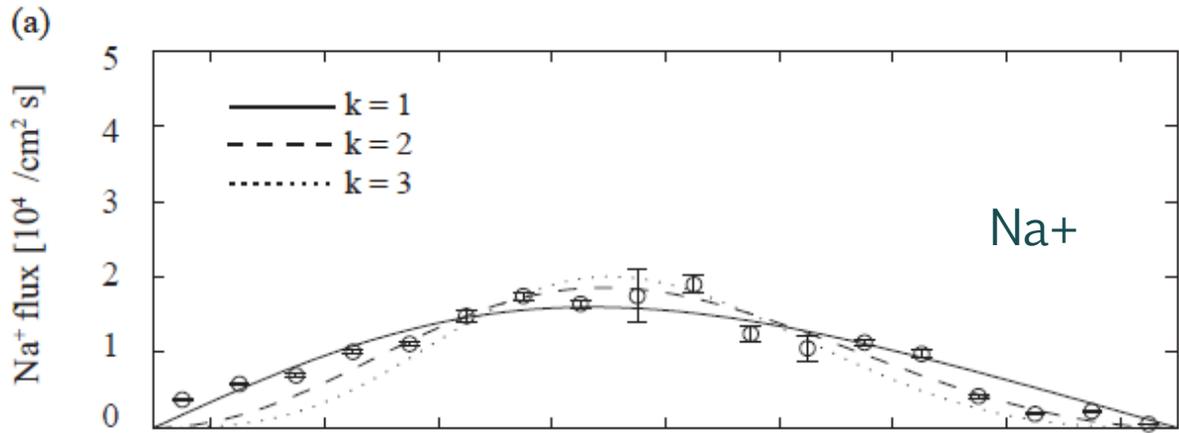
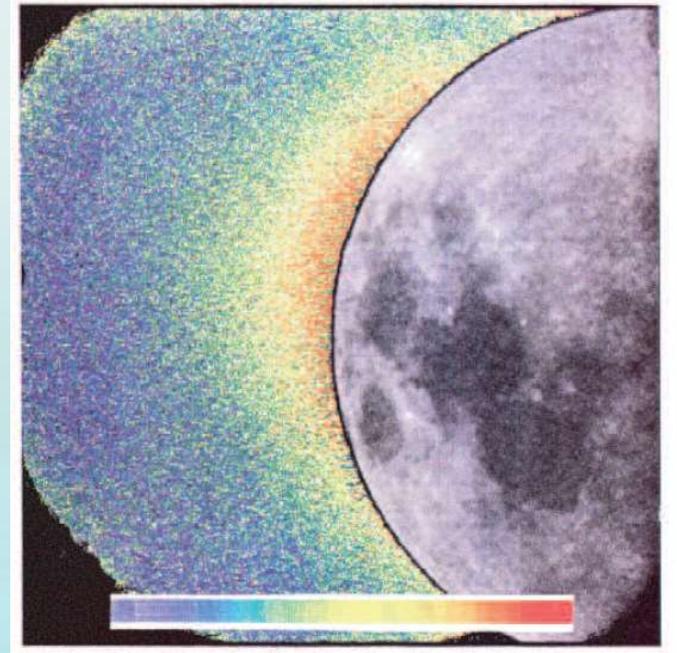
Yakshinskiy+1999

月表面物質そのものではなく表面付着物

KAGUYA Obs.

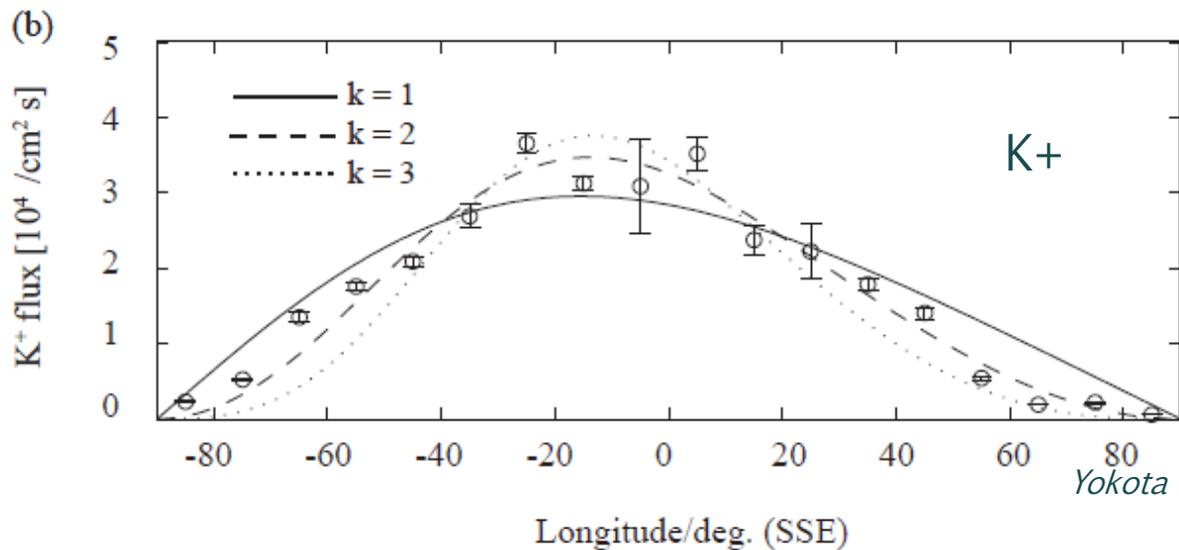
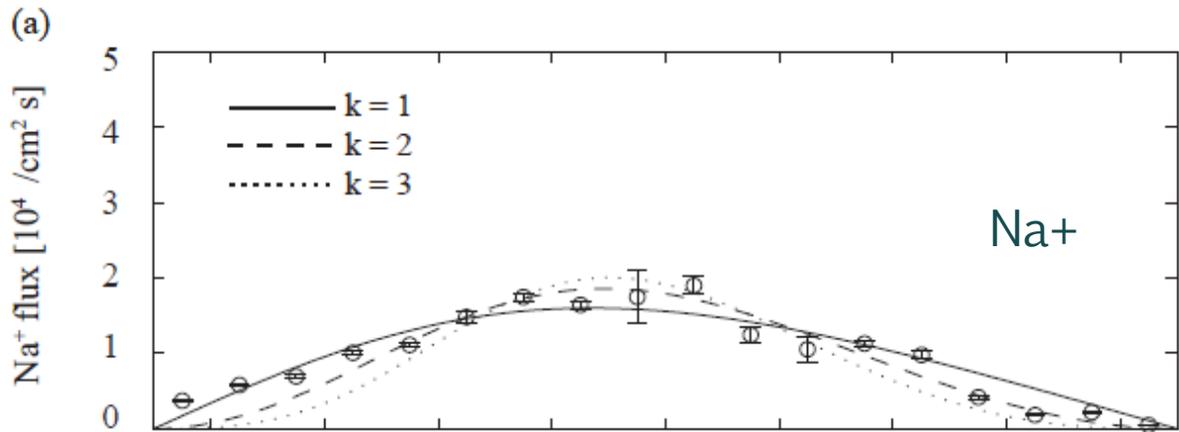
朝夕非対称な分布

