

# メテオロイドから探る太陽系の起源と進化



阿部 新助 Shinsuke ABE, Dr.  
日本大学理工学部 航空宇宙工学科



<http://abelab.net>

May 1, 2021



# 阿部研究室

Space Science Laboratory  
宇宙科学・天文学  
太陽系惑星科学

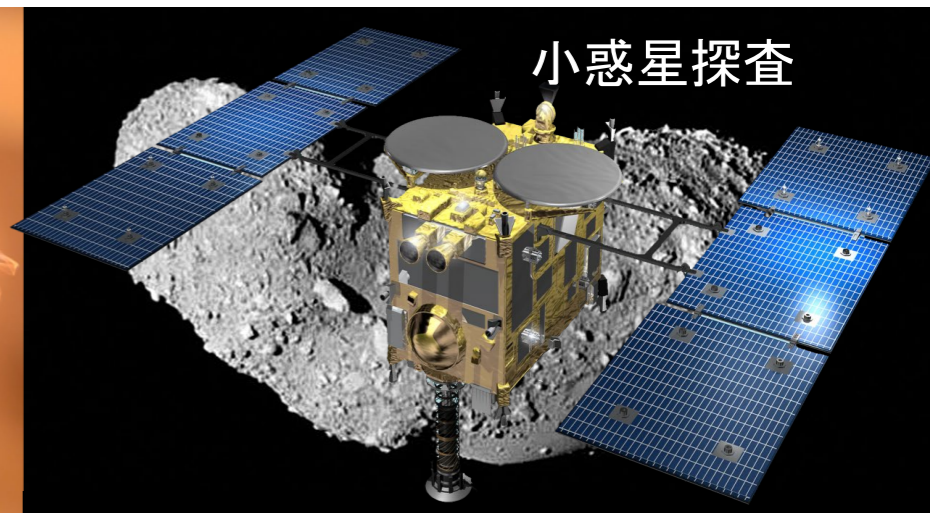
「地球-月での天体衝突現象の総合理解と生命起源の探求」を目的として、太陽系で最も始原的である小惑星・彗星・流星体といった太陽系小天体を対象に未解明サイエンスに取り組んでいる。



月面衝突閃光  
観測・探査



人工流星実験

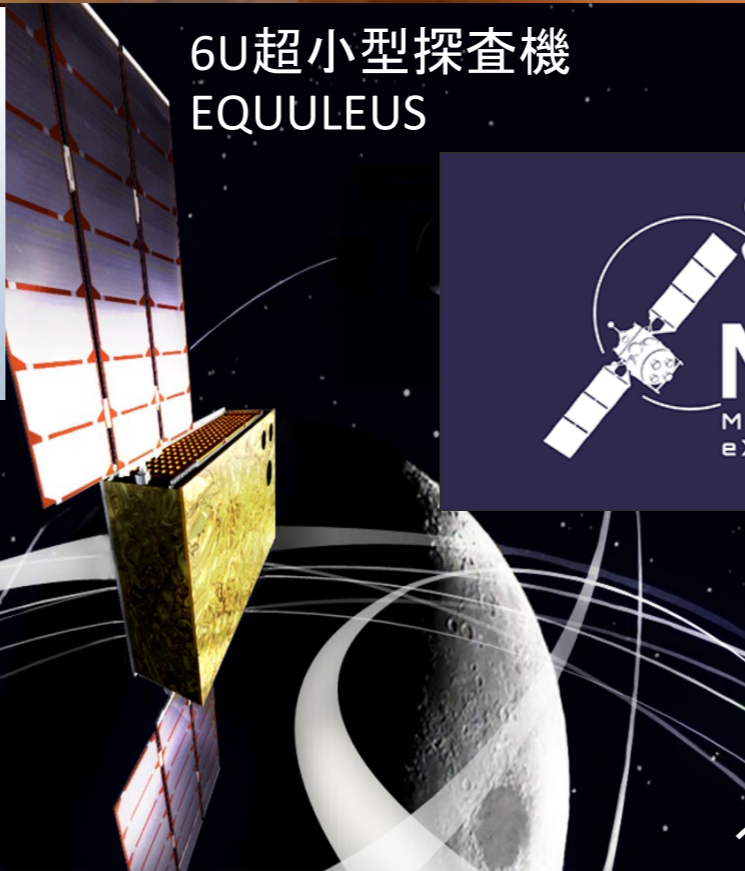


小惑星探査

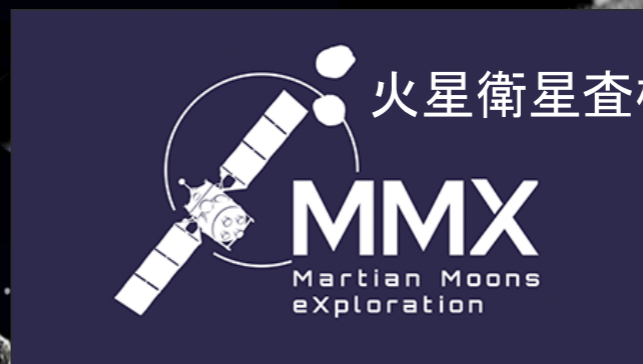


ALE

人工流れ星衛星



6U超小型探査機  
EQUULEUS



火星衛星査機

MMX  
Martian Moons  
exploration

超高速衝突発光実験

小惑星探査機  
HAYABUSA2

小惑星の望遠鏡観測



DESTINY+

ふたご流星群母天体・活動小惑星探査

# 2021 阿部研究室

## 宇宙科学研究室 *Space Science Laboratory*

### 1. 流星に関する研究

光学班；流星分光観測，人工流星実験

電波班；レーダー・電波と光学同時観測

開発班；観測カメラシステム開発

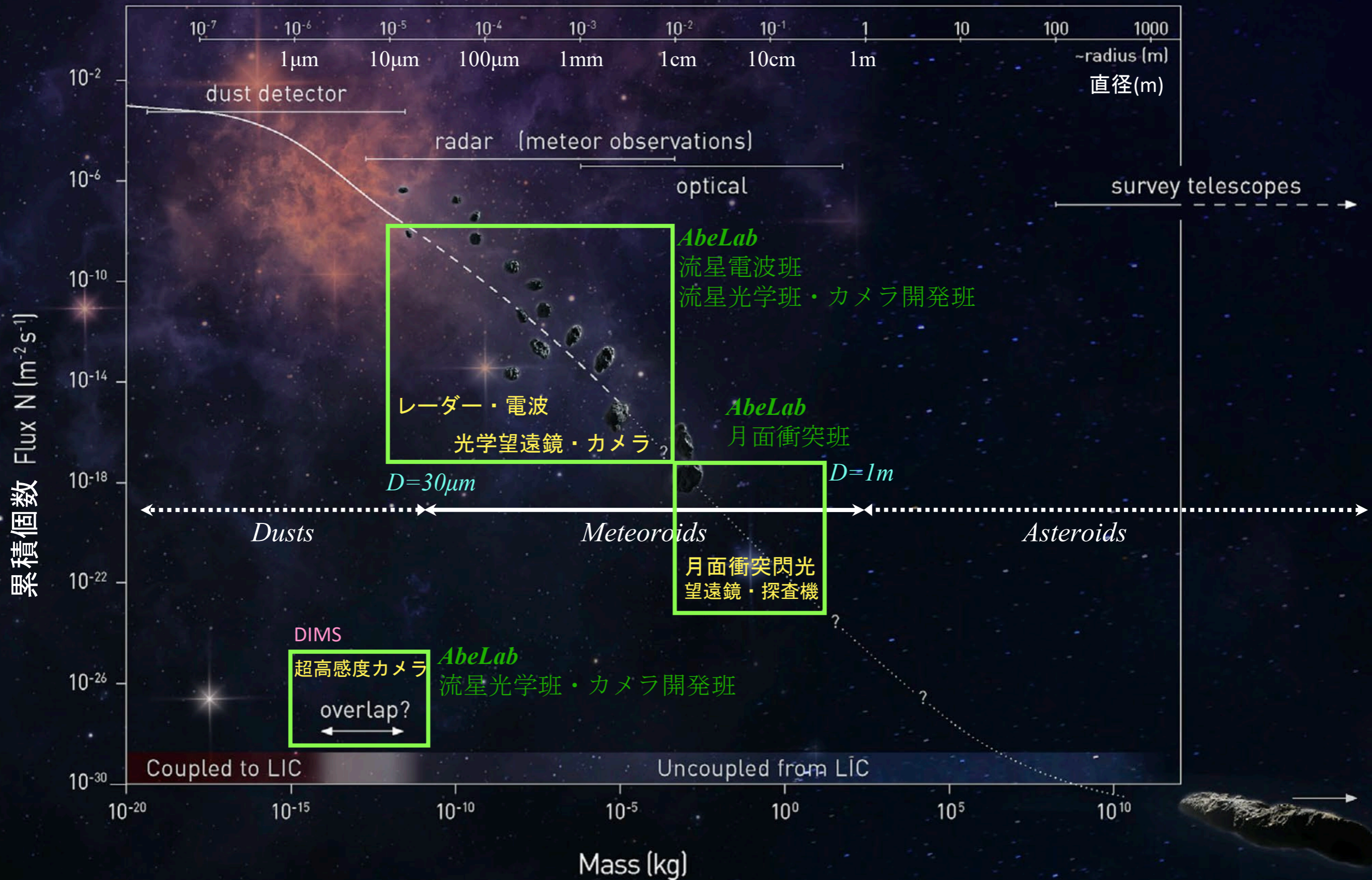
VR流星群シミュレーター開発

### 2. 月面衝突現象に関する研究

月面班；望遠鏡観測，超高速衝突実験

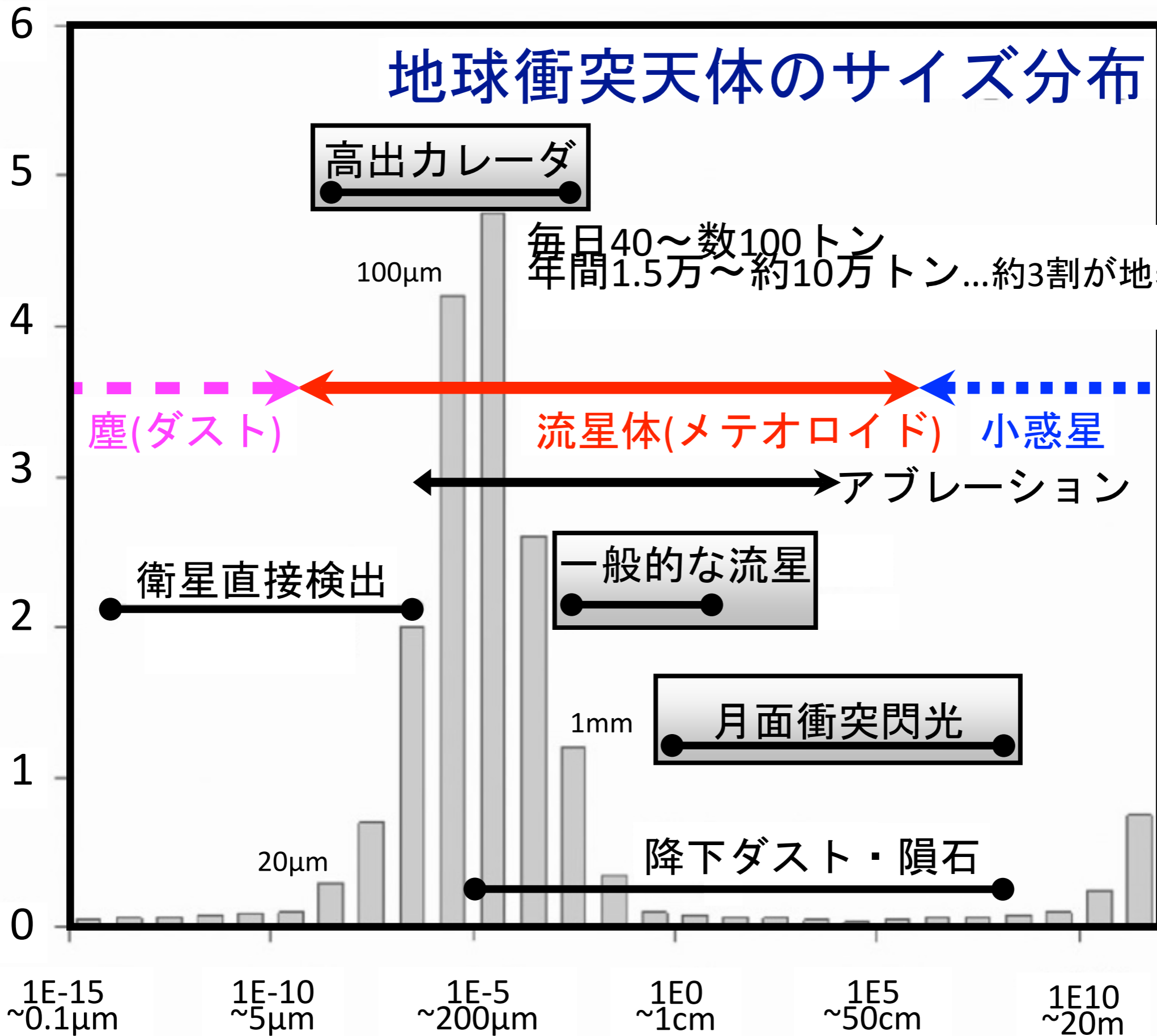
探査班；探査機観測(運用準備と打上げ)

# 太陽系内・太陽系外ダストのサイズ分布と観測手法

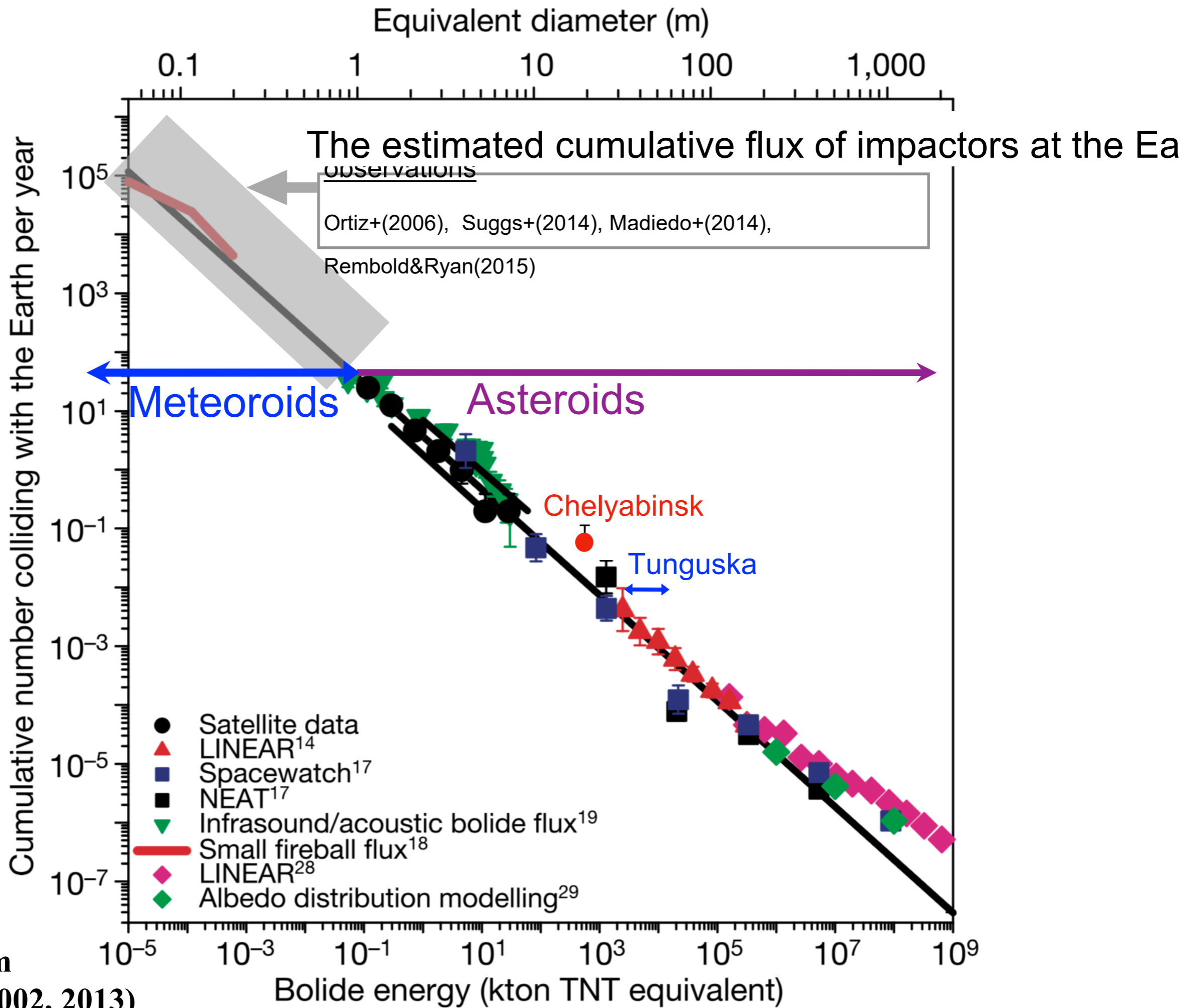


# 地球衝突天体のサイズ分布

1年間の地球降下量 [千トン]



上段: 質量 [g], 下段: 直径(仮定密度=2g/cm<sup>3</sup>)



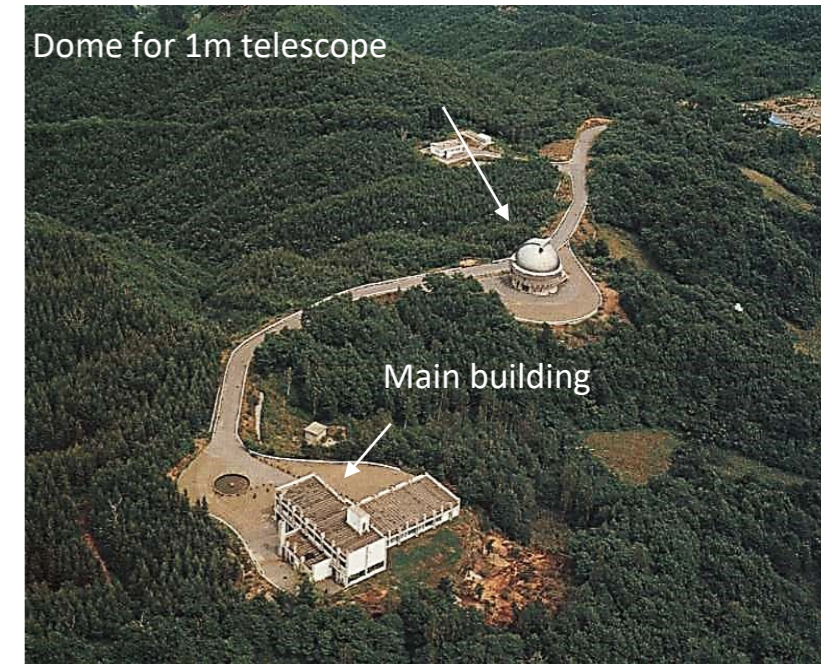
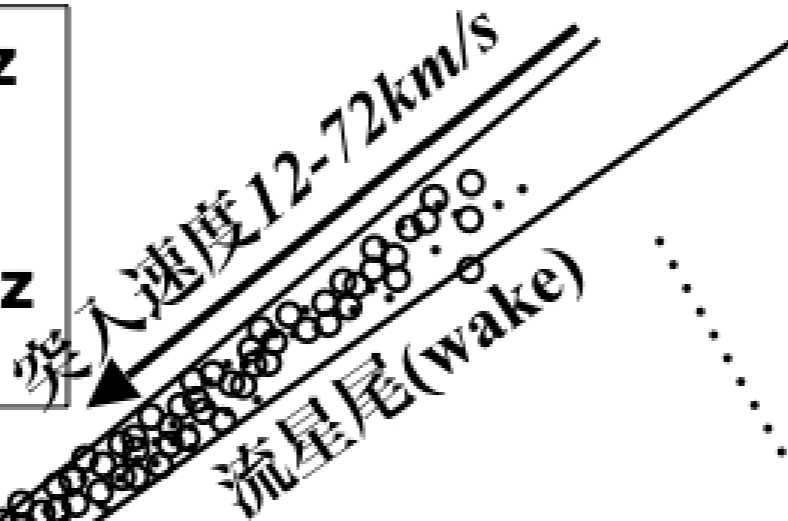
modified from  
P. Brown+ (2002, 2013)

# 微光流星の観測と軌道進化計算

共同研究; 東大・スウェーデン宇宙物理研究所・極地研・国立天文台・京大

観測対象; 散在流星 & ふたご座流星群

サンプル332Hz  
直径=103m  
視野角~8度  
周波数46.5MHz  
最大出力1MW



メテオロイド  
(直径10-100  $\mu\text{m}$ )  
流星ヘッドエコー

露光0.5秒  
口径=1.05m  
視野角~9度  
波長400-700nm  
最微等級~19等  
最微流星~13等

発光高度; 70-130km

475八木アンテナ  
19干涉計

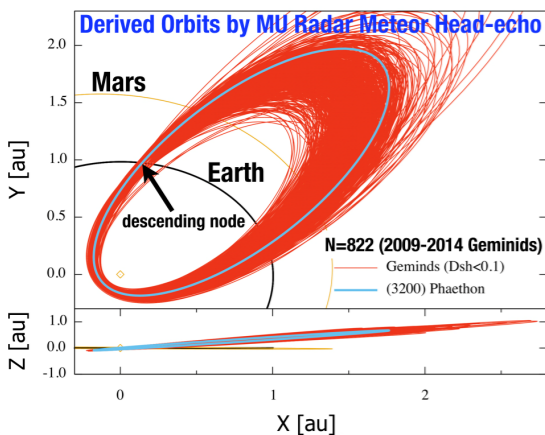
距離~173km

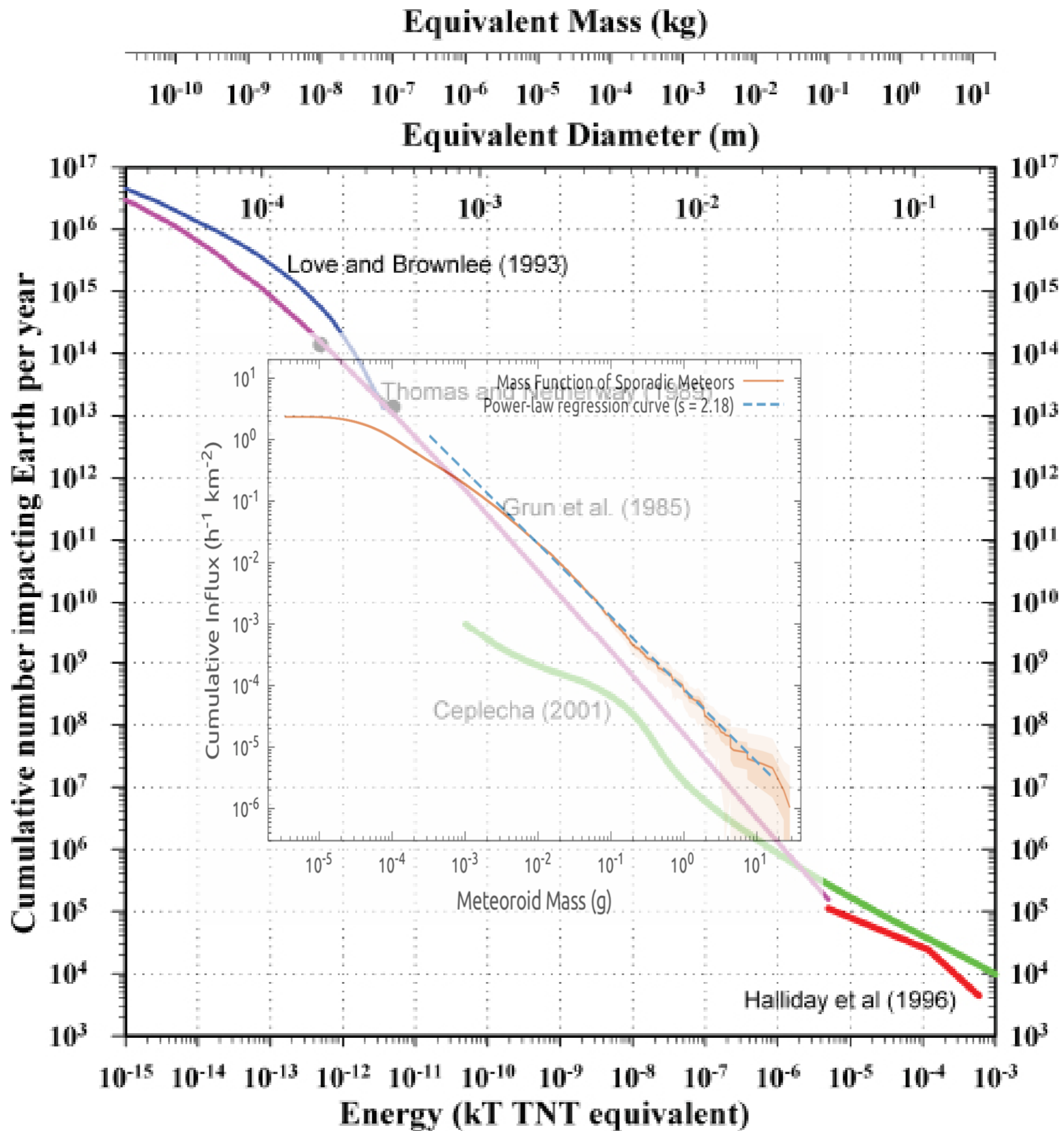
← Tomo-e Gozen



京大・MU レーダ観測所

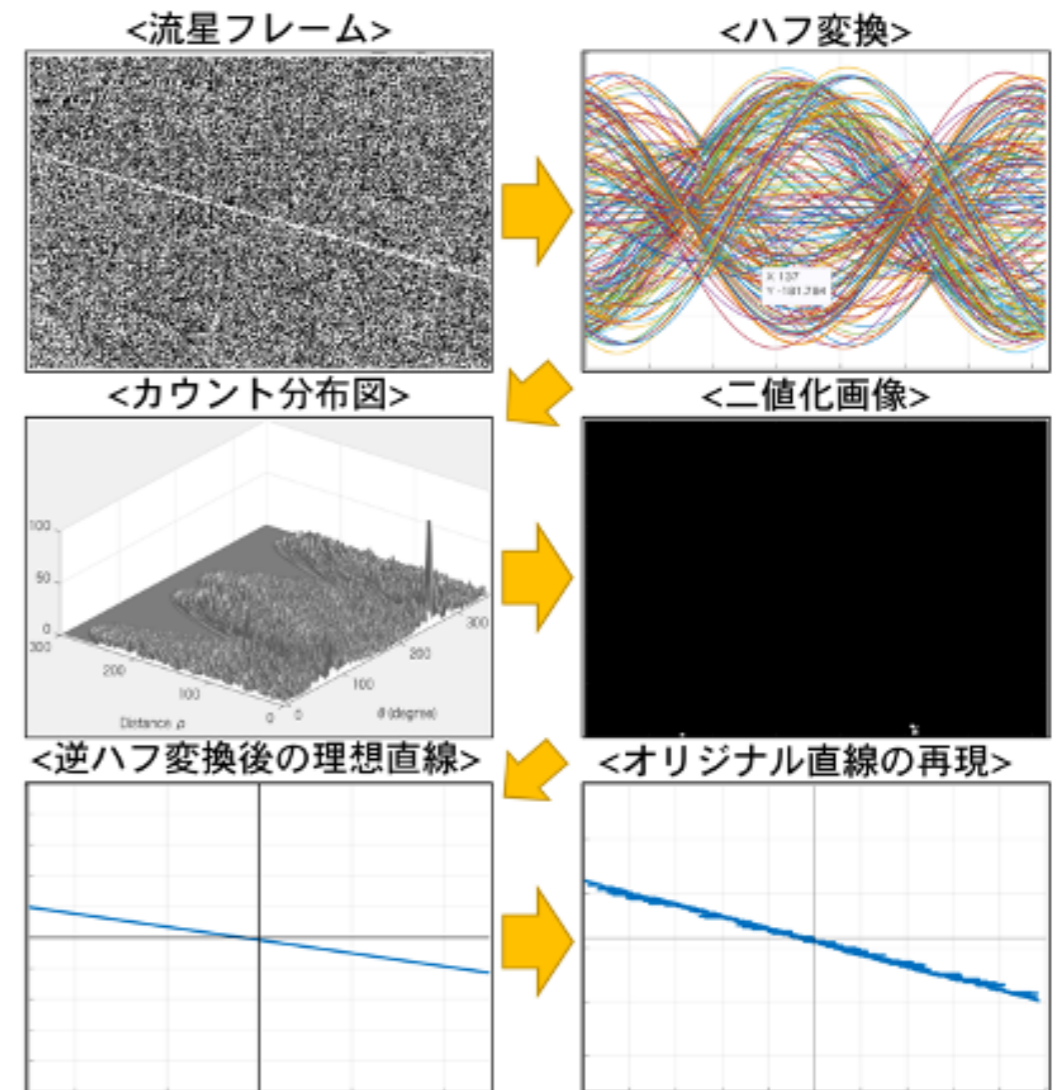
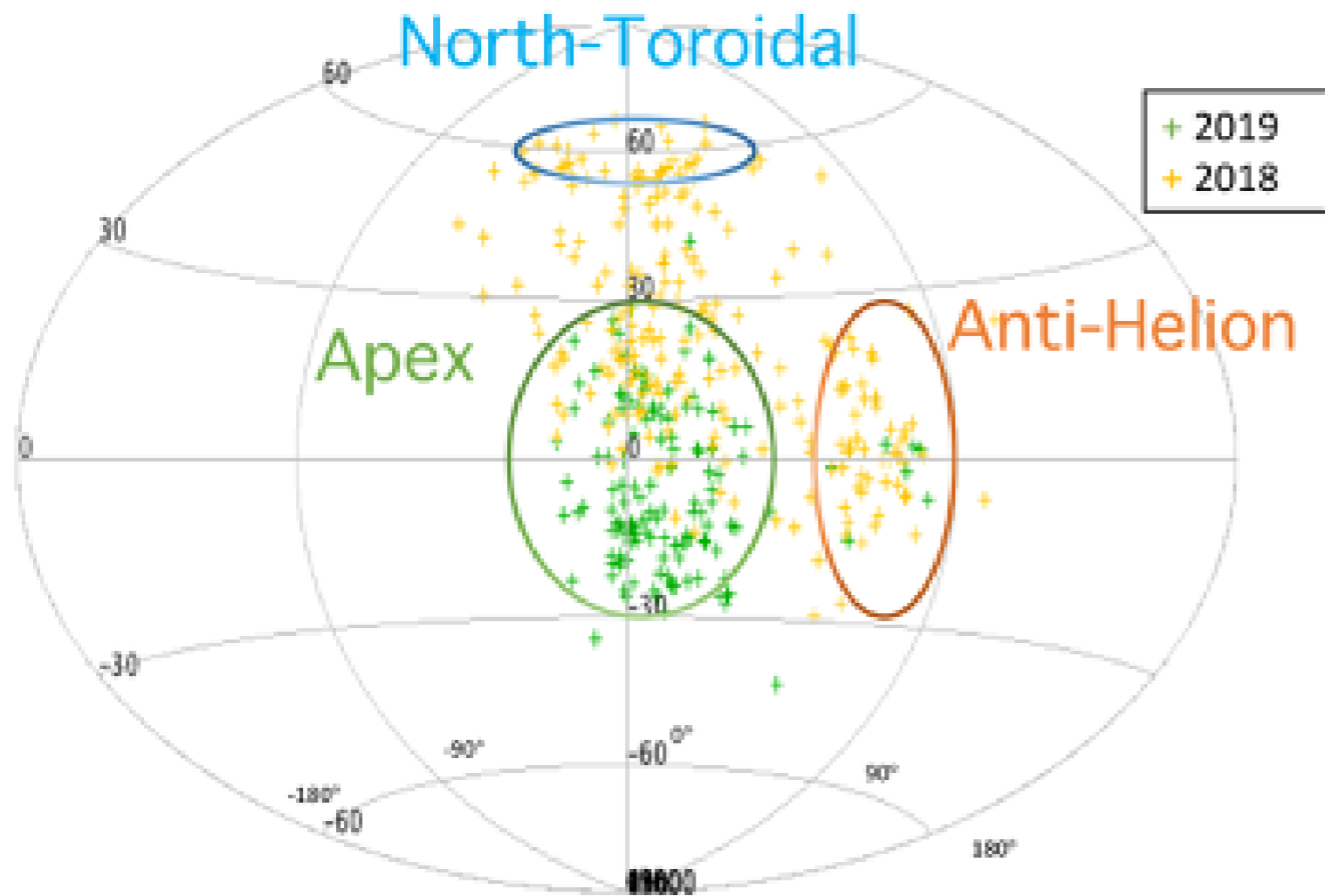
東大・木曾観測所