アルカリ粒子 Na, K

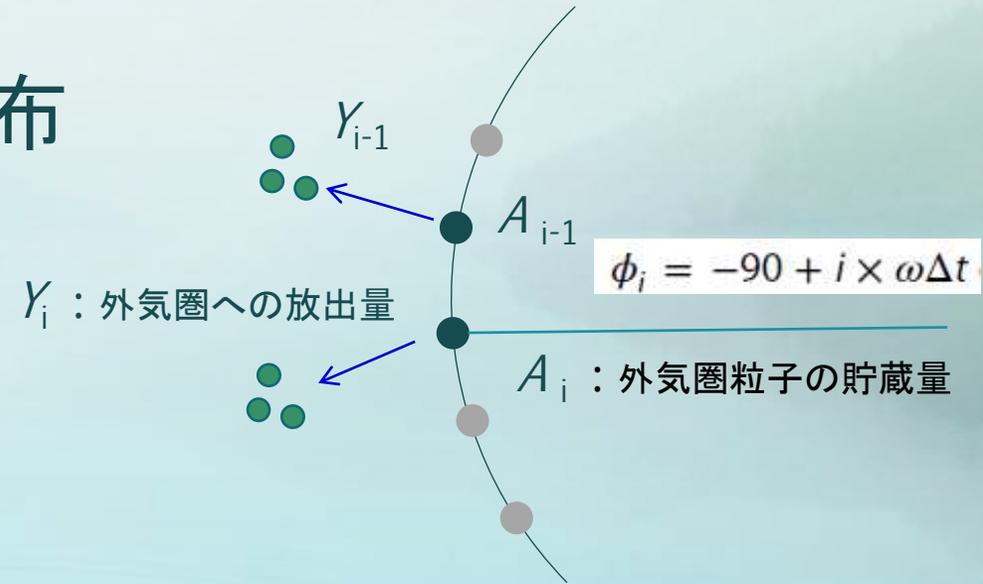


朝夕非対称な分布

アルカリ粒子 Na, K



Yokota et al. 2014



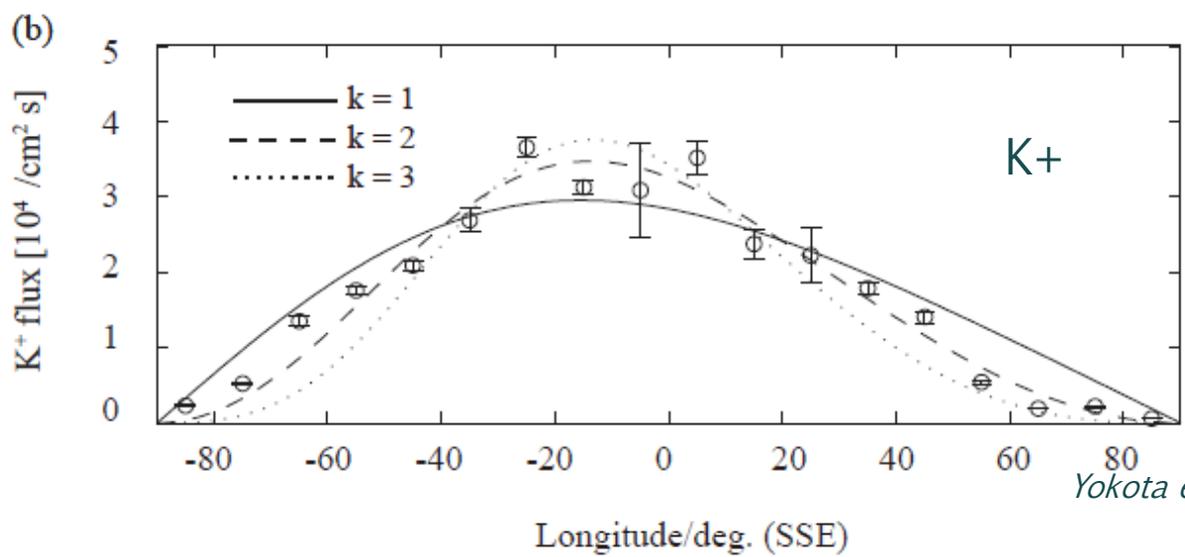
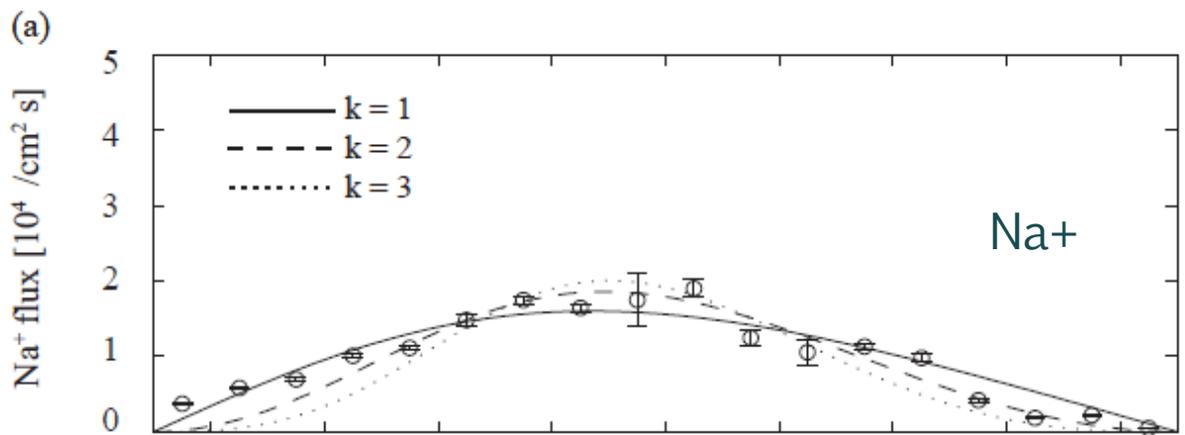
$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} & (i = 1, 2, \dots, N), \end{cases}$$

$$Y_i = \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i \quad (i = 0, 1, \dots, N).$$

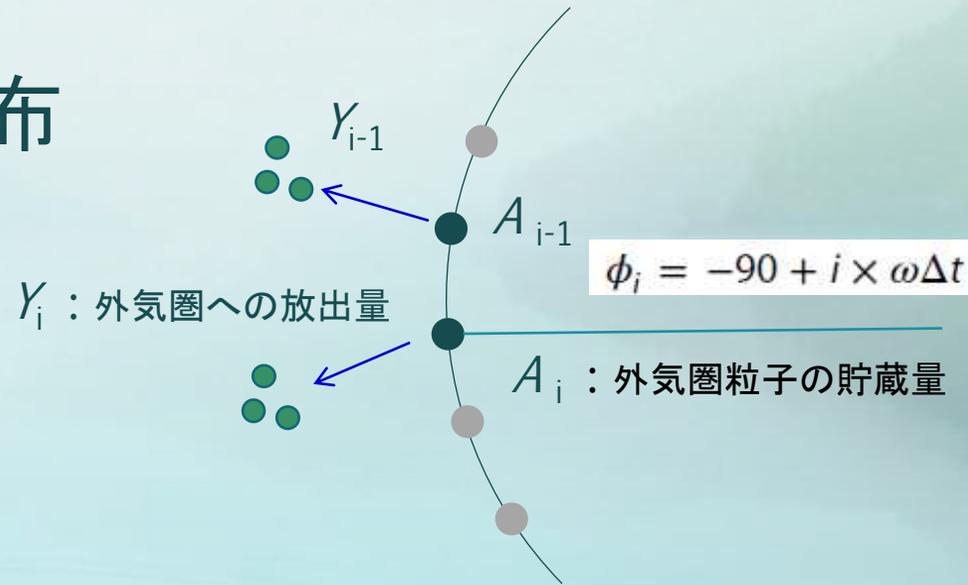
Species	Emission Rate α (%/°)	Abundance A_N/A_0 (%)	Standard Deviation σ ($\times 10^3$)
Na ⁺ ($k=1$)	0.41	62.3	1.63
($k=2$)	0.68	54.0	2.15
($k=3$)	0.93	48.9	3.38
K ⁺ ($k=1$)	0.50	56.4	4.55
($k=2$)	0.91	44.1	2.68
($k=3$)	1.34	35.7	4.70

朝夕非対称な分布

アルカリ粒子 Na, K



Yokota et al. 2014



$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} & (i = 1, 2, \dots, N), \end{cases}$$

$$Y_i = \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i \quad (i = 0, 1, \dots, N).$$

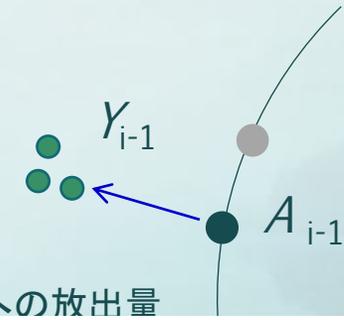
Species	Emission Rate α (%/°)	Abundance A_N/A_0 (%)	Standard Deviation σ ($\times 10^3$)
Na ⁺ (k = 1)	0.41	62.3	1.63
(k = 2)	0.68	54.0	2.15
(k = 3)	0.93	48.9	3.38
K ⁺ (k = 1)	0.50	56.4	4.55
(k = 2)	0.91	44.1	2.68
(k = 3)	1.34	35.7	4.70

夕方のANは翌朝A0にどうやって戻るのか？

KAGUYA Obs.

アルカリ粒子 Na, K

朝夕非対称な分布



Y_i : 外気圏への放出量

$$\phi_i = -90 + i \times \omega \Delta t$$

$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} + C\Delta t & (i = 1, 2, \dots, N, N+1, \dots, 2N) \end{cases}$$
$$Y_i = \begin{cases} \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i & (i = 0, 1, \dots, N) \\ 0 & (i = N+1, N+2, \dots, 2N) \end{cases}$$

$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} & (i = 1, 2, \dots, N), \end{cases}$$
$$Y_i = \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i \quad (i = 0, 1, \dots, N).$$

朝夕非対称な分布

アルカリ粒子 Na, K

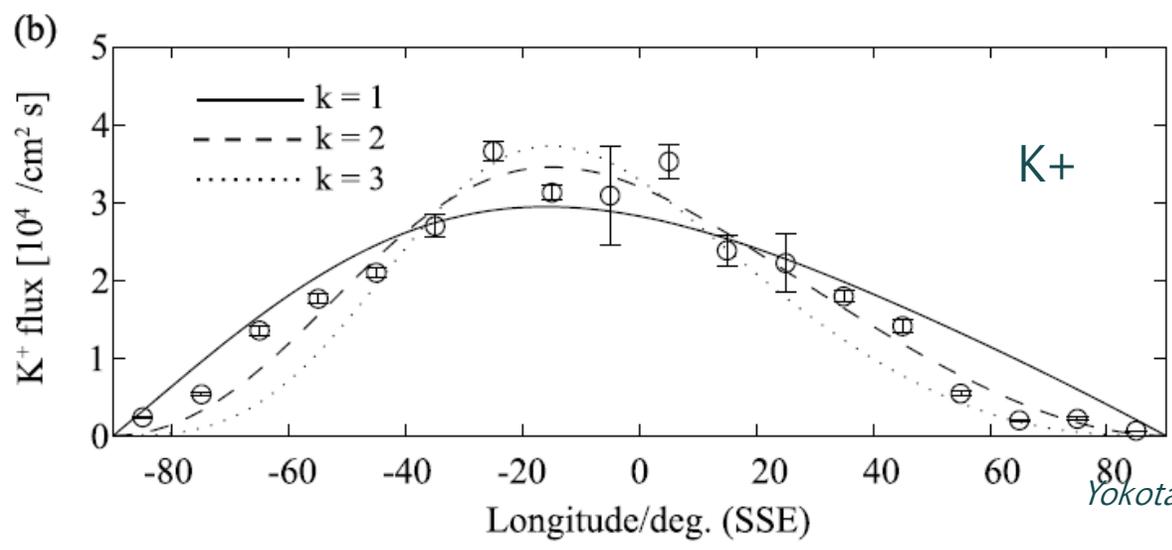
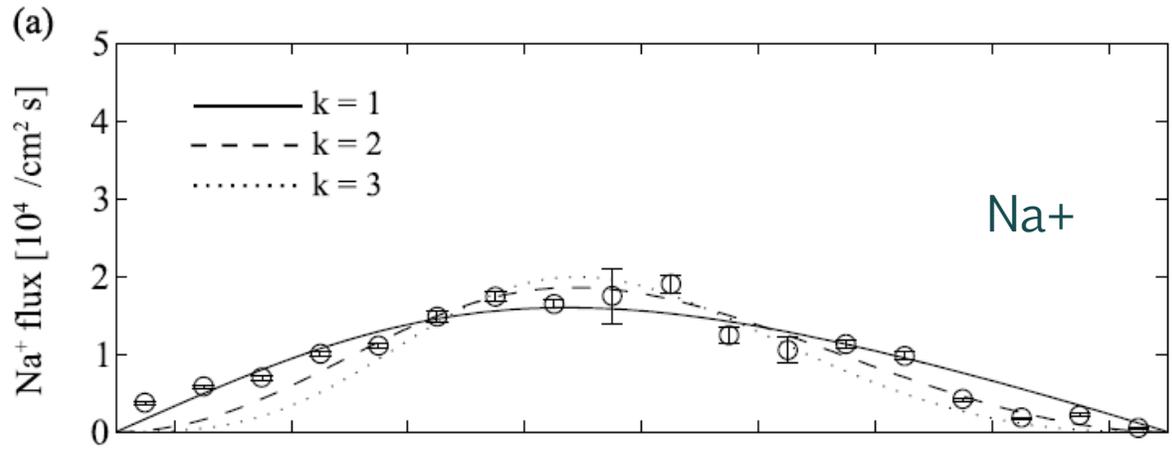
$$\phi_i = -90 + i \times \omega \Delta t$$

$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} + C\Delta t & (i = 1, 2, \dots, N, N+1, \dots, 2N) \end{cases}$$

$$Y_i = \begin{cases} \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i & (i = 0, 1, \dots, N) \\ 0 & (i = N+1, N+2, \dots, 2N) \end{cases}$$

$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} & (i = 1, 2, \dots, N), \end{cases}$$

$$Y_i = \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i \quad (i = 0, 1, \dots, N).$$



Yokota et al. 2014

Species	Emission Rate α (%/°)	Abundance A_N/A_0 (%)	Daily Supply S_{RP3}/A_0 (%)	Standard Deviation $\sigma(\times 10^3)$
Na ⁺ (k = 1)	0.58	71.3	57.4	1.96
(k = 2)	0.96	64.6	70.8	2.17
(k = 3)	1.36	60.4	79.2	3.38
K ⁺ (k = 1)	0.74	65.3	69.4	4.29
(k = 2)	1.30	56.6	86.8	2.71
(k = 3)	1.98	50.2	99.6	4.67

$$S_{RP3} = \sum_{i=1}^{2N} C = 2(A_0 - A_N).$$

KAGUYA Obs.

朝夕非対称な分布

アルカリ粒子 Na, K

$$\phi_i = -90 + i \times \omega\Delta t$$

~50% of A_0 had been depleted.

→ A need supply during the night.

$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} + C\Delta t & (i = 1, 2, \dots, N, N+1, \dots, 2N) \end{cases}$$

$$Y_i = \begin{cases} \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i & (i = 0, 1, \dots, N) \\ 0 & (i = N+1, N+2, \dots, 2N) \end{cases}$$

$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} & (i = 1, 2, \dots, N), \end{cases}$$

$$Y_i = \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i \quad (i = 0, 1, \dots, N).$$

供給源は？

Species	Emission Rate α (%/°)	Abundance A_N/A_0 (%)	Daily Supply S_{RP3}/A_0 (%)	Standard Deviation $\sigma(\times 10^3)$
Na ⁺ ($k = 1$)	0.58	71.3	57.4	1.96
($k = 2$)	0.96	64.6	70.8	2.17
($k = 3$)	1.36	60.4	79.2	3.38
K ⁺ ($k = 1$)	0.74	65.3	69.4	4.29
($k = 2$)	1.30	56.6	86.8	2.71
($k = 3$)	1.98	50.2	99.6	4.67

$$S_{RP3} = \sum_{i=1}^{2N} C = 2(A_0 - A_N).$$

KAGUYA Obs.

朝夕非対称な分布

アルカリ粒子 Na, K

$$\phi_i = -90 + i \times \omega \Delta t$$

~50% of A_0 had been depleted.

→ A need supply during the night.

$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} + C\Delta t & (i = 1, 2, \dots, N, N+1, \dots, 2N) \end{cases}$$

$$Y_i = \begin{cases} \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i & (i = 0, 1, \dots, N) \\ 0 & (i = N+1, N+2, \dots, 2N) \end{cases}$$

$$A_i = \begin{cases} A_0 & (i = 0) \\ A_{i-1} - Y_{i-1} & (i = 1, 2, \dots, N), \end{cases}$$

$$Y_i = \alpha A_i \Delta t \times \cos^k \phi_i \quad (i = 0, 1, \dots, N).$$

供給源は？

Micrometeoroidからの供給量 $6e21-1e22$ Na atoms/s
 Buruno+2007
 $3e22-5e22$ Na atoms/s
 Cremonese+2013

月面からの放出量 : $1.7e23$ Na atoms/s
 宇宙空間への消失量 : $5e22$ Na atoms/s

Tenishev+2013

Species	Emission Rate α (%/°)	Abundance A_N/A_0 (%)	Daily Supply S_{RP3}/A_0 (%)	Standard Deviation $\sigma(\times 10^3)$
Na ⁺ ($k = 1$)	0.58	71.3	57.4	1.96
($k = 2$)	0.96	64.6	70.8	2.17
($k = 3$)	1.36	60.4	79.2	3.38
K ⁺ ($k = 1$)	0.74	65.3	69.4	4.29
($k = 2$)	1.30	56.6	86.8	2.71
($k = 3$)	1.98	50.2	99.6	4.67

$$S_{RP3} = \sum_{i=1}^{2N} C = 2(A_0 - A_N).$$

揮発性物質の放出と供給

- Na, K
 - ナノメートルの超表層の格子欠陥に付着したものが太陽光により放出
 - 昼間のうちに超表層貯蔵量の50%ほどを放出してしまう
 - Micrometeoroidなどによる供給が定常的に起きている
(月深部及び物質内部からの拡散)
- C

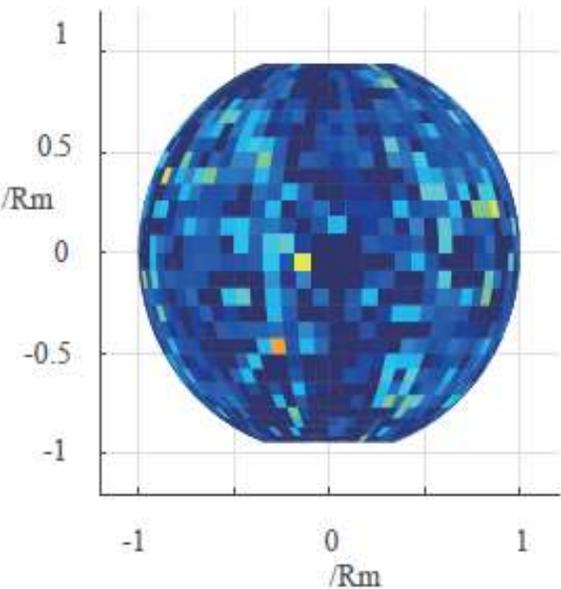
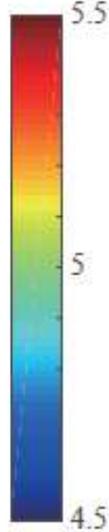
揮発性物質の放出と供給