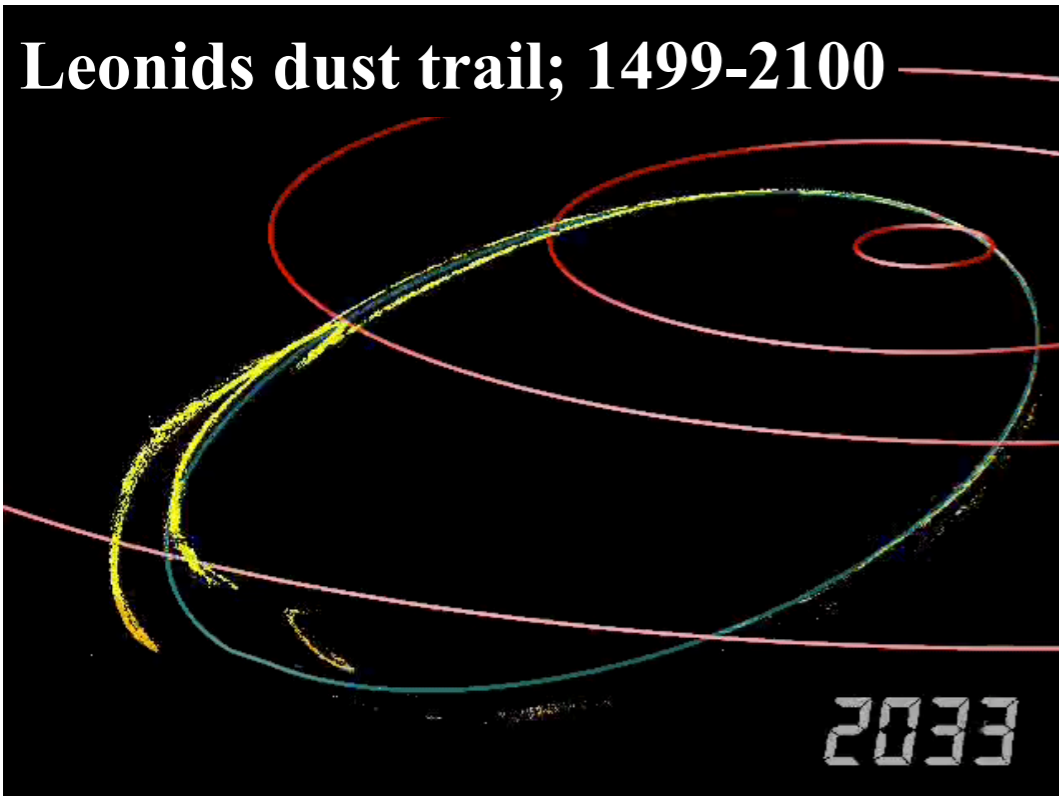




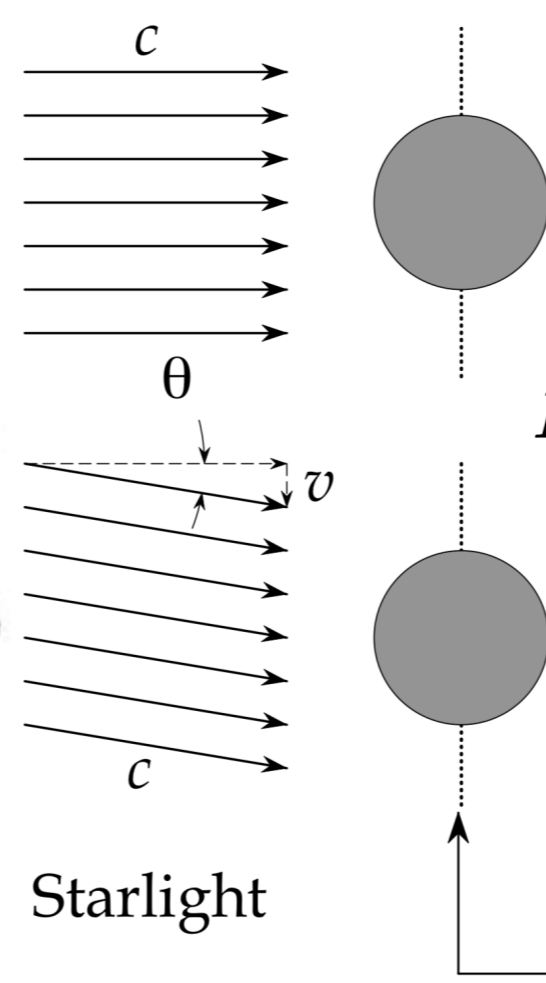
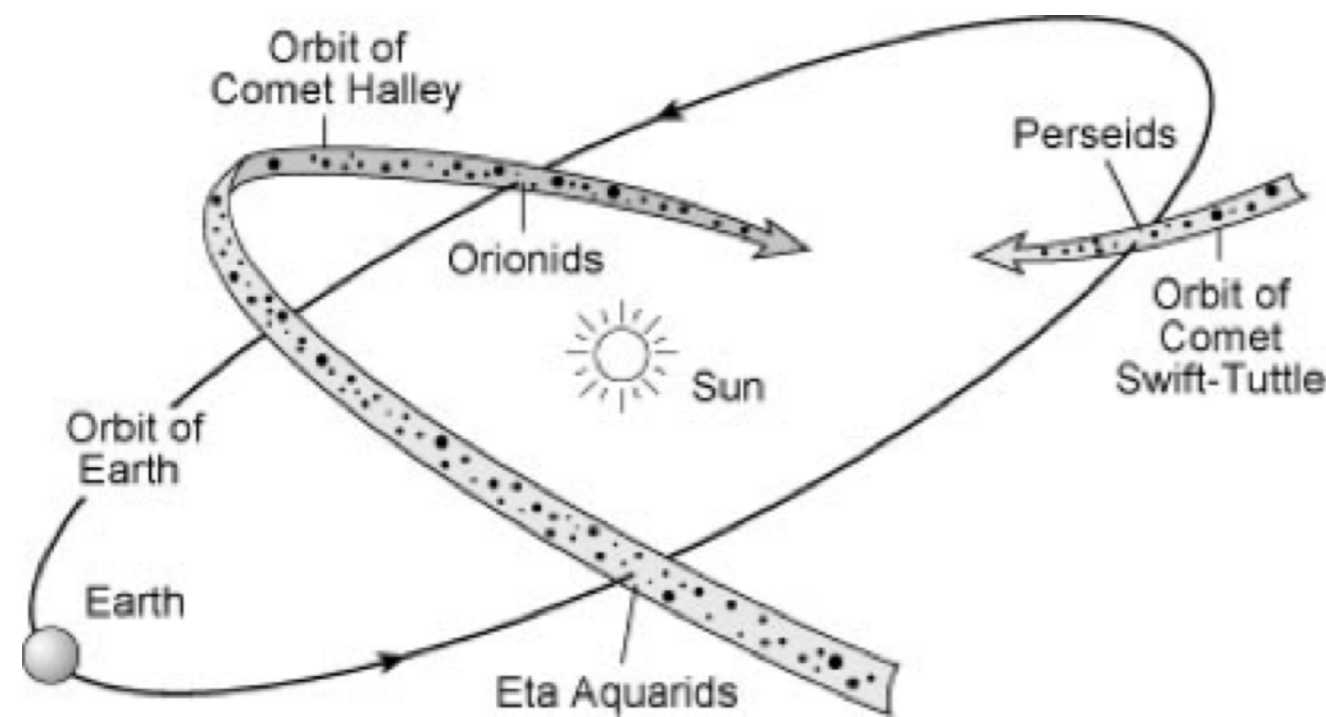
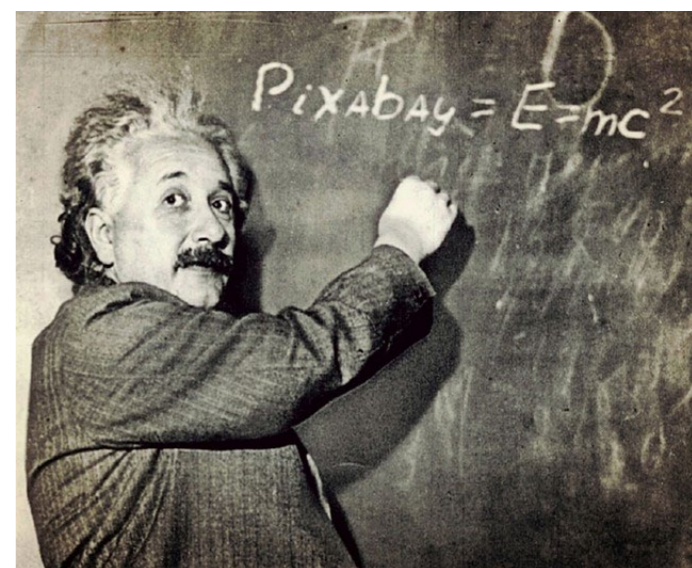
# Tomo-e Gozen 流星解析用のパイプラインを開発



基本的な運動は、ケプラー運動+惑星摂動  
 太陽輻射圧と相対論を考慮した軌道進化計算が必要な場合がある  
 特に微光流星や太陽接近軌道で効く  
 Considering Poynting-Robertson & Post-Newtonian effects



Once mass(size) is determined by MU-Tomo-e observations, non-gravitational effects can be considered for small particles.



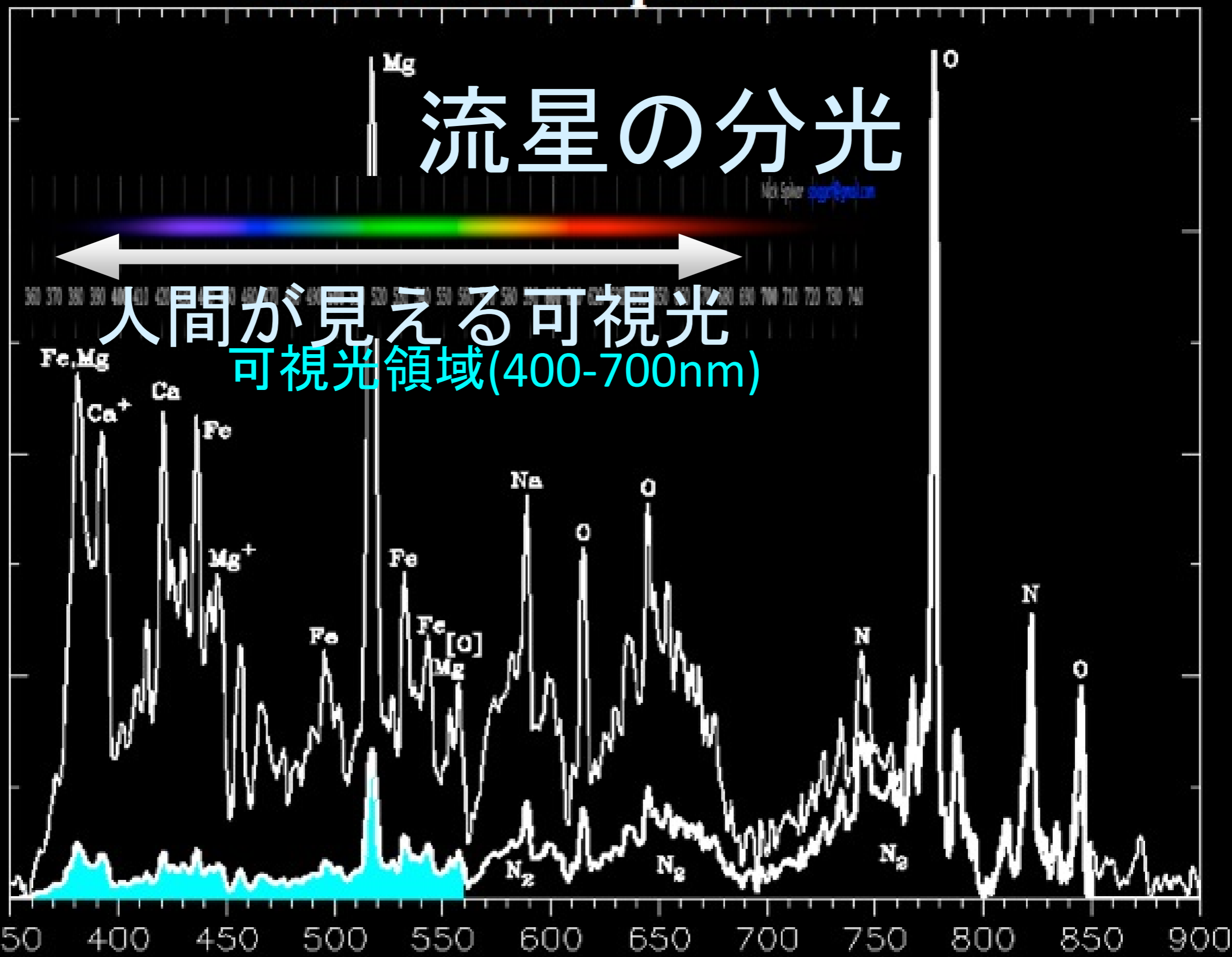
$$F_{PR} = \frac{v}{c^2} W = \frac{r^2 L_s}{4c^2} \sqrt{\frac{GM_s}{R^5}}$$

$$\beta = \frac{F_r}{F_g} = \frac{3LQ_{PR}}{16\pi GMcp_s}$$

# Leonid Meteor Spectrum

## 流星の分光

Relative & Calibrated Intensity

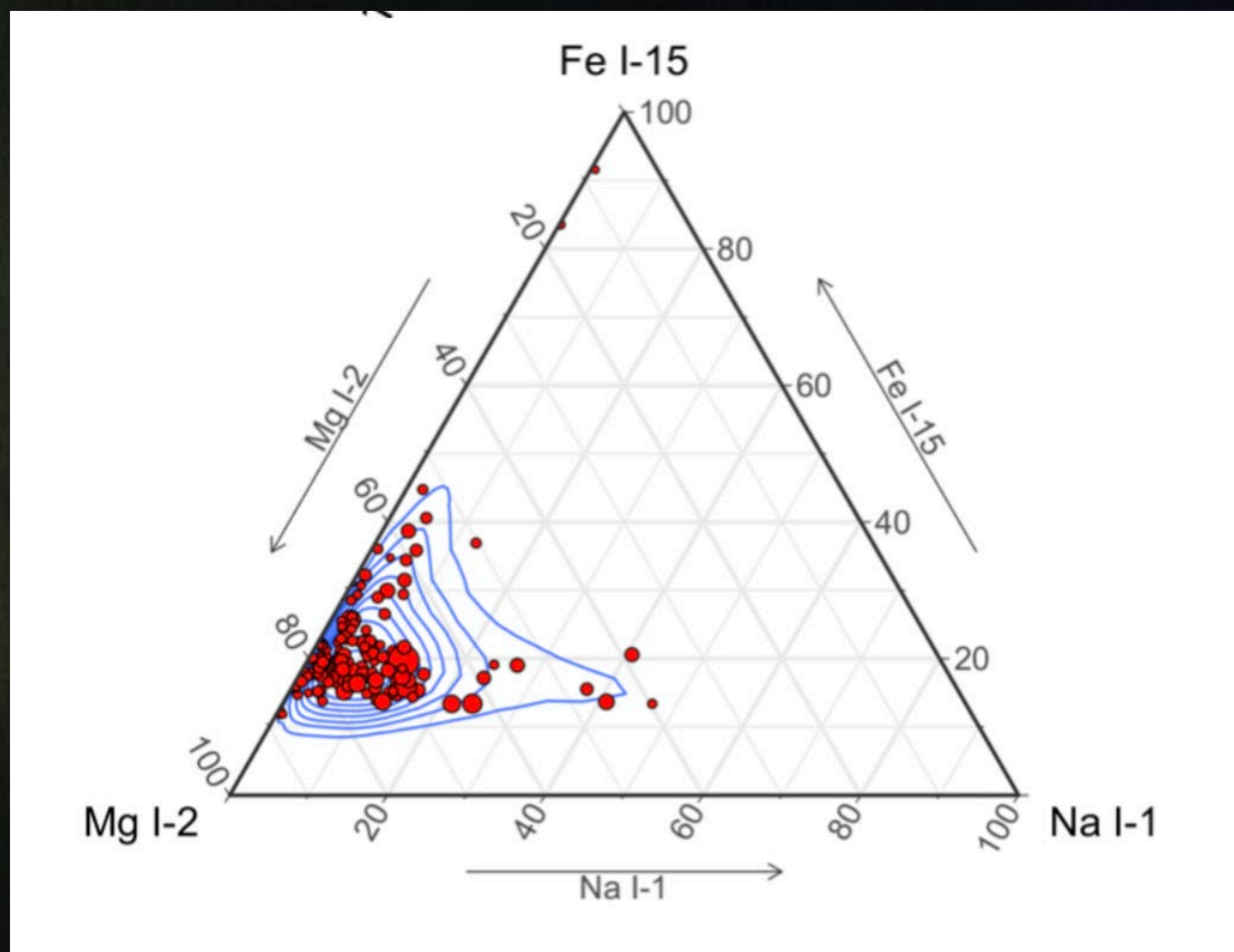
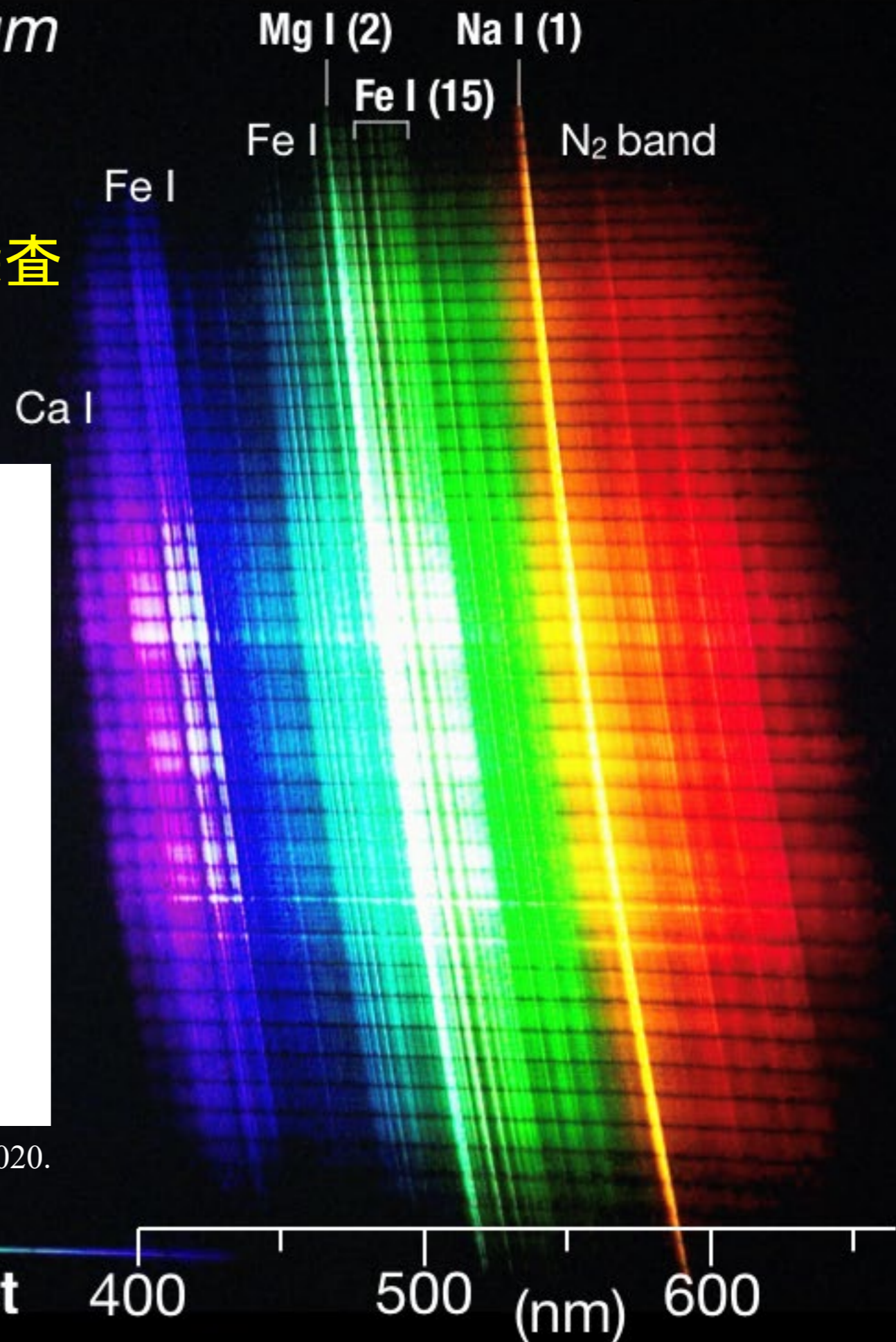


# 2018 Geminid Meteor Spectrum



SONY  $\alpha 7 S$   
600/mm grating

## 流星分光 間接的な母天体探査



Abe, Ogawa, Maeda and Arai, 2020.

0th

stellar object

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

# Planetary and Space Science

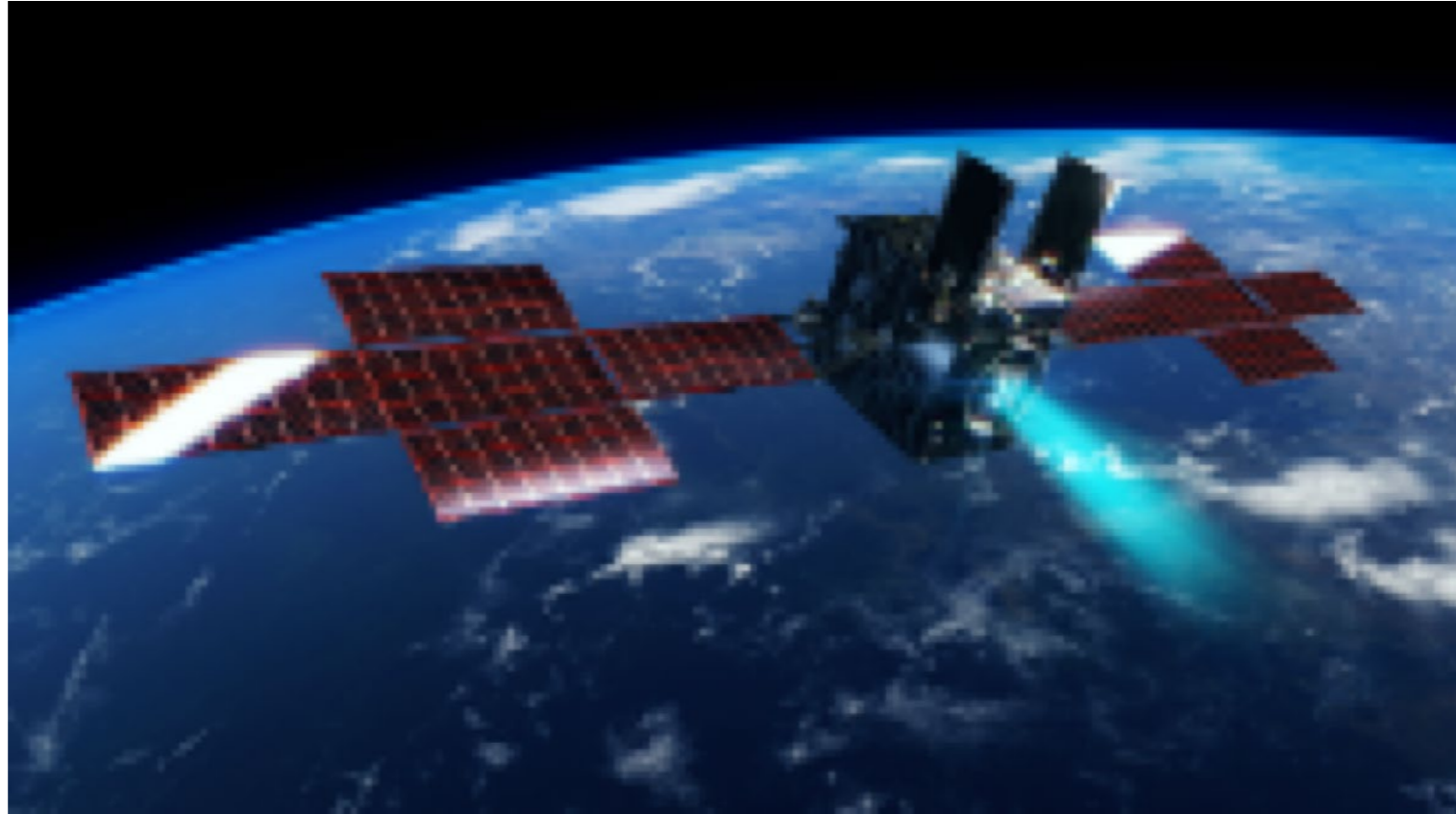
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/pss](http://www.elsevier.com/locate/pss)