- Na, K
 - ナノメートルの超表層の格子欠陥に付着したものが太陽光により放出
 - 昼間のうちに50%ほどを放出してしまう
 - Micrometeoroidなどによる供給が定常的に起きている
(月深部及び物質内部からの拡散)
- C
 - 巨大衝突による月誕生時に全て失われた
 - KAGUYAでは観測 Yokota+2009
 - 火山ガラス中から発見 Wetzel+2015

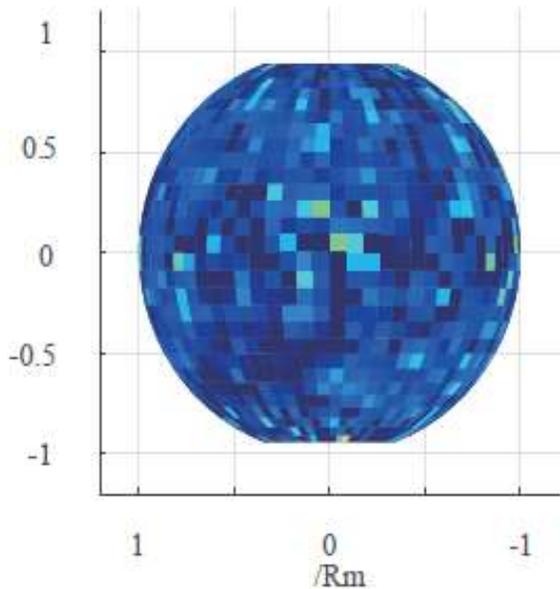
KAGUYA Obs.

C+ 放出量MAP

Log10(Flux)
[ions cm⁻² s⁻¹]

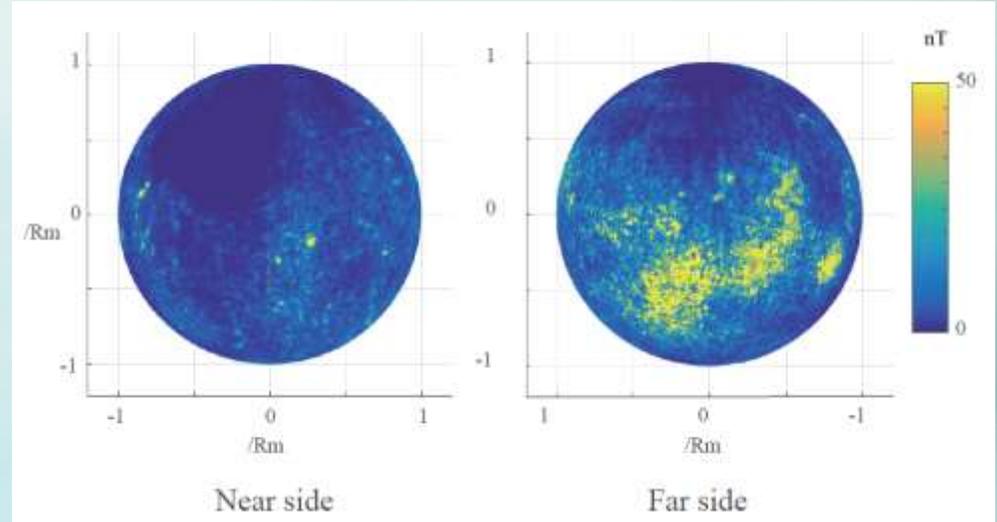


Near side



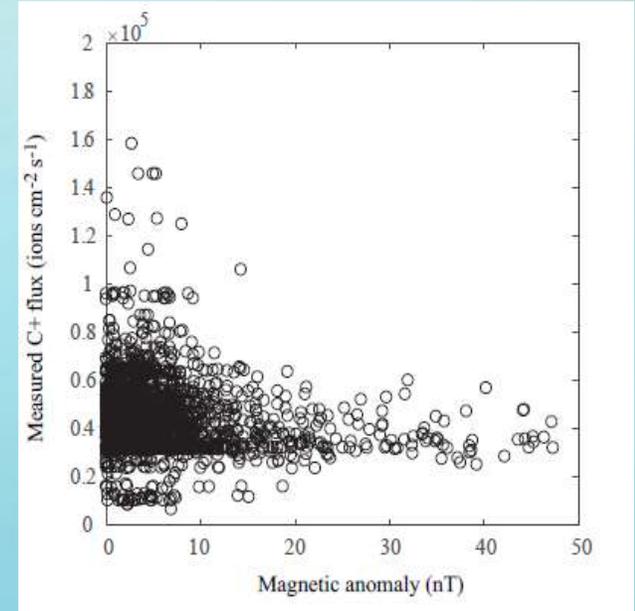
Far side

Yokota+2020



Near side

Far side

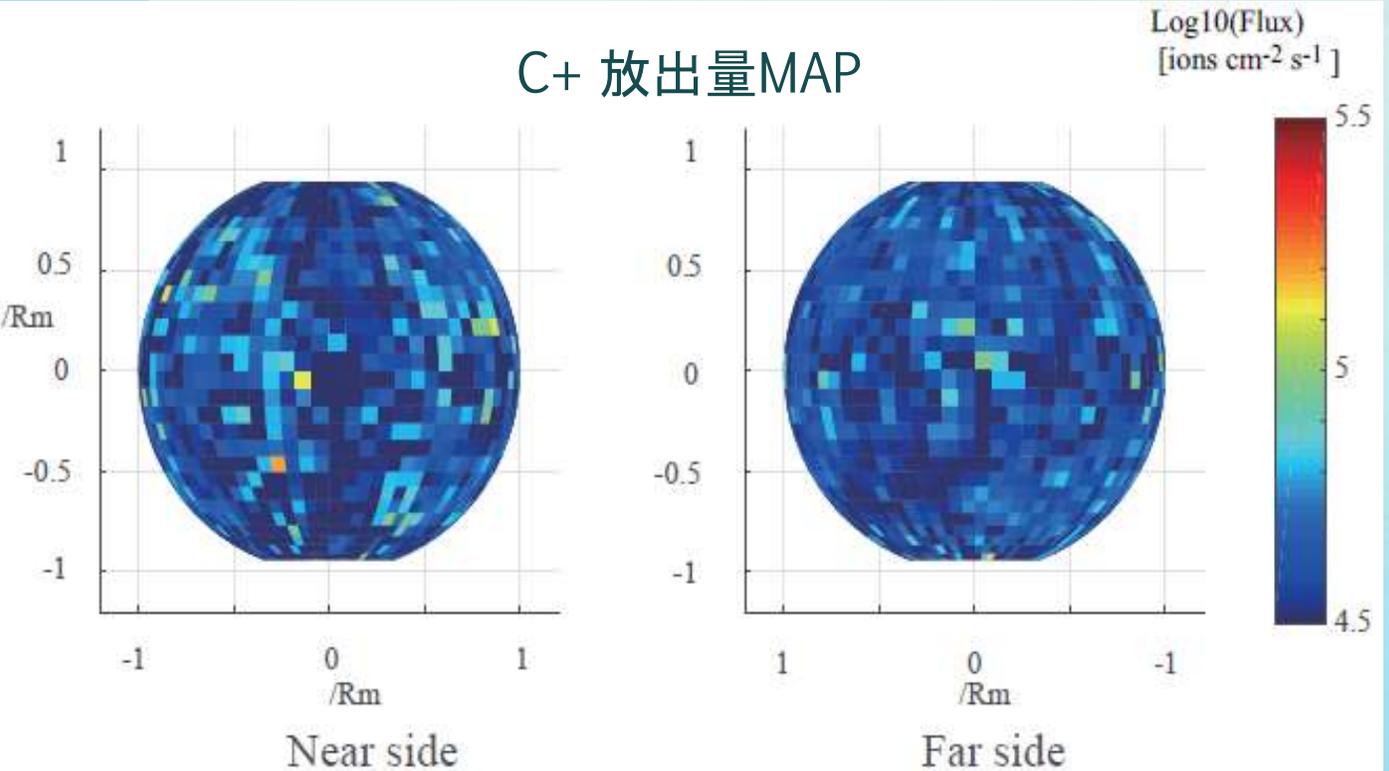


磁気異常と反相関

海(5.1e4±5.4% ions cm⁻² s⁻¹) > 高地(4.5e4±2.4% ions cm⁻² s⁻¹)

KAGUYA Obs.

C+ 放出量MAP



Yokota+2020
Yokota+2020

C は月起源か?

Micrometeoroid $1e16 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Cremonese+2013

Meteorite flux to the Earth

普通コンドライト80%,
炭素質コンドライト4.2%

Zolensky+2006

$1.5e4 \text{ atoms cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

磁気異常と反相関

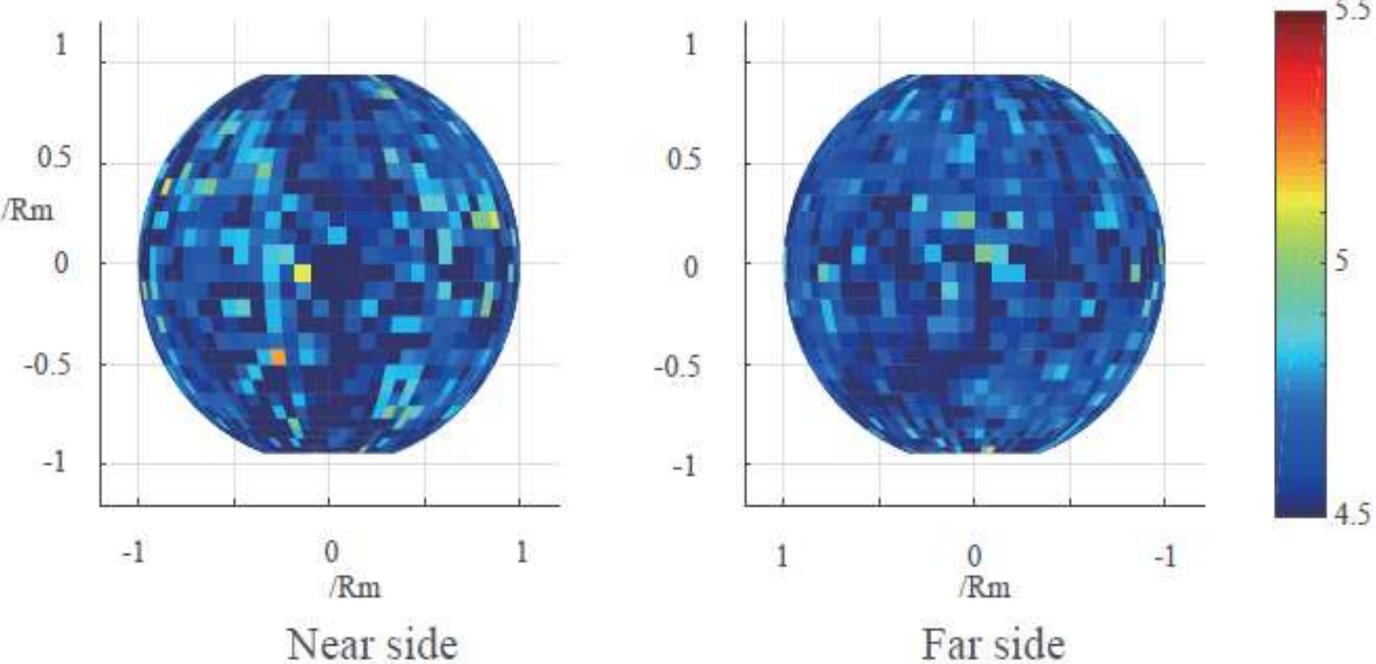
海($5.1e4 \pm 5.4\% \text{ ions cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) > 高地($4.5e4 \pm 2.4\% \text{ ions cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

KAGUYA Obs.

C は月起源か?

C+ 放出量MAP

Log10(Flux)
[ions cm⁻² s⁻¹]



太陽風 C⁵⁺, C⁶⁺

2008-2009 He⁺⁺ 3.4e6 ions cm⁻² s⁻¹

He/O and C/O in the solar

83.2 and 0.672

Reisenfeld+2013

2.7e4 ions cm⁻² s⁻¹

Yokota+2020
Yokota+2020

磁気異常と反相関

Cremonese+2013

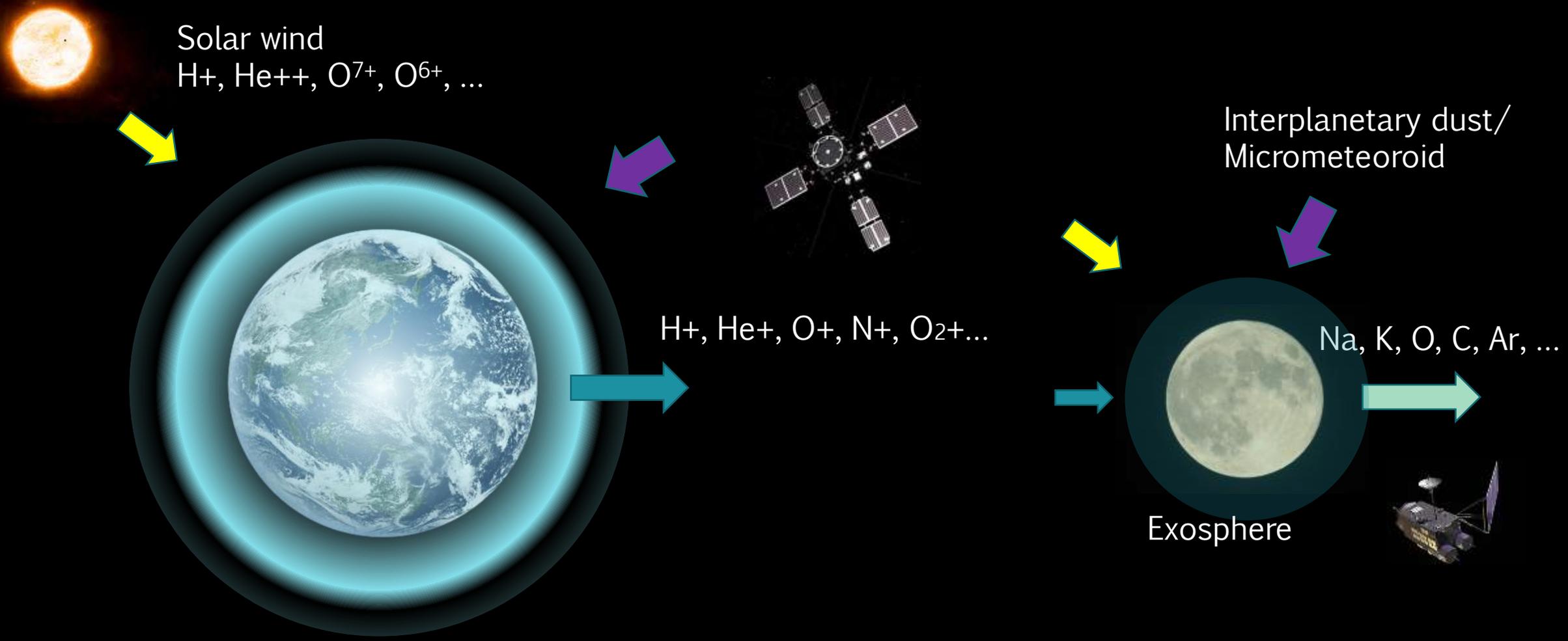
海(5.1e4±5.4% ions cm⁻² s⁻¹) > 高地(4.5e4±2.4% ions cm⁻² s⁻¹)

揮発性物質の放出と供給

- Na, K
 - ナノメートルの超表層の格子欠陥に付着したものが太陽光により放出
 - 昼間のうちに50%ほどを放出してしまう
 - Micrometeoroidなどによる供給が定常的に起きている
(月深部及び物質内部からの拡散)
- C
 - 巨大衝突による月誕生時に全て失われた
 - KAGUYAでは観測 Yokota+2009
 - 火山ガラス中から発見 Wetzel+2015
 - KAGUYA観測による放出量は太陽風+Micrometeoroid供給量を上回る Yokota+2020