## Sodium variation in Geminid meteoroids from (3200) Phaethon

Shinsuke Abe<sup>a,\*</sup>, Takumi Ogawa<sup>a</sup>, Koji Maeda<sup>b</sup>, Tomoko Arai<sup>c</sup><sup>a</sup> Department of Aerospace Engineering, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501, Japan<sup>b</sup> Faculty of Engineering, University of Miyazaki, 1-1 Gakuen-Kibanadai-Nishi, Miyazaki, 889-2192, Japan<sup>c</sup> Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Tsudanuma 2-17-1, Narashino, Chiba, 2750016, Japan

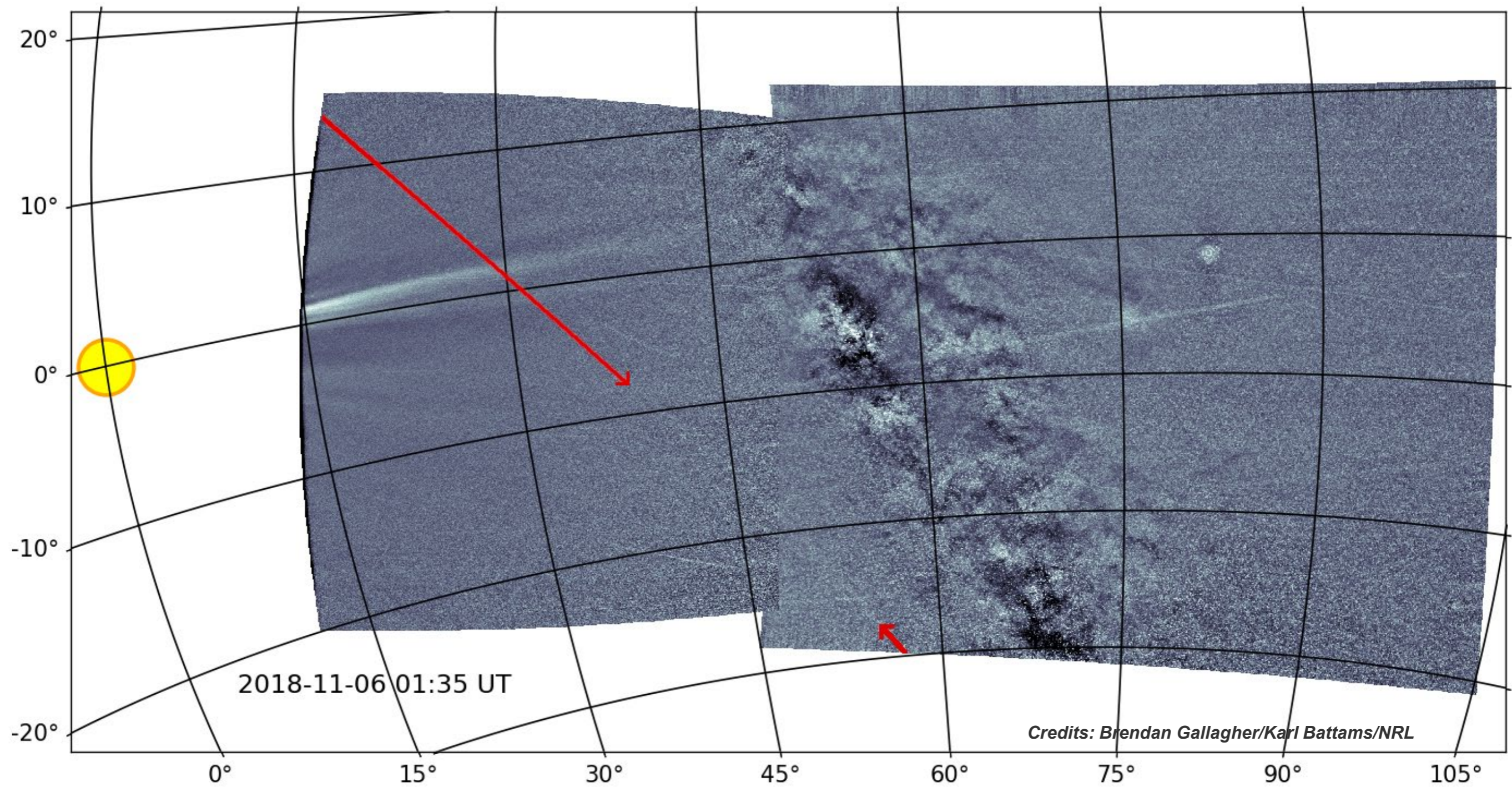
- 汎用高感度カラーCMOSカメラ(SONY α7S)のS-log撮影と新たに開発した解析手法により, 2017-2018年に149個の「ふたご座流星群」可視スペクトルデータを観測し, Fe-Mg-Naの発光強度比とこれらの流星発光中の時間変化について解析を行った.
- 約80%の「ふたご座流星群」の含有ナトリウム量は枯渇(強度比10%以下)しているが, 統計的にみると, ナトリウム量の優位な変化が見られた.
- 活動小惑星(3200) Phaethon (ファエトン) から放出された流星体のナトリウムの枯渇度合いは, 流星体の明るさ(サイズ)に依存し, 小さな流星体ほどNaだけが大きく枯渇していることが示された. これは, 0.14 auの近日点付近の太陽加熱の影響により740-1100K程度まで流星体ダストが高温になり, 揮発性物質が失われるプロセスが働いていることで説明される.
- また, 2018年「ふたご座流星群」の中に, 3つの鉄流星が初めて見つかった.

# DESTINY+



「はやぶさ」、「はやぶさ2」に続く日本の小惑星探査計画は、2024年度の打上げを目指している深宇宙探査技術実証機「DESTINY+（デスティニープラス）」である。このミッションでは、ファエトンの高速フライバイ追尾撮像を行うと共に、日心距離1天文単位付近の宇宙塵やファエトン周辺の大塵粒子の物理化学特性を直接分析する。活動小惑星から放出されるダストの組成を明らかにすることは、地球の水の起源や太陽系初期の微惑星形成過程の理解にも繋がる重要な探査である。

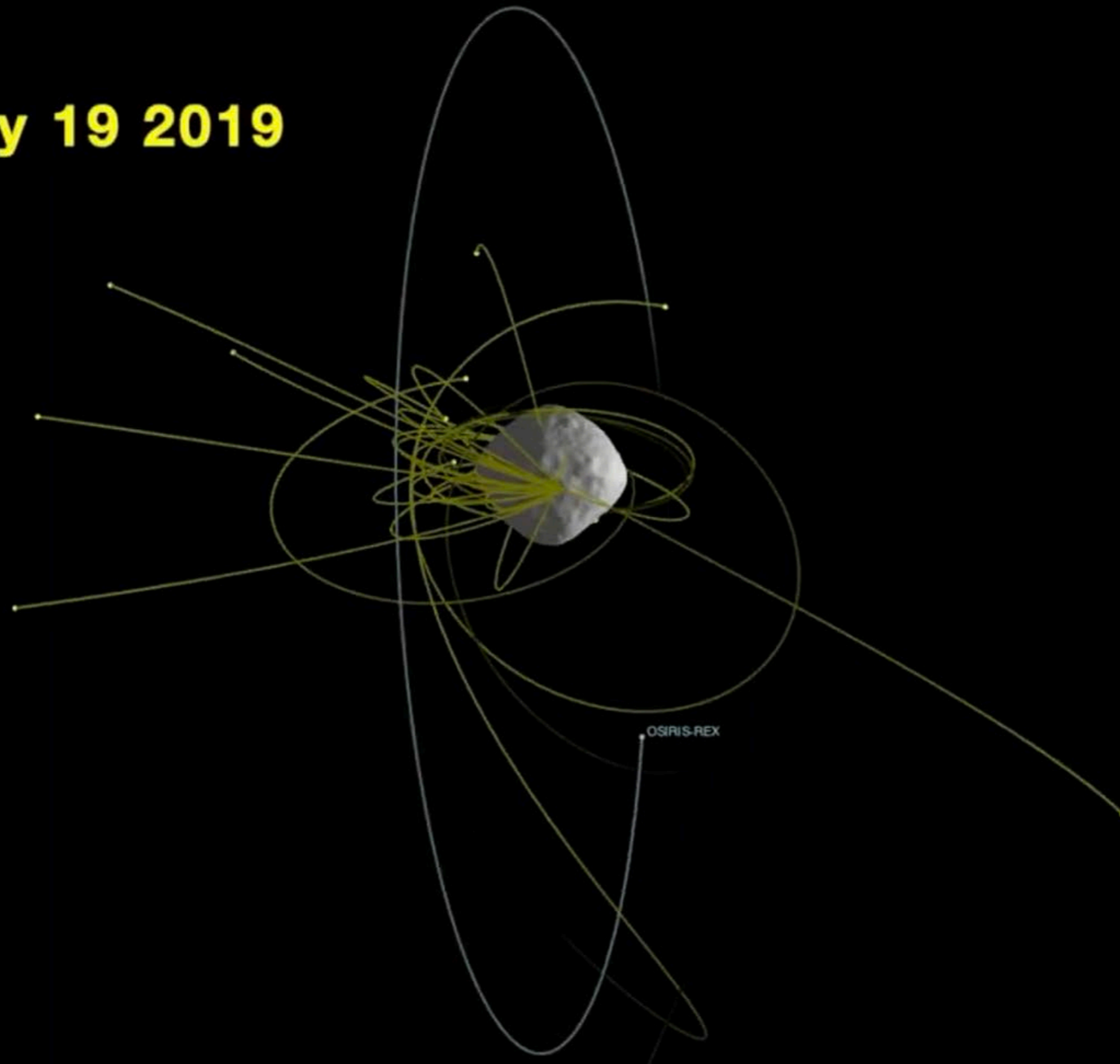
DESTINY+探査機は、イプシロン級ロケットで地球周回長楕円軌道へ打ち上げられた後、イオンエンジンを使い約2年かけて地球を周回しながら徐々に高度を上げ、月の重力を利用してファエトンに向かう軌道に移り、さらに約2年かけてファエトンに接近する。



Parker Solar Probe's WISPR instruments captured the first-ever view of a dust trail in the orbit of asteroid Phaethon. This dust trail creates the Geminids meteor shower. We provide details on the detection of a visible white-light dust trail in the orbit of (3200) Phaethon, a large near-Earth "activated" asteroid known to be the parent of the

# NASA OsirisRex がとらえた、B型(活動)小惑星 Bennuからのダスト放出

**January 19 2019**



OSIRIS-REX



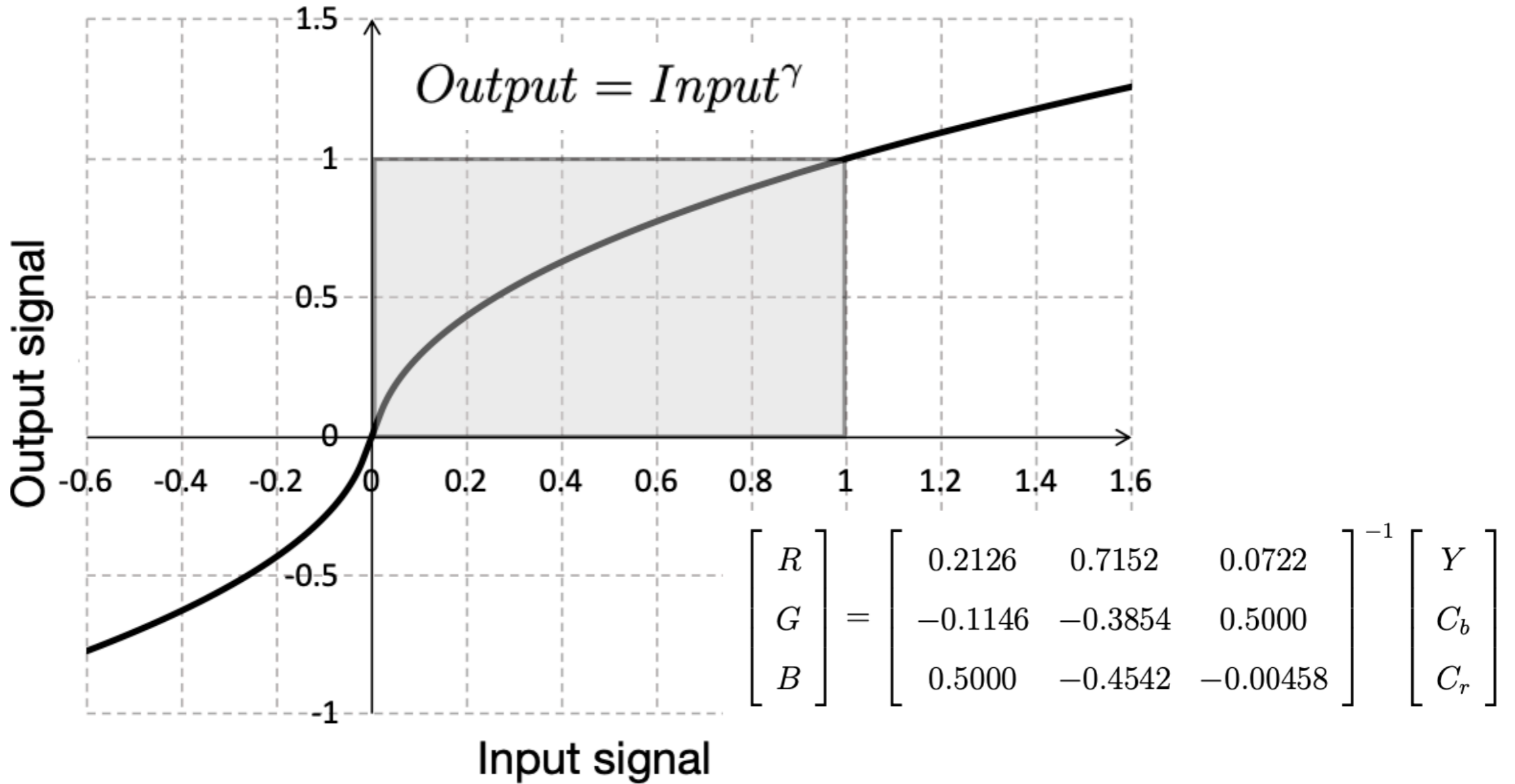


Figure 2: Photoelectric conversion characteristics of xvYCC<sub>709</sub> standard. The new standard xvYCC<sub>709</sub> expands the input signal range outside (0 – 1) which was used in the traditional BT.709 standard ( e.g. HDTV (1920 × 1080) format) .