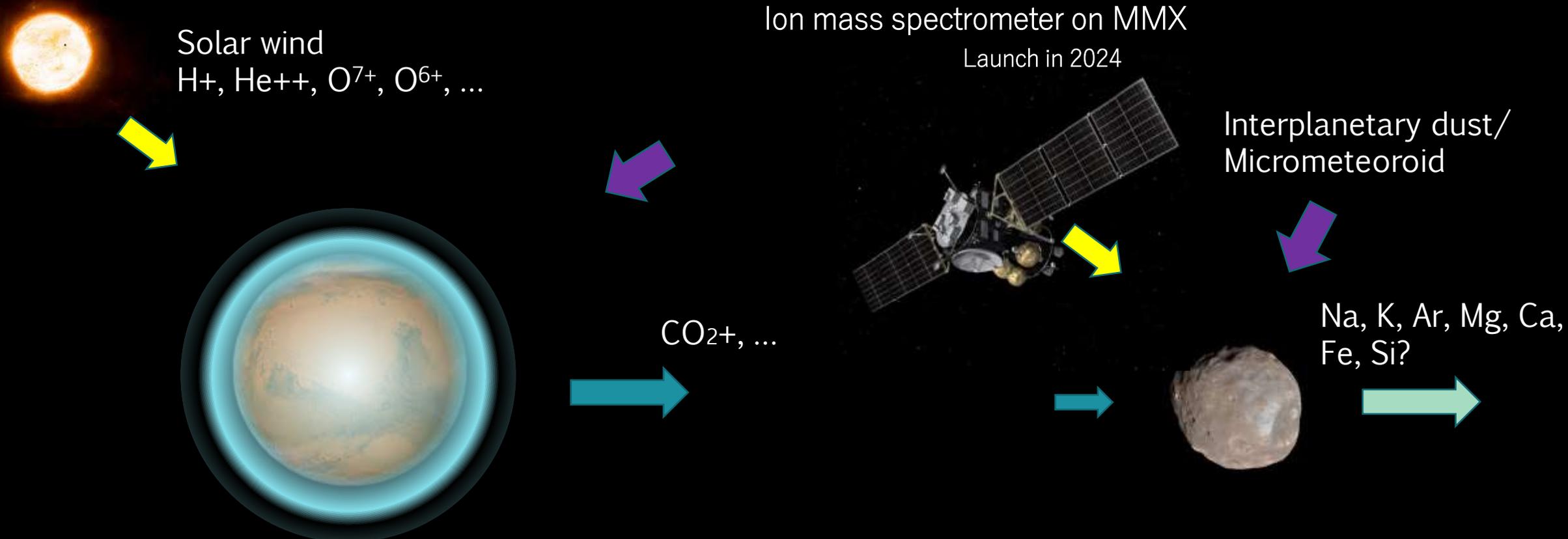
月起源のCが表面全体から湧き出している
→誕生時からCを含有していた

地球型惑星・衛星系での物質の放出と供給



観測により放出・供給量を見積り、それぞれの機構の解明を目指す

地球型惑星・衛星系での物質の放出と供給

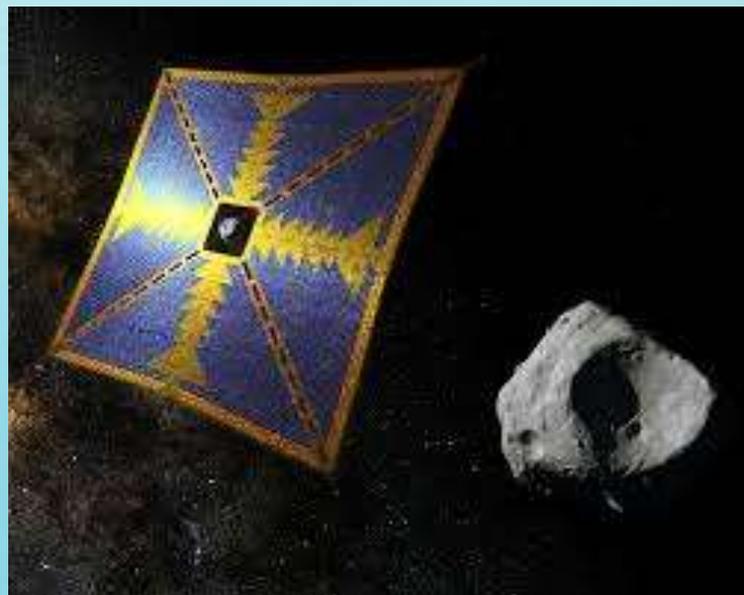
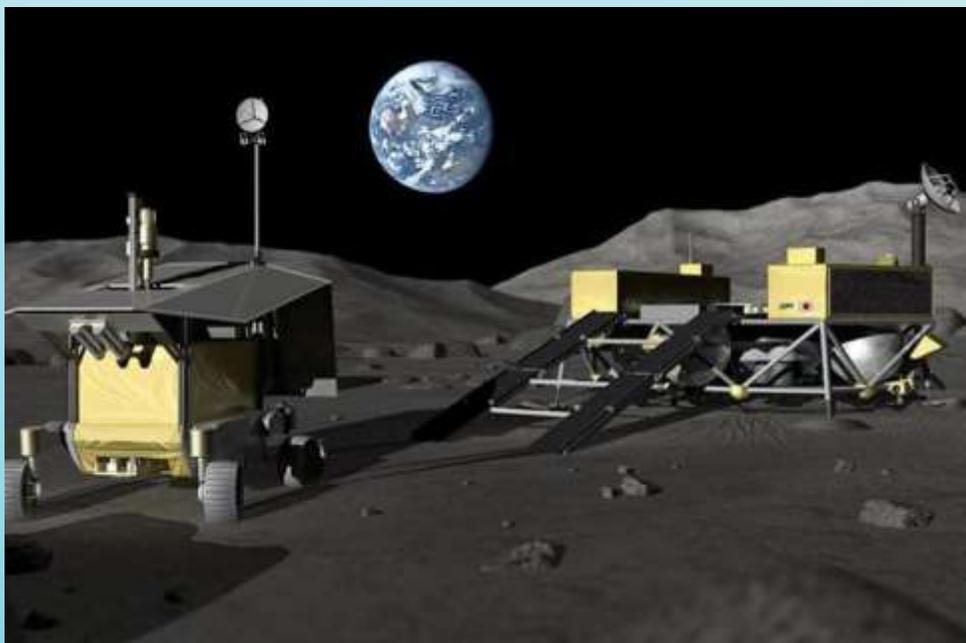


観測により放出・供給量を見積り、それぞれの機構の解明を目指す

着陸探査機用質量分析器の開発

月極域探査

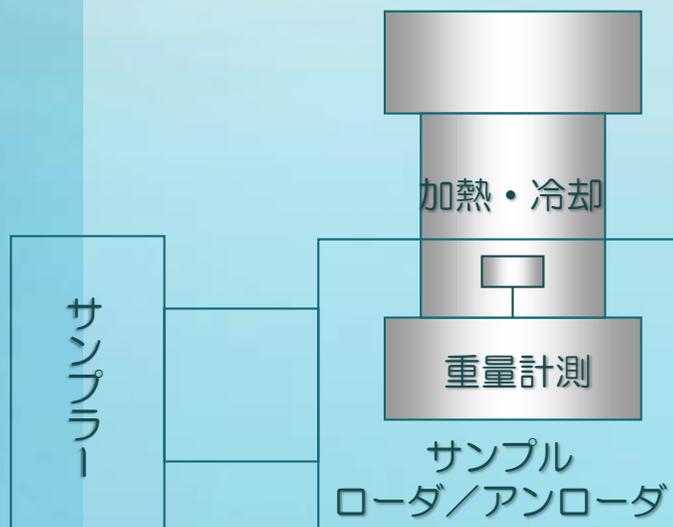
トロヤ群小惑星探査OKEANOS



着陸探査機用質量分析器の開発

月極域探査

0.1wt%精度で水 (H₂O) の含有量が直接観測可能であること



TGA

200 x 300 x 400 mm
12 kg
数十~200 W

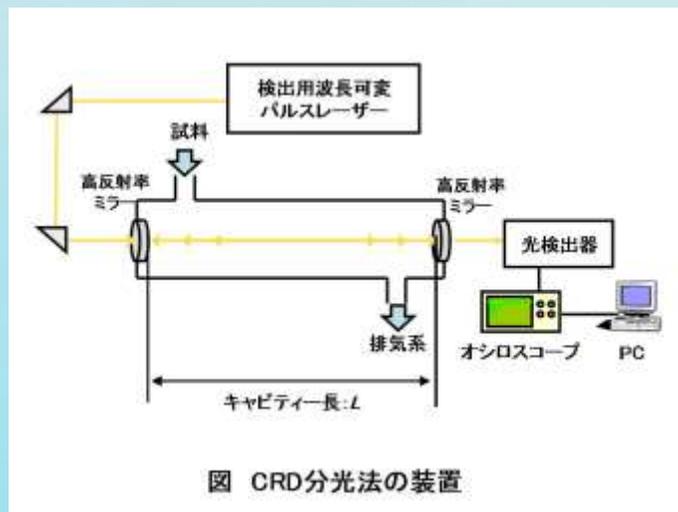
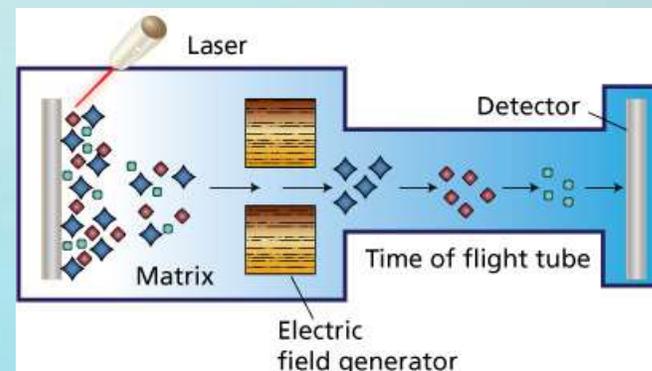


図 CRD分光法の装置

CRDS

150 x 150 x 200 mm
6 kg
30 W

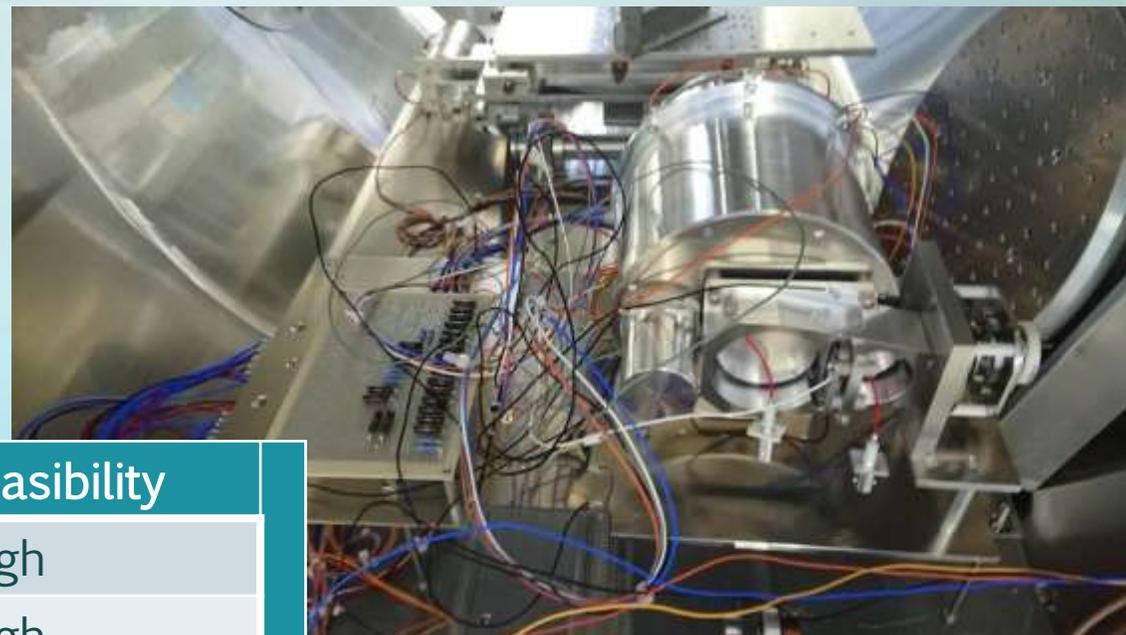
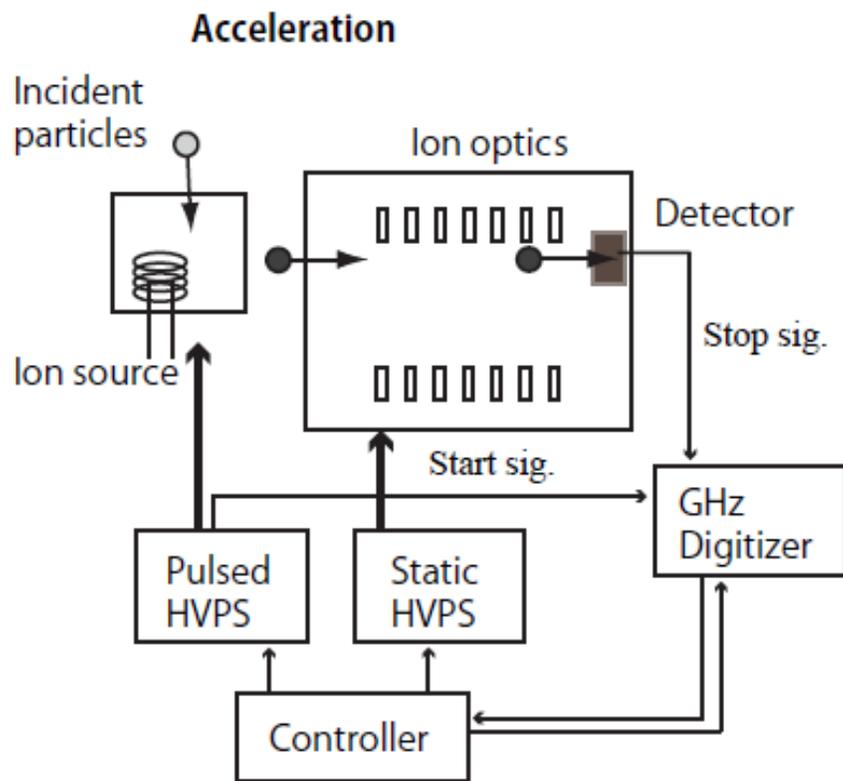


MS

35 x 35 x 59 m
80 x 80 x 150 mm
1.4 kg
70 W

着陸探査機用質量分析器の開発

月極域探査

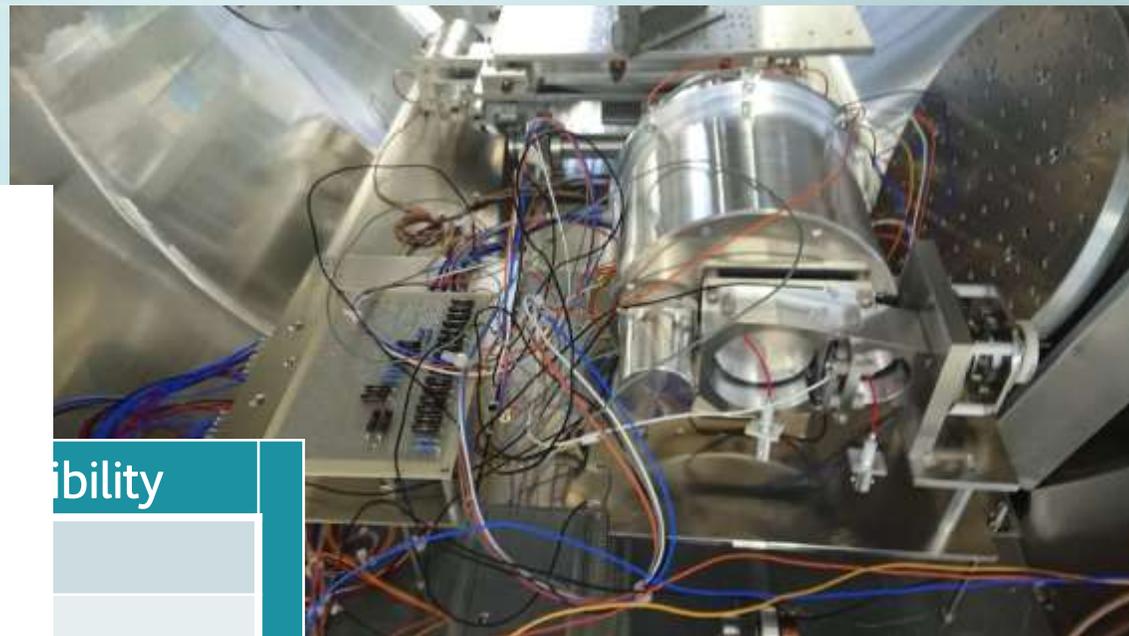
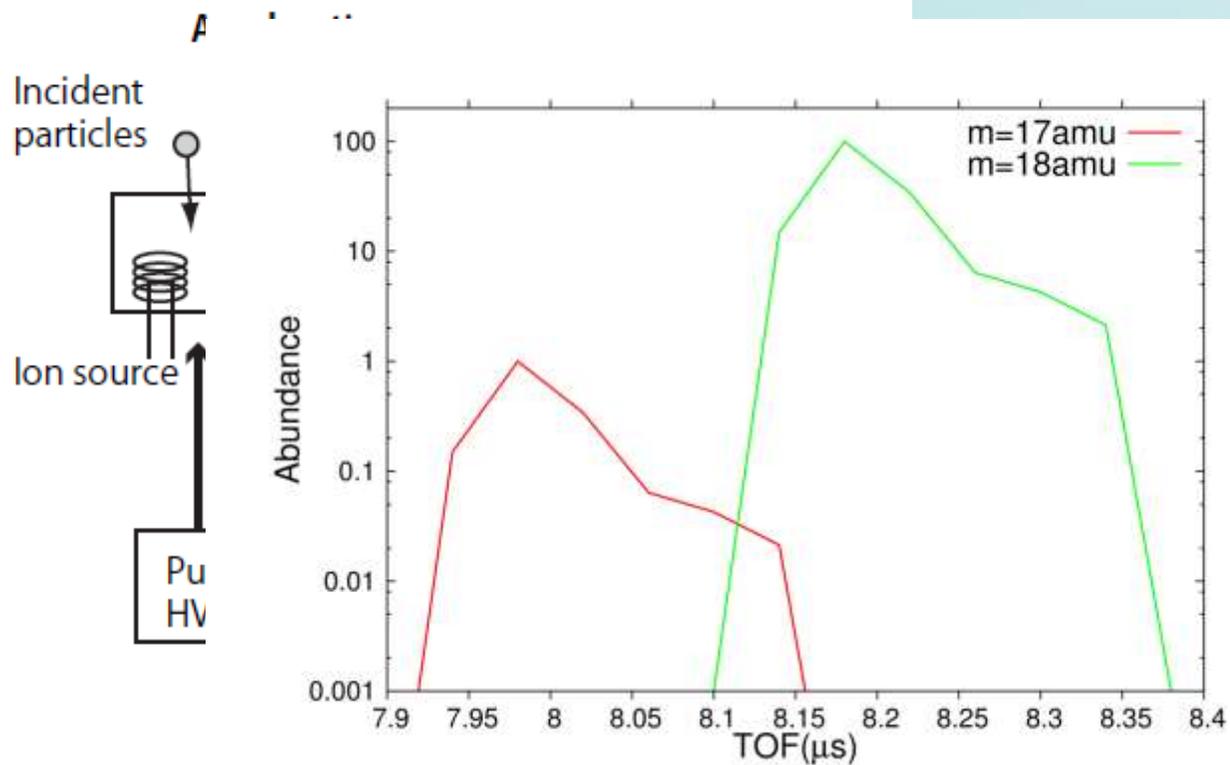