# 解析手法

今回用いたカメラはカラーCMOSカメラであるため、RGB各色での測光値を感度曲線で除することでスペクトルを得ることができる

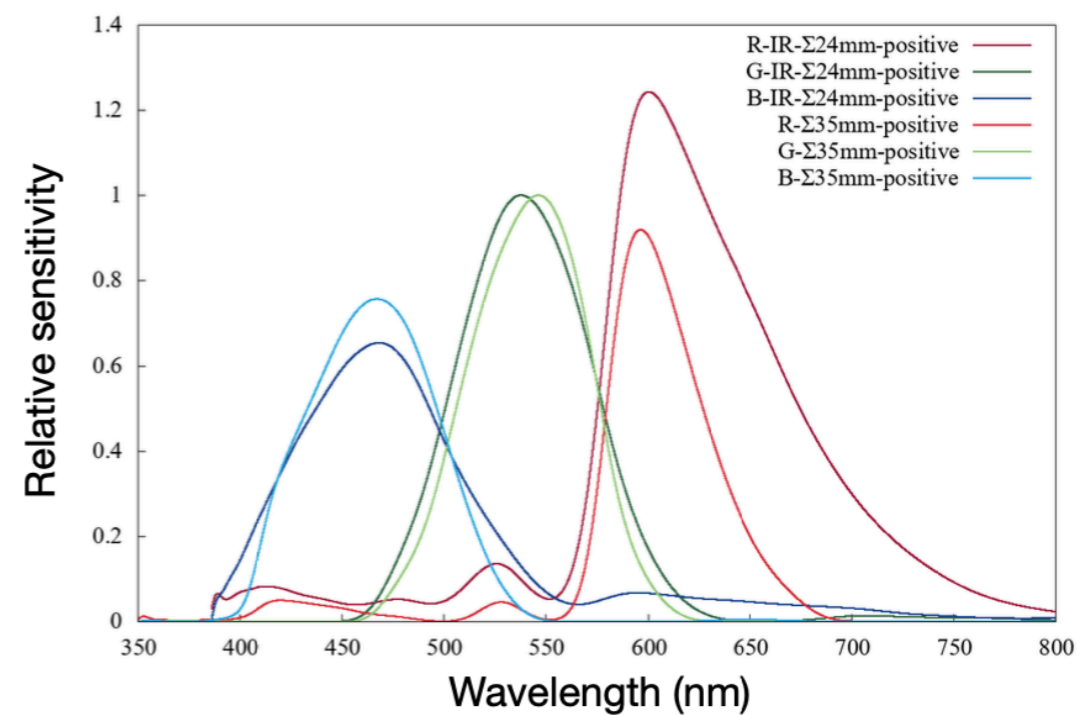
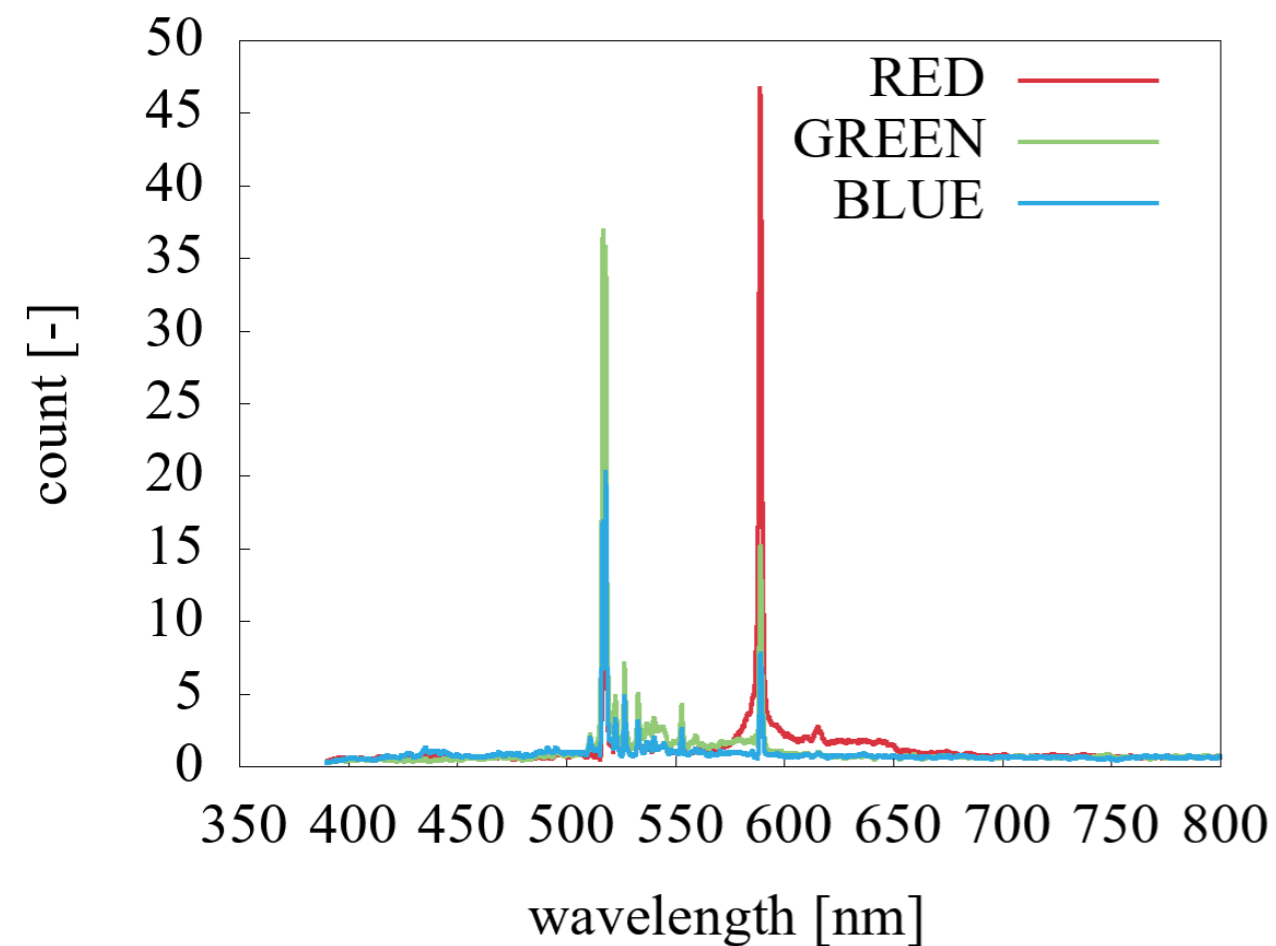
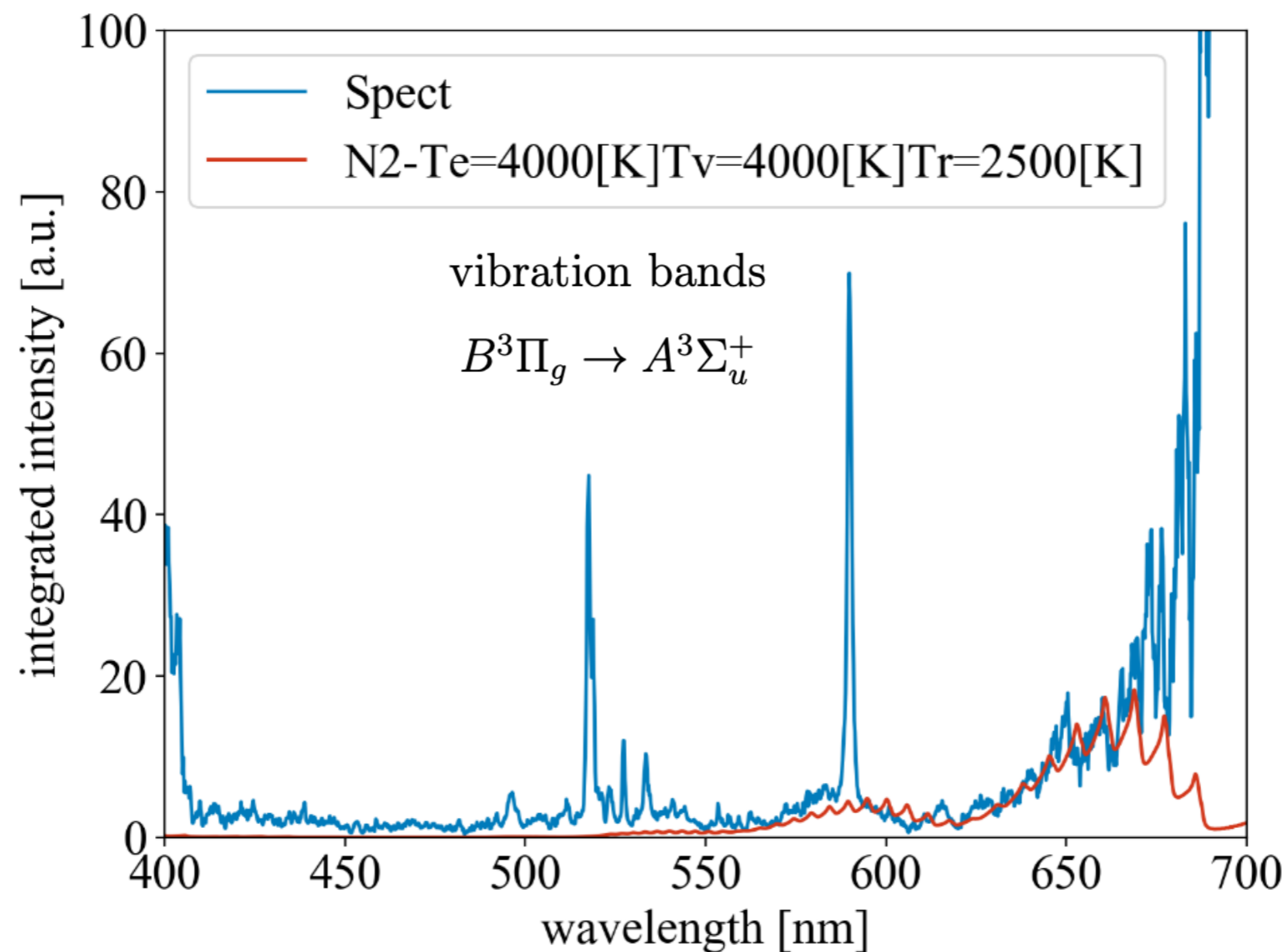
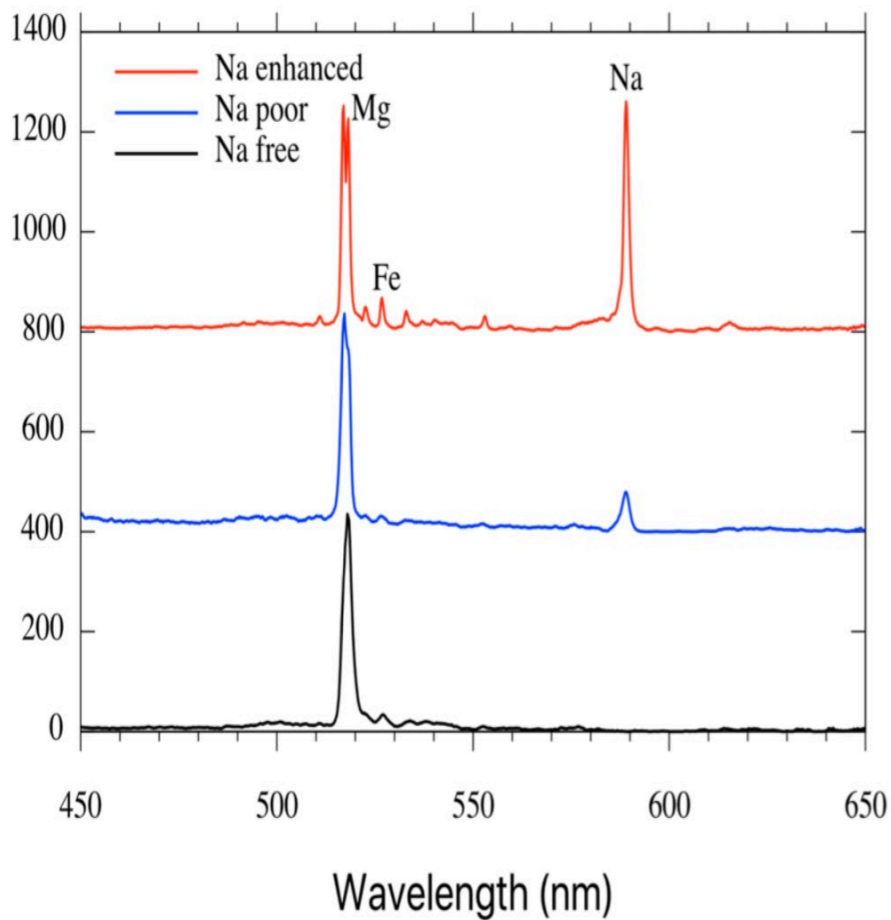


Figure 3: The 1st order of RGB relative spectral sensitivities of SONY  $\alpha$ 7S (ILCE-7S), standard and replacing IR-cut filter, with SIGMA 24mm and 35 mm lenses. The incident angle of the light source is vertical. The curves have been normalized to unity at the maximum of G-filter.

# 解析手法

続いて、窒素の分子バンドの強度を測定する輻射予測コード「SPRADIAN」(Fujita & Abe, 1997)を用いて推定を行った



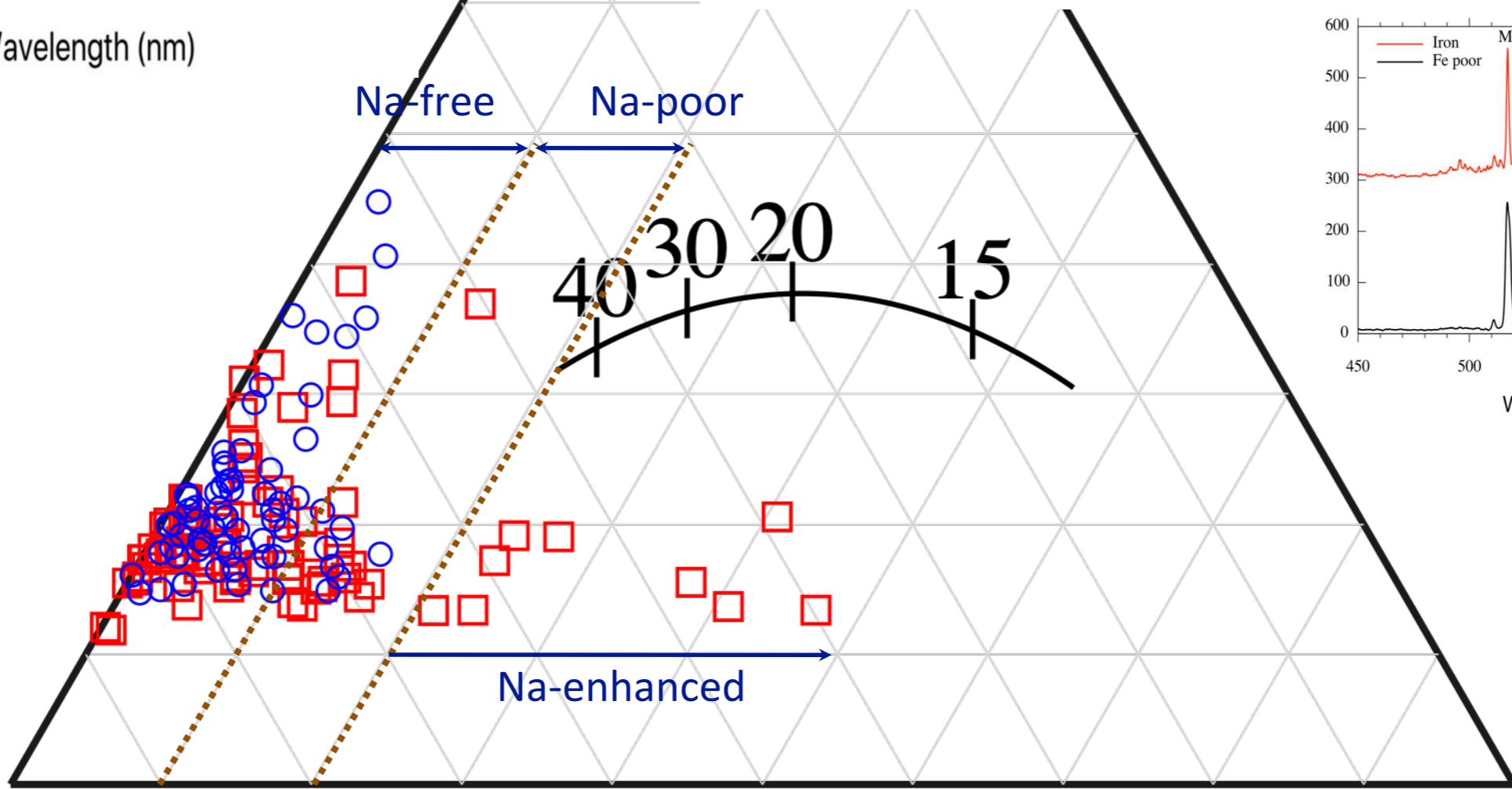
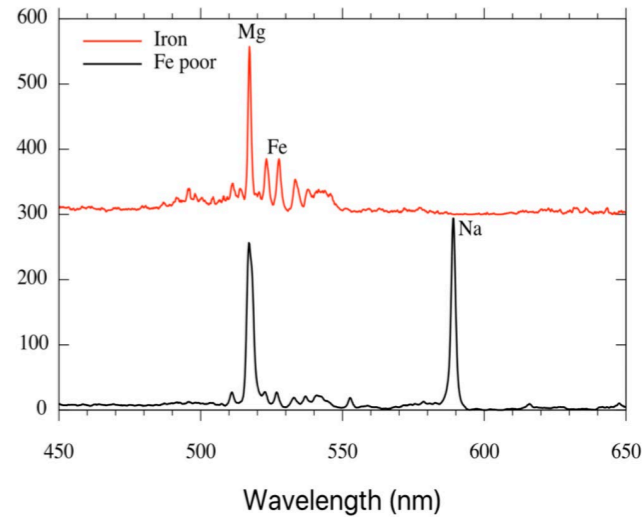


# Fe I-15

○ 2017 (n=65)  
 □ 2018 (n=84)

| Classification               | Number | Na I (%)        | Mg I (%)       | Fe I (%)       |
|------------------------------|--------|-----------------|----------------|----------------|
| Na-free                      | 114    | $3.7 \pm 2.6$   | $75.1 \pm 6.4$ | $21.2 \pm 6.0$ |
| Na-poor                      | 24     | $12.8 \pm 1.7$  | $70.0 \pm 4.6$ | $17.6 \pm 4.6$ |
| Na-enhanced                  | 9      | $31.8 \pm 9.6$  | $52.1 \pm 9.7$ | $16.1 \pm 2.9$ |
| Iron                         | 2      | $0.37 \pm 0.28$ | $12.1 \pm 6.0$ | $87.6 \pm 5.7$ |
| Fe-poor*                     | 9      | $31.8 \pm 9.6$  | $52.1 \pm 9.7$ | $16.1 \pm 2.9$ |
| Solar abundance <sup>◇</sup> | —      | 24              | 40             | 36             |

Wavelength (nm)



Mg I-2

Na I-1

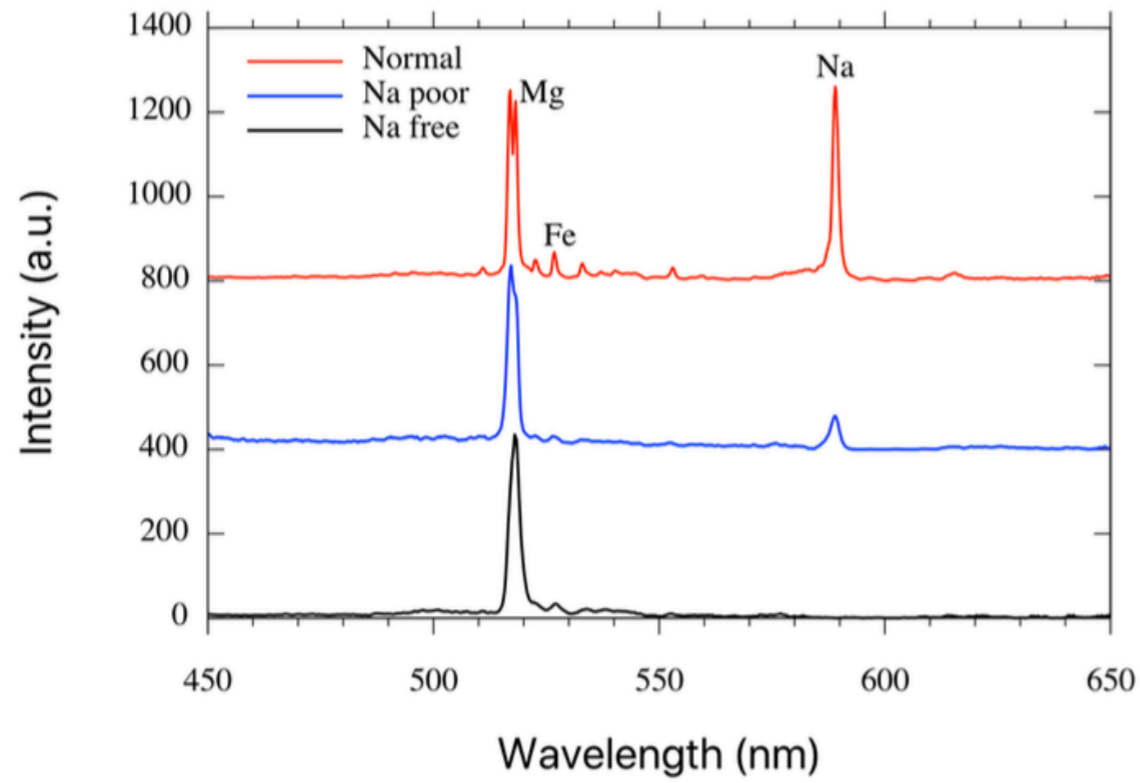


Figure 6: Na-free, Na-poor and normal spectra of the Geminids. Intensity is normalized by the maximum intensity of Mg. Each spectrum is shifted by 400 lines for clarity.