	Feasibility
Ion optics	High
Detector	High
Ion source	Middle
Controller	High
GHz digitizer	Middle
Static HVPS	High
Pulsed HVPS	Middle

リフレクトロンTOF型

着陸探査機用質量分析器の開発

月極域探査



ibility

le

le

Pulsed HVPS

Middle

リフレクトロンTOF型

着陸探査機用質量分析器の開発

トロヤ群小惑星探査OKEANOS

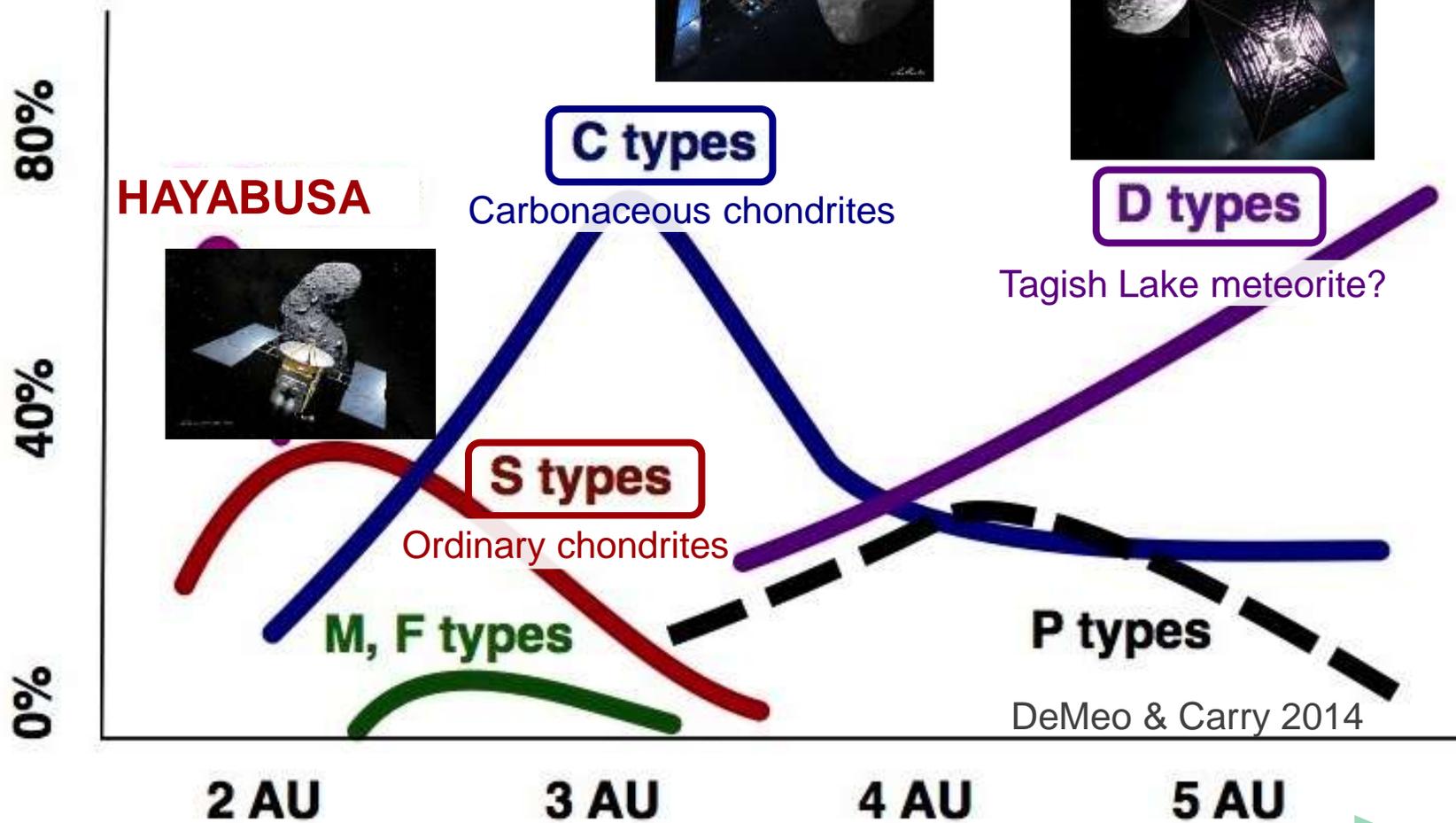
HAYABUSA2



OKEANOS



Relative distribution of asteroids types by number



HAYABUSA



D types

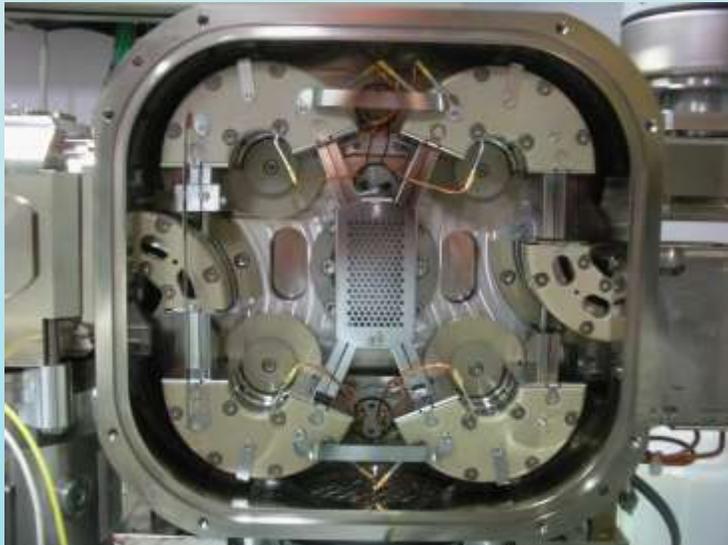
Tagish Lake meteorite?

Processed

Primitive

着陸探査機用質量分析器の開発

トロヤ群小惑星探査OKEANOS



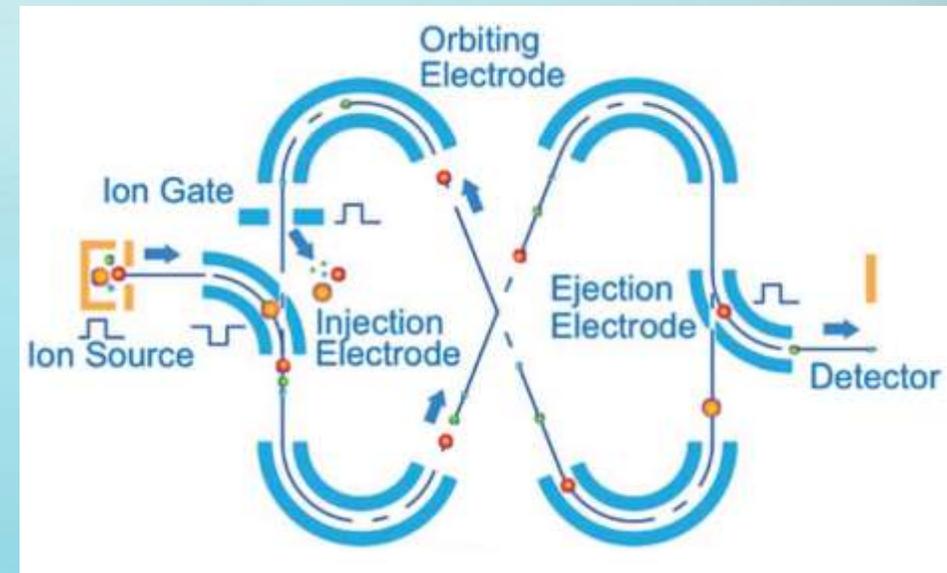
High Resolution Mass Spectrometer (HRMS)

MULTUM: multi-turn time-of-flight mass spectrometer

Requirements

- For isotopes (H,N,O,C)
 - Mass resolution: >30,000
 - m/z: 1 to 30
- For molecular formulas
 - Mass accuracy: 10 ppm
 - m/z: 10 to 300

isotopes	Accuracy
δD	$\pm 100\%$
$\delta^{15}N$	$\pm 40\%$
$\delta^{17,18}O$	$\pm 10\%$
$\delta^{13}C$	$\pm 10\sim 20\%$



- 18 x 18 x 10 cm³ (core)
+ 22 x 22 x 20 cm³ (E-box)
- ~5 kg

質量分析器：宇宙プラズマ計測→小型天体探査

Mission	Instruments	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年
SELENE(KAGUYA)	PACE	■						
BepiColombo-MMO(MIO)	MIA, MEA, MSA	■					■	
MMS	FPI-DIS x16	■			■ ■ ■			
ERG(ARASE)	MEPe&i				■ ■ ■ ■			
MMX	MSA				■	■	■	
月極域探査	Mass				■	■	■	■
OKEANOS	HRMS				■	■		