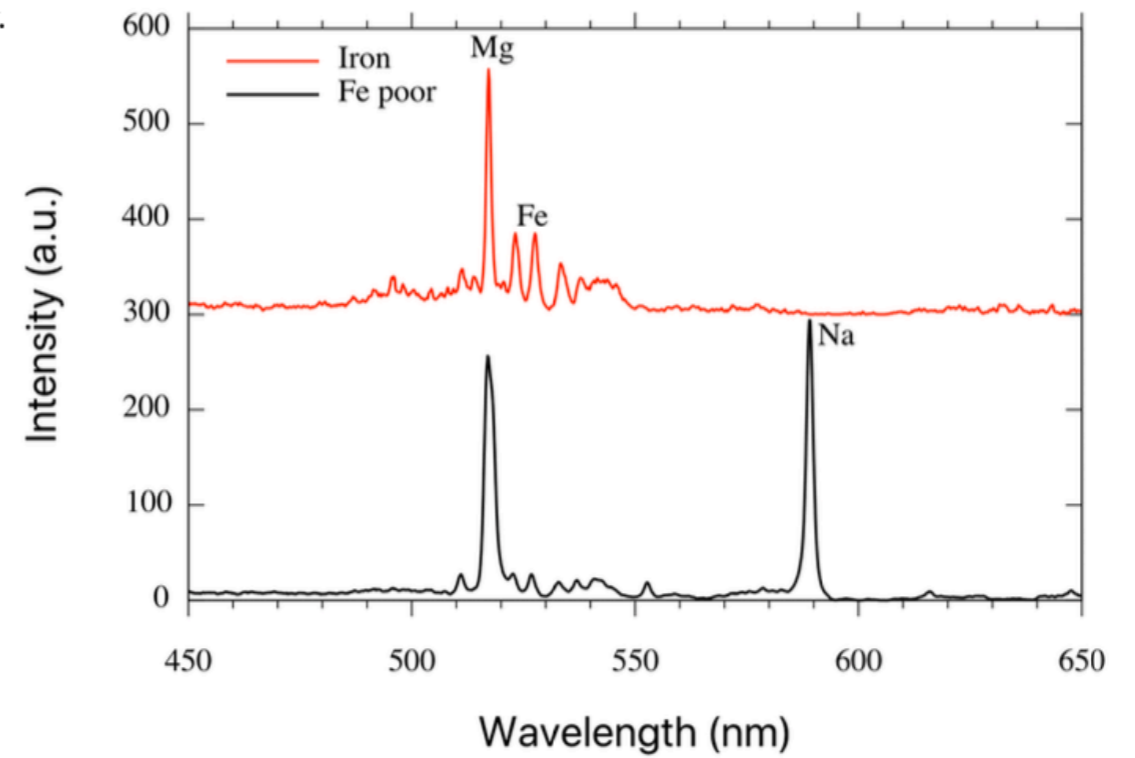


Figure 7: Iron and Fe-poor spectra of the Geminids. Intensity is normalized by the maximum intensity of Mg. Each spectrum is shifted by 300 lines for clarity.

Table 3: Na-Mg-Fe variations in the Geminid meteoroids.

| Classification               | Number         | Na I (%)        | Mg I (%)       | Fe I (%)       |
|------------------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| Na-free                      | 114            | $3.7 \pm 2.6$   | $75.1 \pm 6.4$ | $21.2 \pm 6.0$ |
| Na-poor                      | 24             | $12.8 \pm 1.7$  | $70.0 \pm 4.6$ | $17.6 \pm 4.6$ |
| Fe-poor                      | 9              | $31.8 \pm 9.6$  | $52.1 \pm 9.7$ | $16.1 \pm 2.9$ |
| Iron                         | 3 <sup>†</sup> | $0.37 \pm 0.28$ | $12.1 \pm 6.0$ | $87.6 \pm 5.7$ |
| Solar abundance <sup>‡</sup> | —              | 24              | 40             | 36             |

<sup>†</sup> A saturated iron meteor among three was excluded.

<sup>‡</sup> Assuming entry speed of  $35 \text{ km s}^{-1}$  on the line of Fig. 5 for the Geminids.

(a) Na-free Geminids; The Na line is almost missing except iron Geminids.

Na < 10%, while Fe/Mg ratio varies widely.

(b) Na-poor Geminids; The Na line is fainter than the expected chondritic value.  $10\% < \text{Na} < 20\%$ .

(c) Fe-poor Geminids; The Iron lines are very faint among normal Geminids whose Na/Mg ratio is normal.

(d) Iron Geminids; The Iron lines is dominant. Presence of Mg line but Na line is nonexistent.

Note that the Fe/Mg ratio is lower than solar in all groups except Irons.

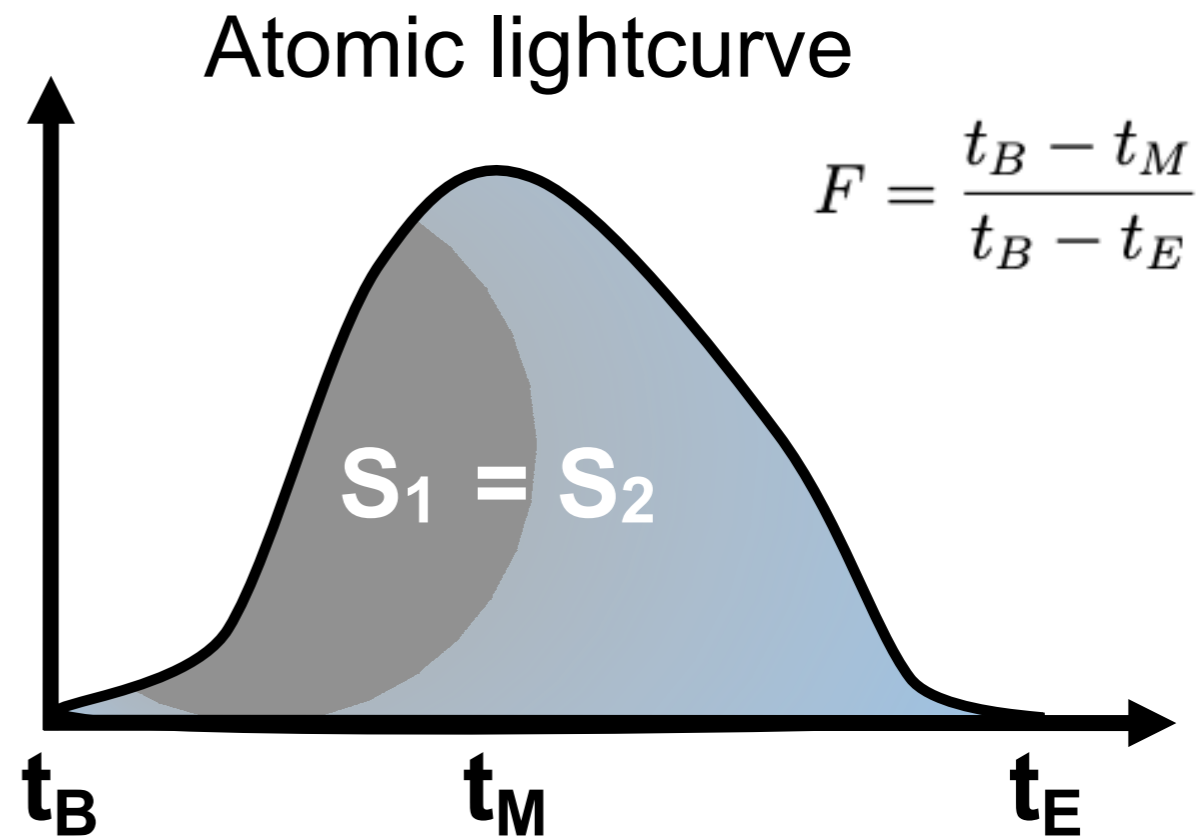
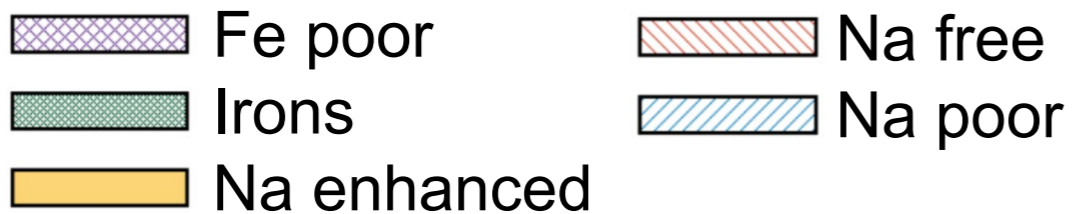
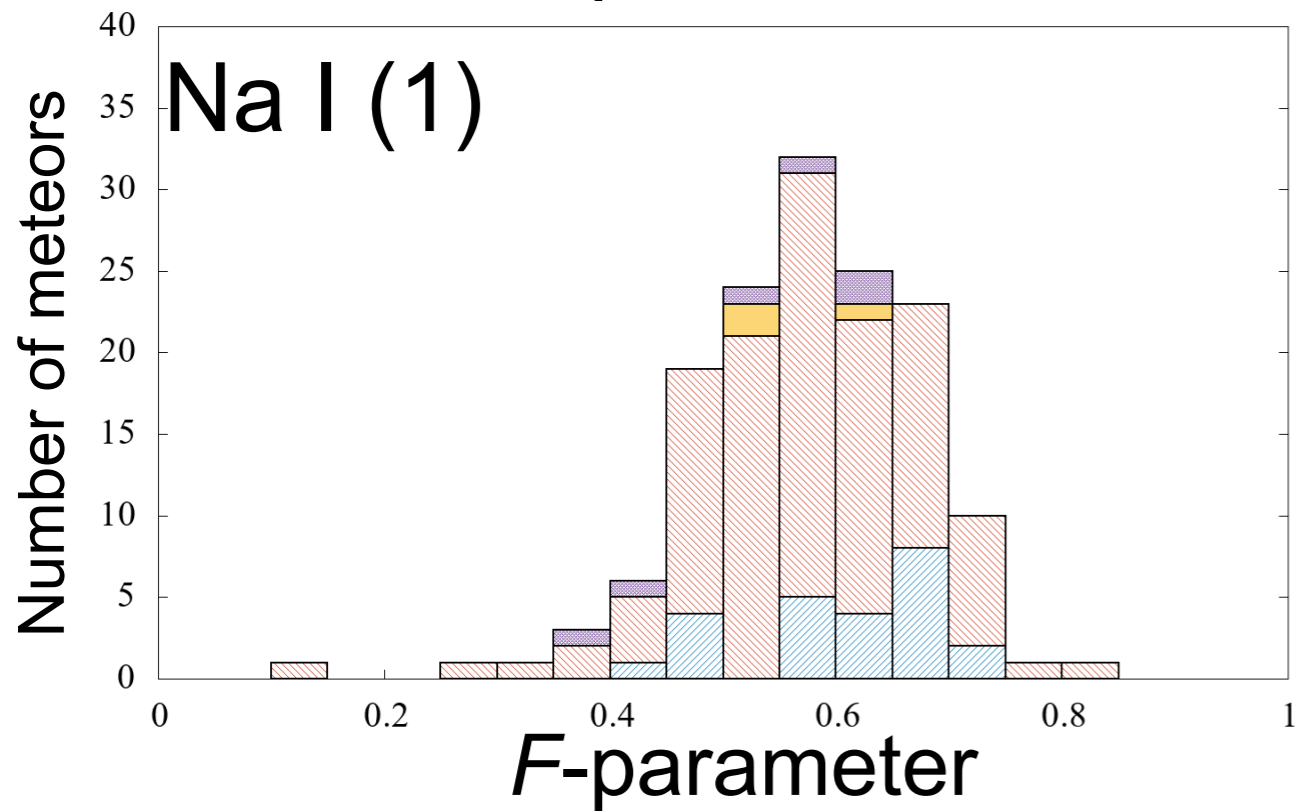
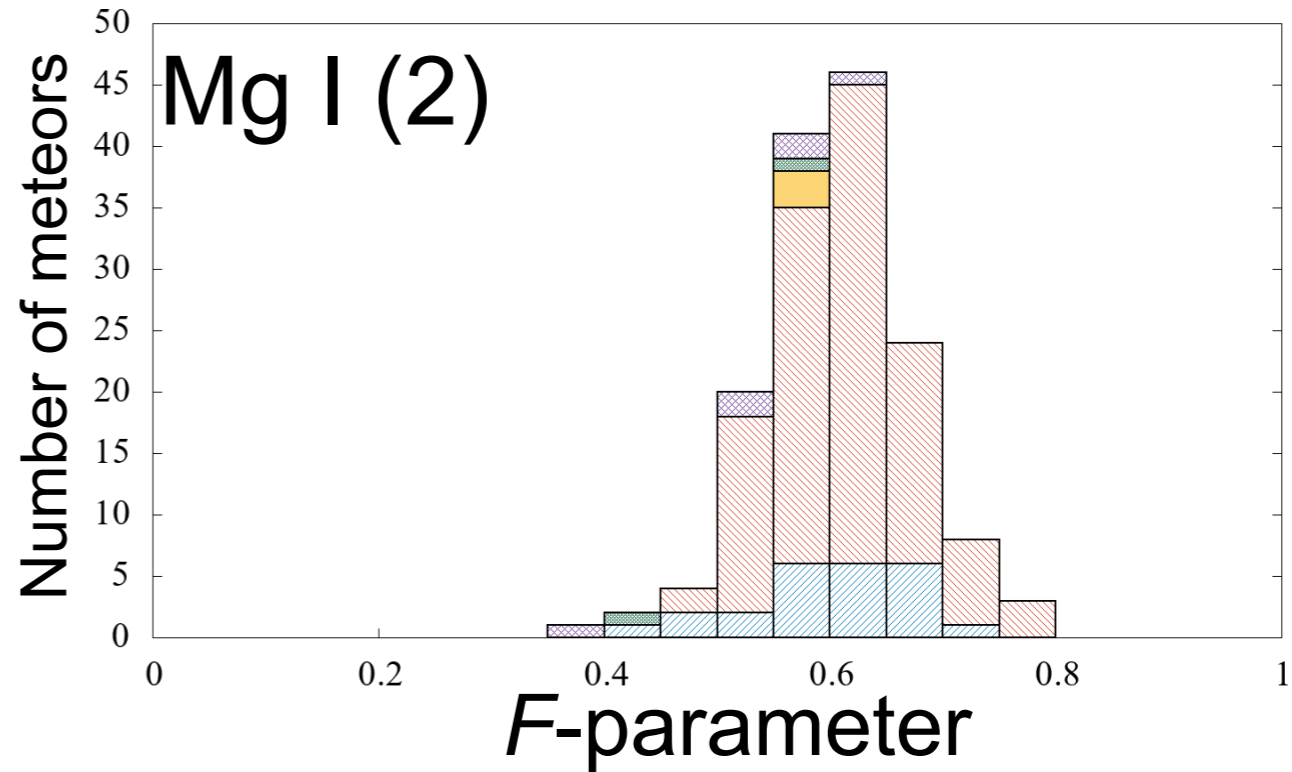
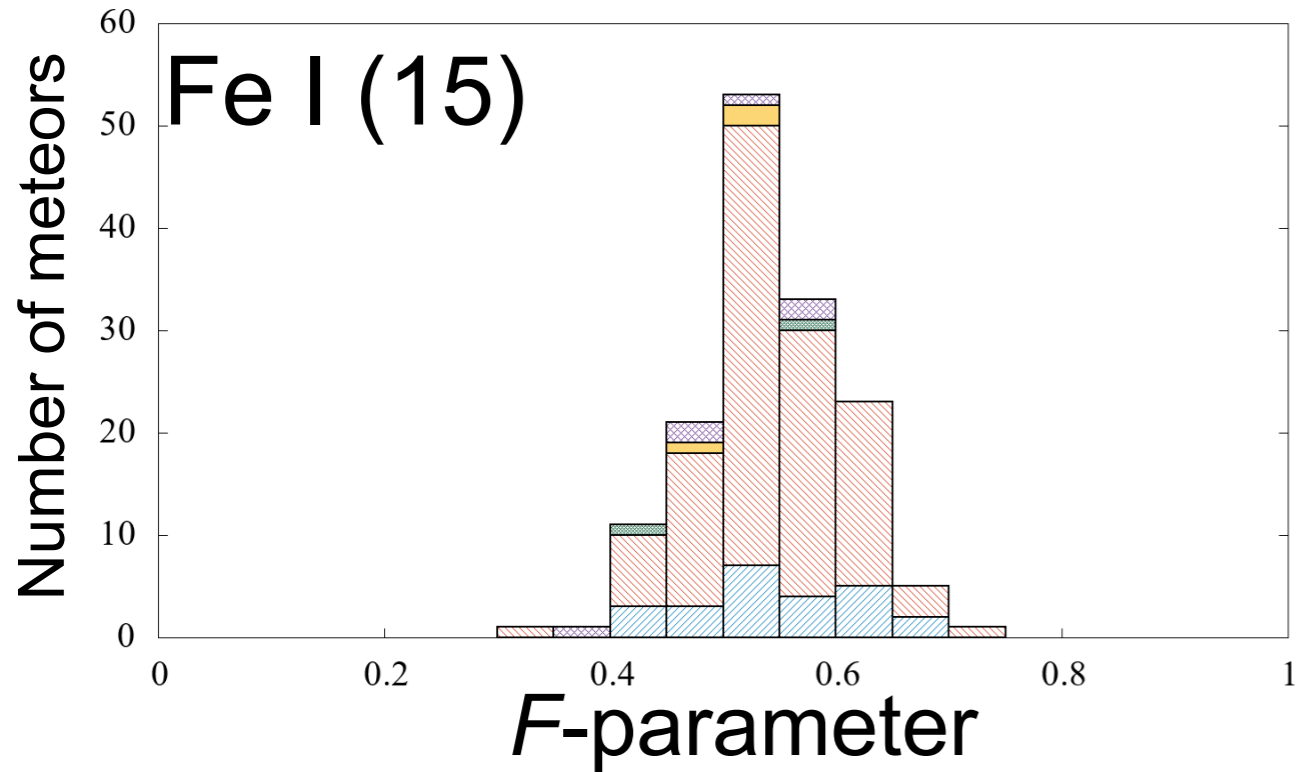


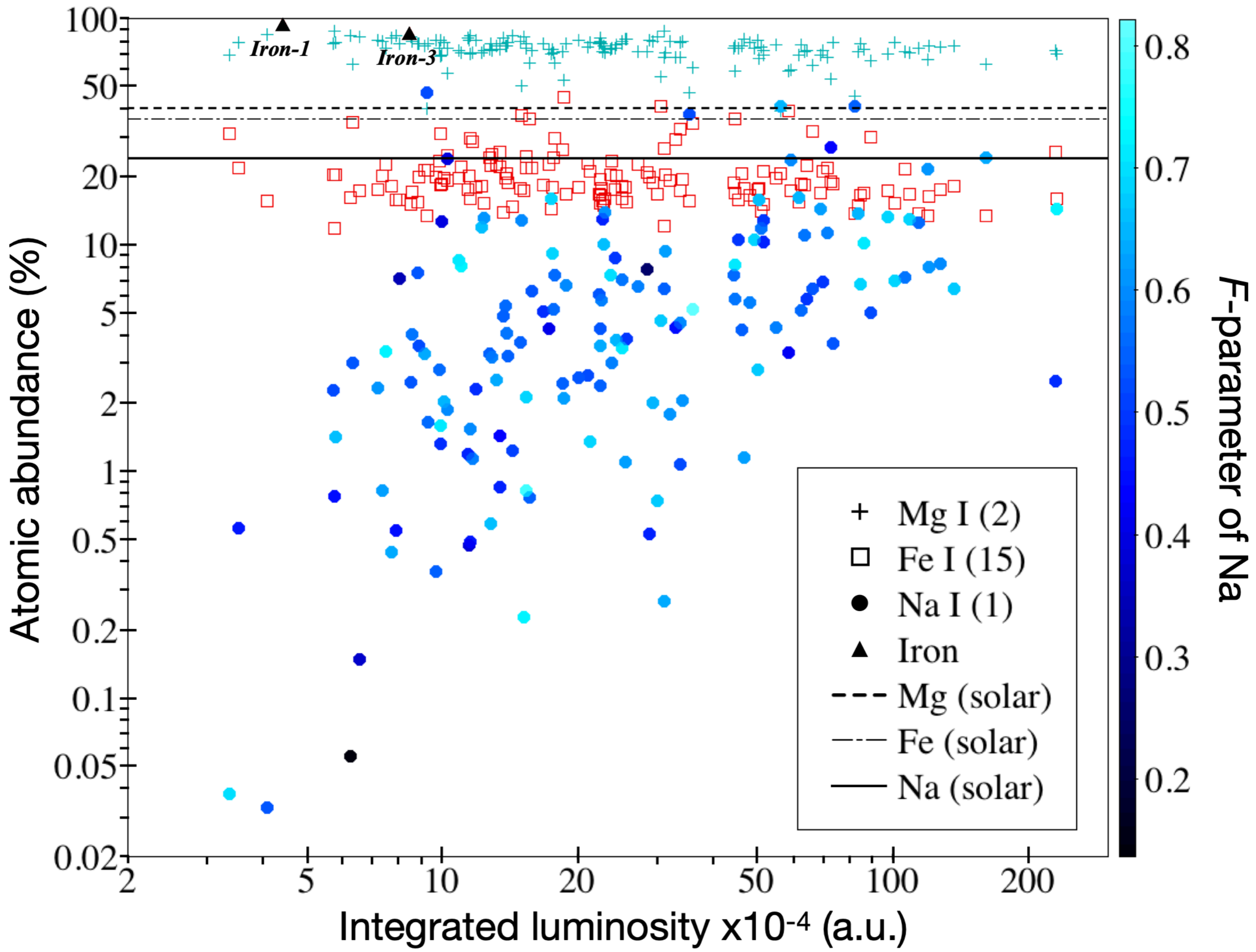
Table 4: Average  $F$ -parameters for Na-Mg-Fe in the Geminids.

| Elements     | Average $F$ -parameter |
|--------------|------------------------|
| Na*          | $0.590 \pm 0.090$      |
| Mg           | $0.607 \pm 0.064$      |
| Fe           | $0.543 \pm 0.062$      |
| Shower**     | Average $F$ -parameter |
| Leonids 2000 | $0.498 \pm 0.014$      |
| Taurids      | $0.535 \pm 0.025$      |
| Perseids     | $0.535 \pm 0.010$      |
| Orionids     | $0.545 \pm 0.012$      |
| Geminids     | $0.583 \pm 0.016$      |

\*  $F$ -values for Na were computed only for meteors with Na > 10%.

\*\*  $F$ -values for different meteor showers refer to Koten et al. (2004).





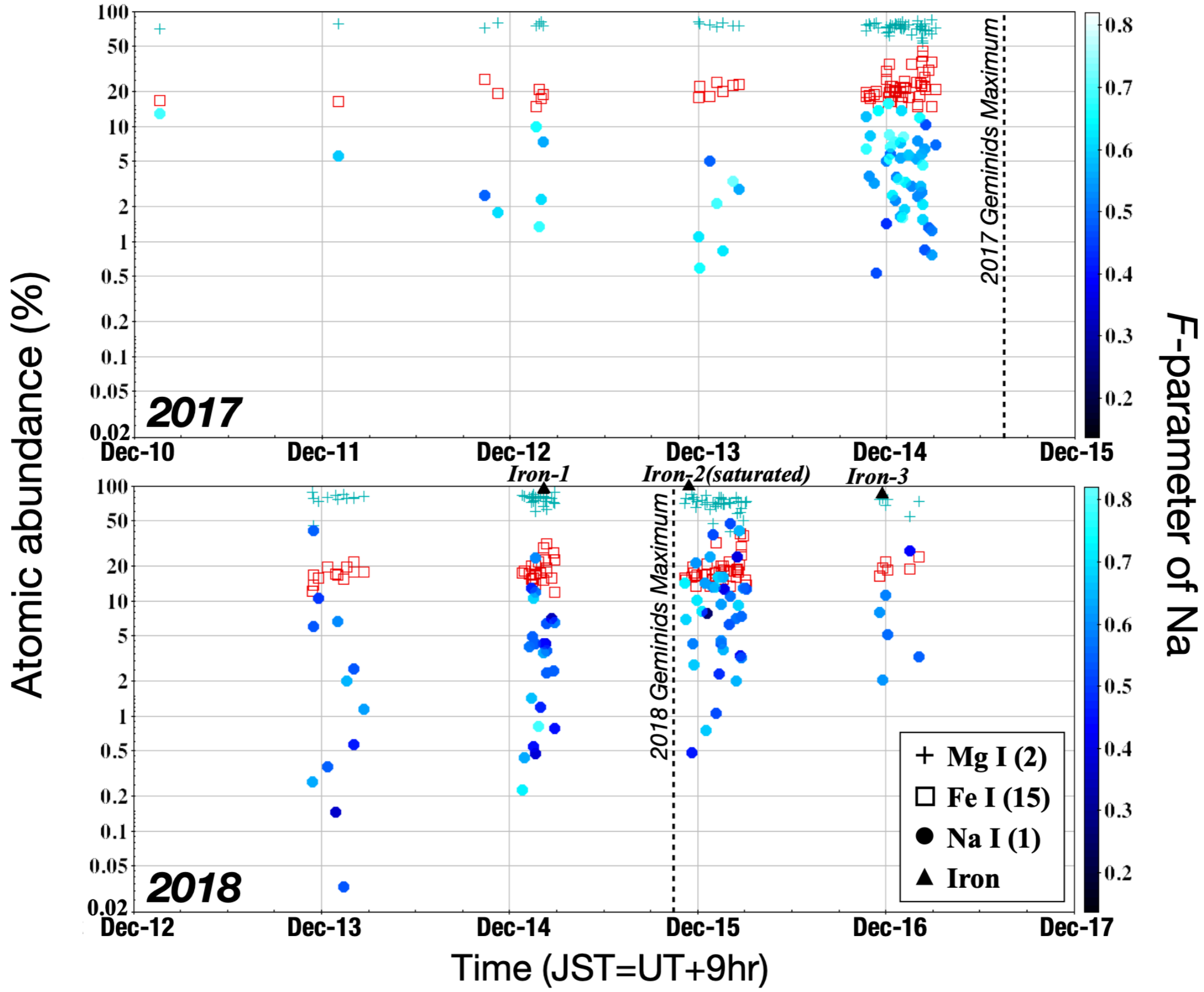
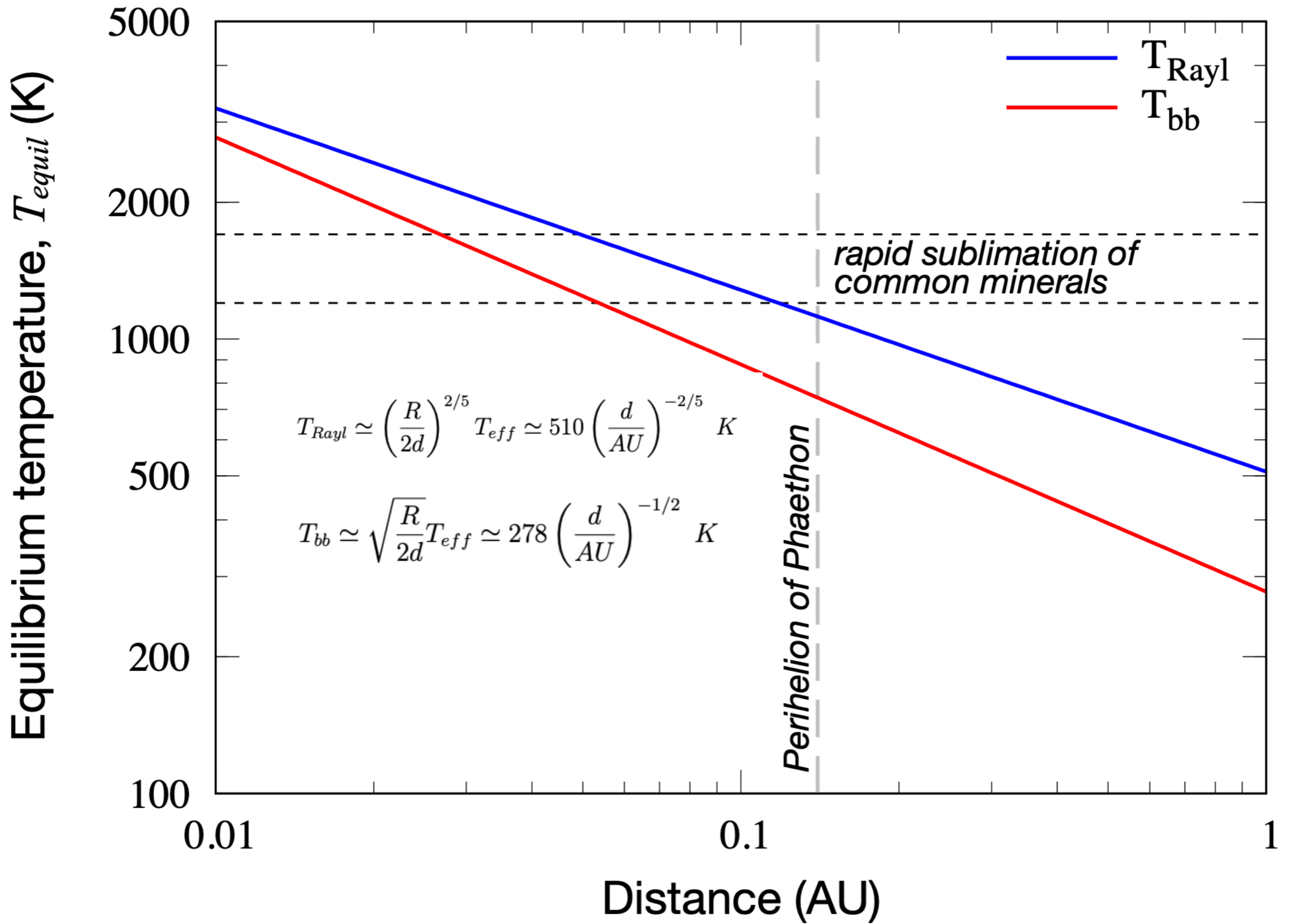
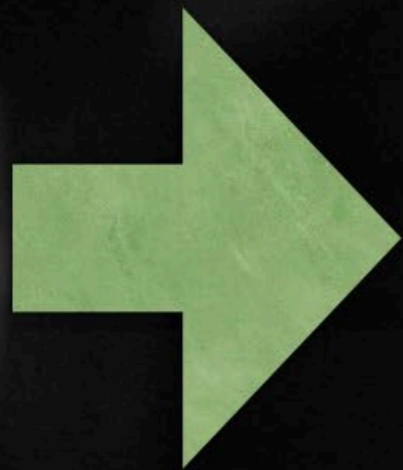


Figure 11: Na, Mg, Fe abundances vs. observed date and time in JST (UT+9hr). F -values of Na are also shown. Three candidates of iron Geminids detected in 2018 are plotted. Three candidates of iron Geminids observed in 2018 are plotted. Vertical dashed lines are time of Geminids maximum activities in 2017 and 2018 which occurred at the same solar longitude of 262.2 .



流星発光を1/100万秒で計測

温度~1万度, 流速~6km/s



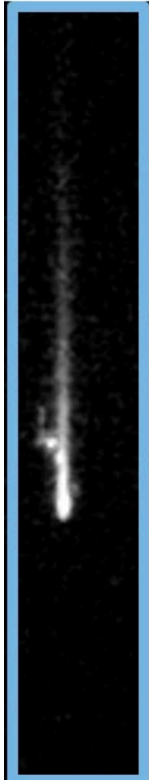
加熱率 ~ 11 MW/m<sup>2</sup>



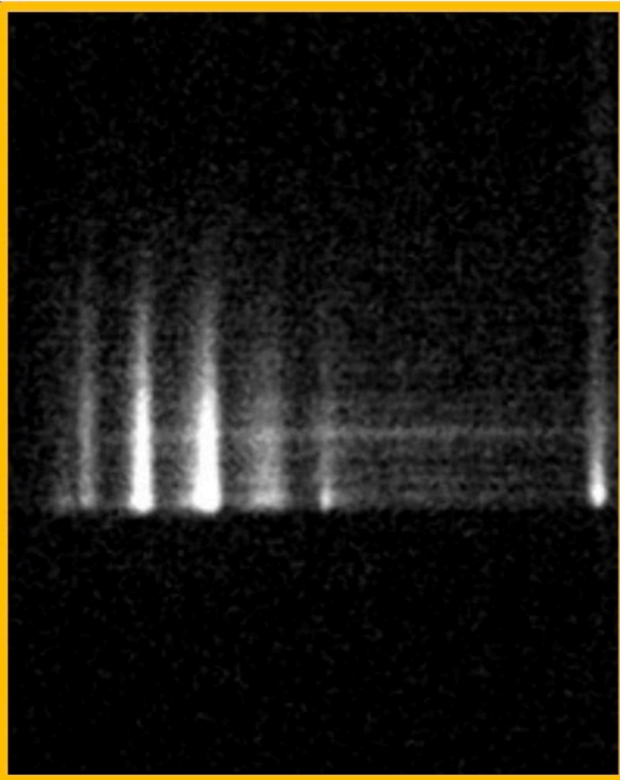
High speed imaging (exp=1 $\mu$ s, 1000 fps)

# 流星中の有機物発光の室内実験検証

0次光

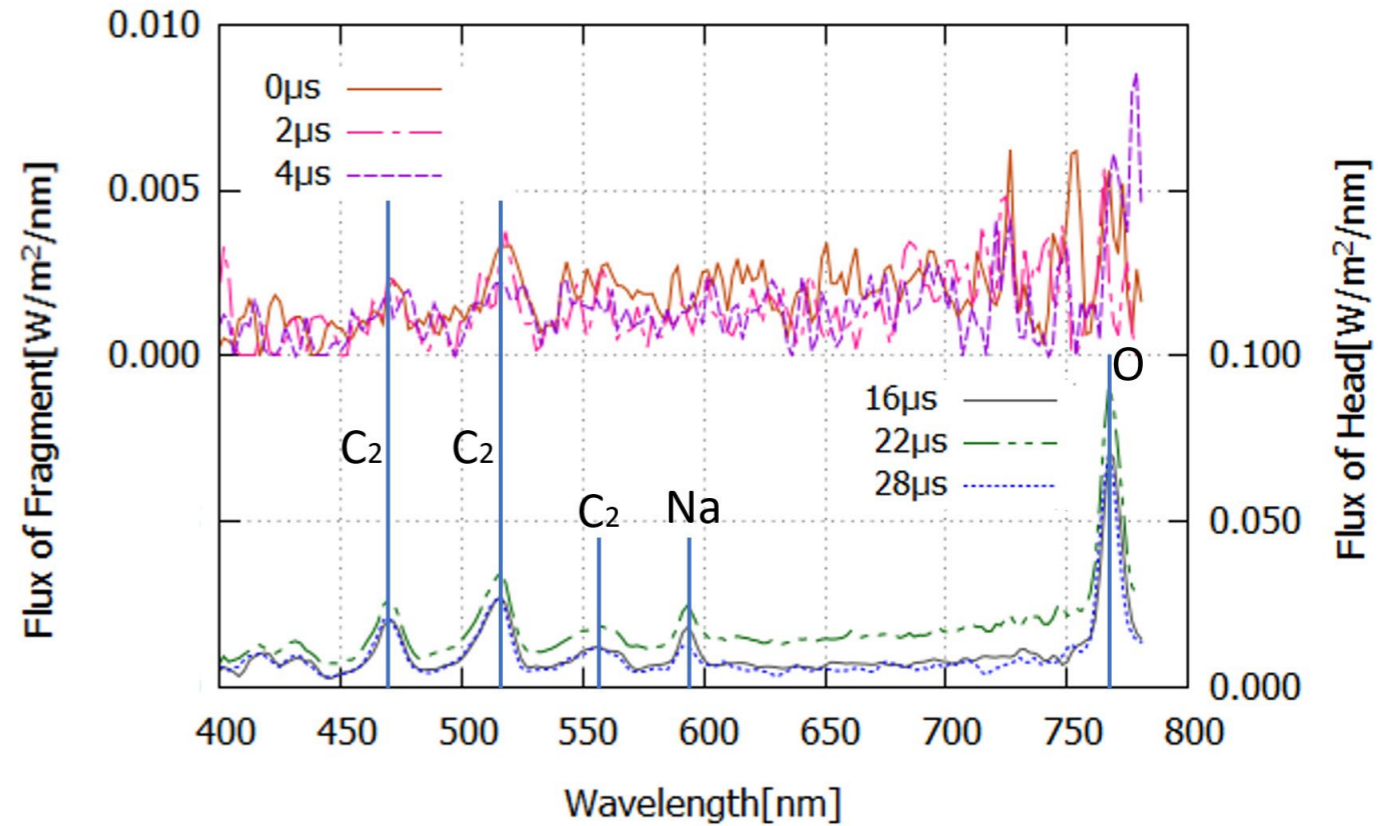
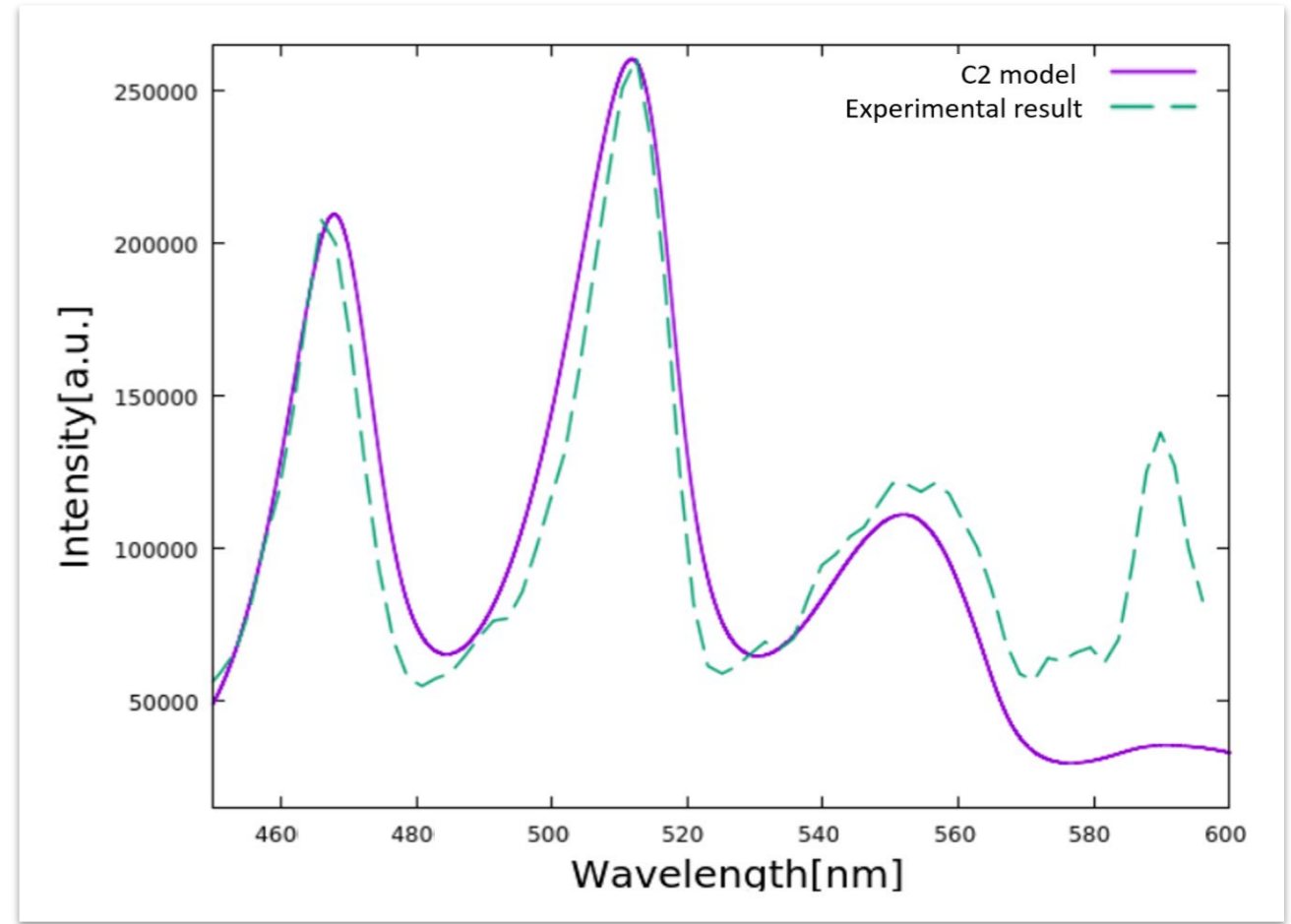


1次光



大気圧 : 584Pa 速度 : 6.150km/s  
露光時間: 1.7 $\mu$ s ( 50万frame/sec )

宇田天音 (卒論, 2021)



# 人工流星観測計画

OSIRIS-REx; 2023年9月 @ 米国ユタ砂漠

ALE; 2023年 @ 国内外

## はやぶさ2地球帰還カプセルの科学観測

Curtin University, Kochi University of Technology, Nihon University, Ibaraki University, JAXA



# DIMS(Dark matter and Interstellar Meteoroid Study)

超高感度のカメラを米国ユタ州に設置して探索を行うDIMS計画を国際的な共同研究で進めている(P.I. 甲南大学・梶野文義 教授).

## 暗黒物質と星間流星の観測

### Meteoroids

F. Kajino (Konan Univ.) et al.

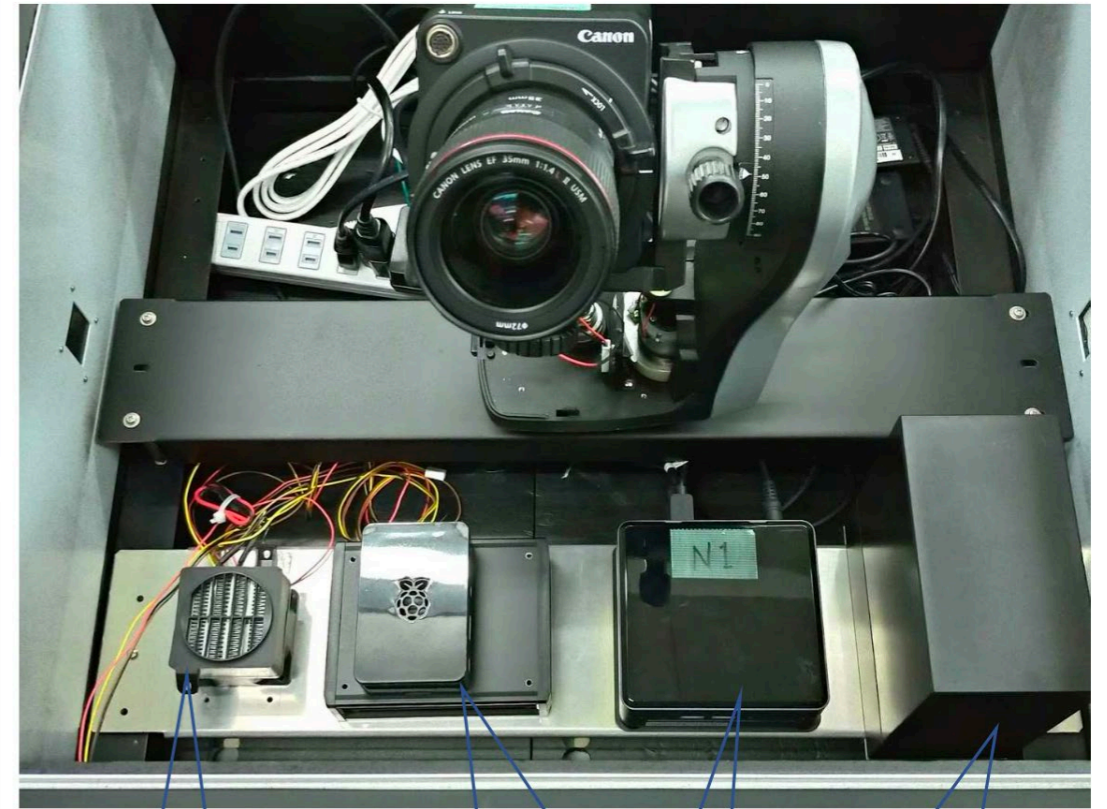
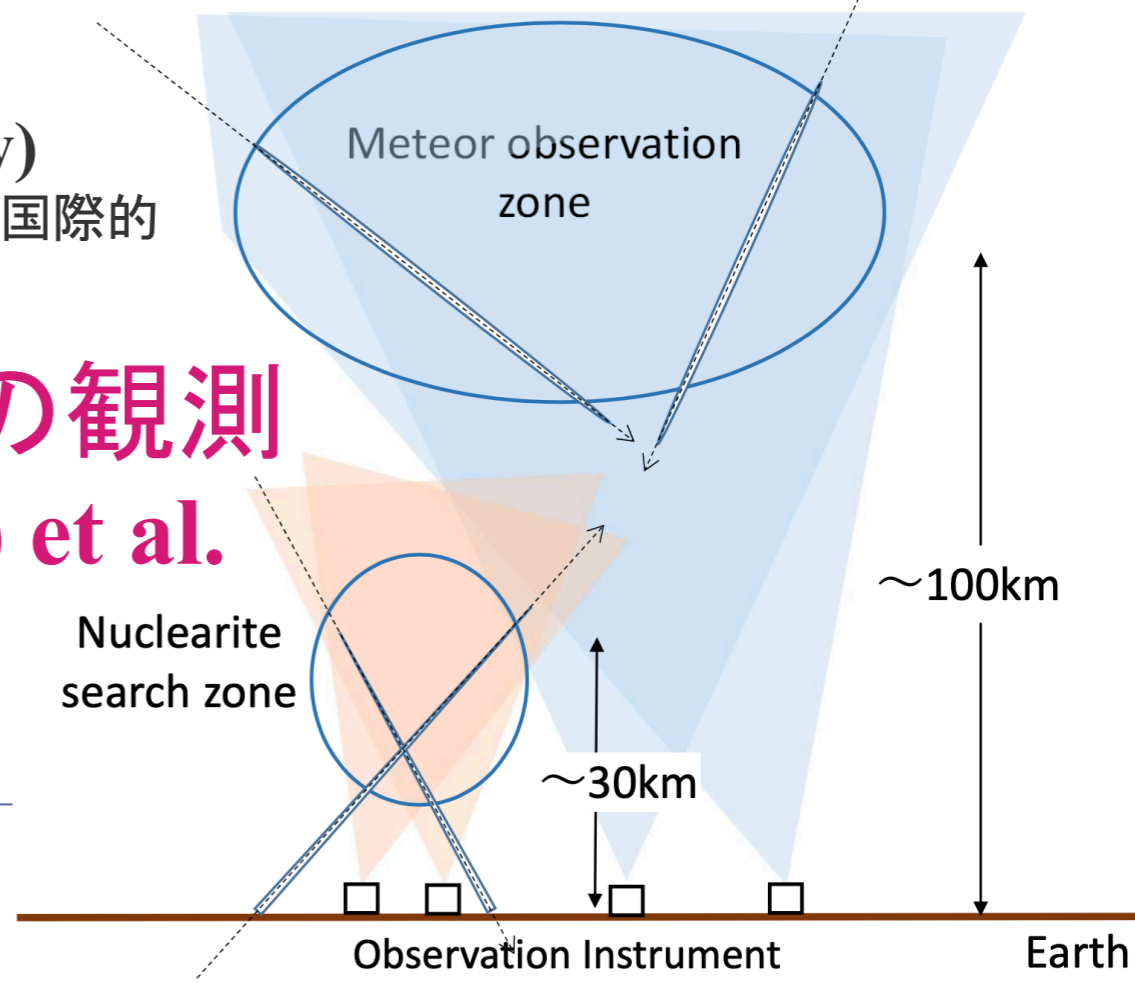
Meteoroid material is evaporated and ionized. Light is emitted from the ionized gas.

Meteoroids bound in the solar system

Elliptical orbit,  $v < 72$  km/s  
most meteoroids

### Interstellar meteoroids

Hyperbolic orbit,  $v > 72$  km/s  
Orbital velocity of Earth = 30 km/s  
Escape velocity at earth orbit = 42 km/s



Fan & Heater

Arduino & Raspberry Pi

PC

HDD 12TB x 2

### Nuclearites/SQM

Light is emitted as black-body radiation from an expanding cylindrical thermal shock wave by elastic or quasi-elastic collisions with the ambient atoms.

Average velocity  $v_N$  :  $\sim 220$  km/s

# Nihon University

*140.056555 E, +35.724700 N, H=40 m*

Number of meteor detections

April 22: 167

April 23: 66

April 24: 0 (reset UFOCapture)

April 25: 44



**Size: 61.0 deg x 34.3 deg**

**Pixel scale: 114 arcsec/pixel**

**Detected sources: 144**

**FWHM = 2.78 pix = 400 arcsec**

**Center (RA, Dec): (272.886, 84.430)**

**Center (RA, hms): 18h 11m 32.699s**

**Center (Dec, dms): +84° 25' 47.343"**





直径cm~数10cmのメテオロイドが衝突すると、地球では流星現象(火球)となり、月では短時間(1/100~1/10秒)の閃光(月面衝突現象)となる。月面を巨大な望遠鏡に見立てて長時間モニターすることで、流星と小惑星を繋ぐ直径cm~mサイズの月-地球への衝突頻度やサイズ分布が明らかになる。

2013 March 17 impact taken by the lunar impact monitoring program at NASA (MSFC).

新たなクレータ 200個以上がNASA LROにより発見。直径は3~43mで、数年以内に月面に衝突。 Nature (2016)

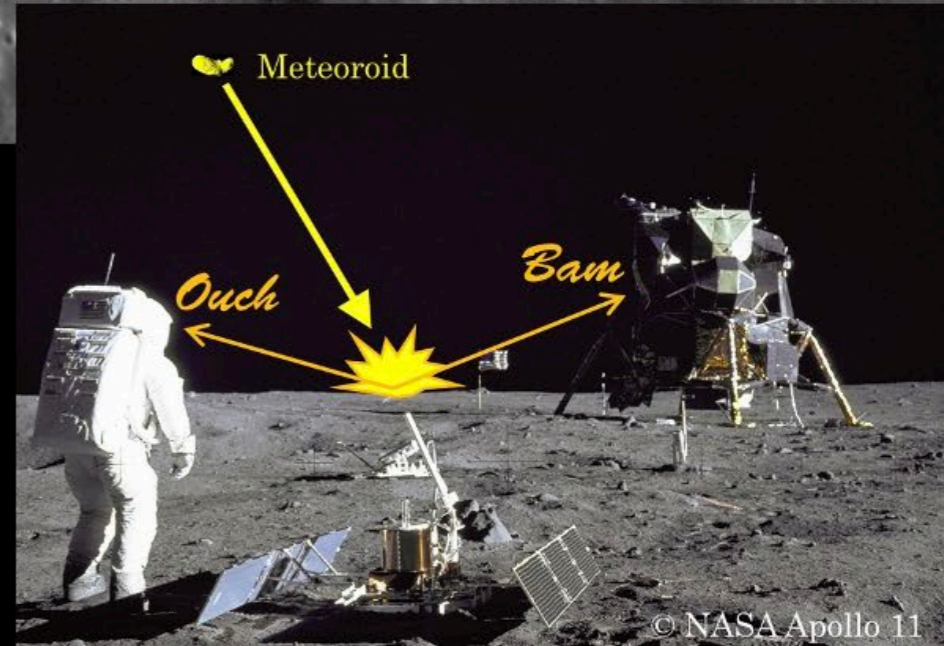
4等級の閃光

直径約19mのクレータが形成  
30km遠方までデブリ飛散  
衝突天体直径; 28cm - 110cm  
衝突天体質量; 33 - 702kg

NASA/Lunar Reconnaissance Orbiter

# 月面衝突閃光

メテオロイドの直接衝突より、低重力下で雨のように降り注ぐクレータ二次放出物によるリスクが深刻



# 日本大学理工学部(船橋キャンパス) 月面衝突閃光&突発天体観測 高速広視野望遠鏡



電動ハンドリフターで軽々移動

## CMOSカメラ



ZWO ASI 174MM-cool



QHY 174 GPS

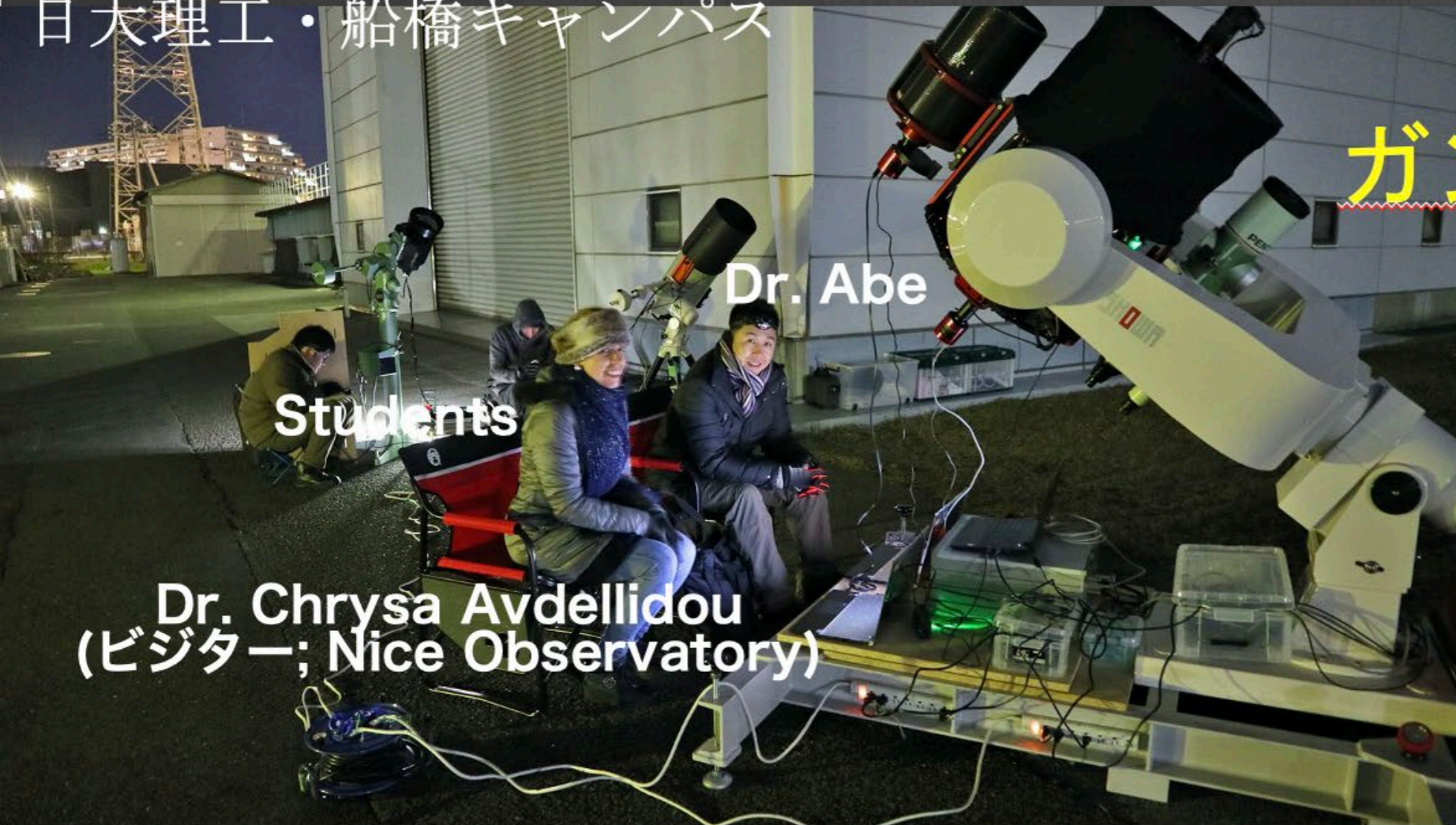
|           |                   |                   |
|-----------|-------------------|-------------------|
| センサタイプ    | Sony 1/1.2 "CMOS  | Sony 1/1.2 "CMOS  |
| 解像度       | 1936 × 1216       | 1920 x 1200       |
| 画素サイズ     | 5.86 μm           | 5.86 μm           |
| 受光面積      | 11.25 x 7.03 mm   | 11.25 x 7.03 mm   |
| 読出ノイズ     | 3.5-6.0e          | 2.8-5.3e          |
| 最大量子効率    | 78%               | 78%               |
| ビット深度     | 12 bit            | 12 bit            |
| 転送レート(深度) | 60fps/128fps(max) | 60fps/130fps(max) |
| インターフェイス  | USB3.0, M42P0.75  | USB3.0, M42P0.75  |



# 月面衝突監視高速広視野望遠鏡システム Lunar impact monitoring FAST wide-field telescope system; LiFAST

# 2018ふたご座流星群・月面衝突閃光の様子

日大理工・船橋キャンパス



月の昼側

## ガンダム望遠鏡



月の縁

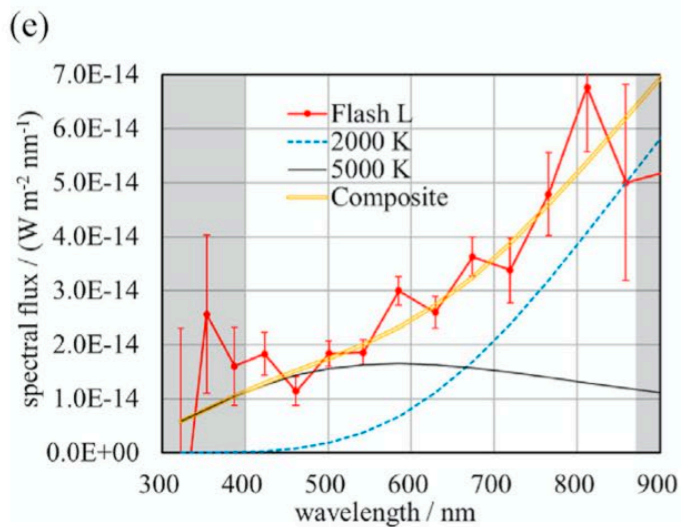
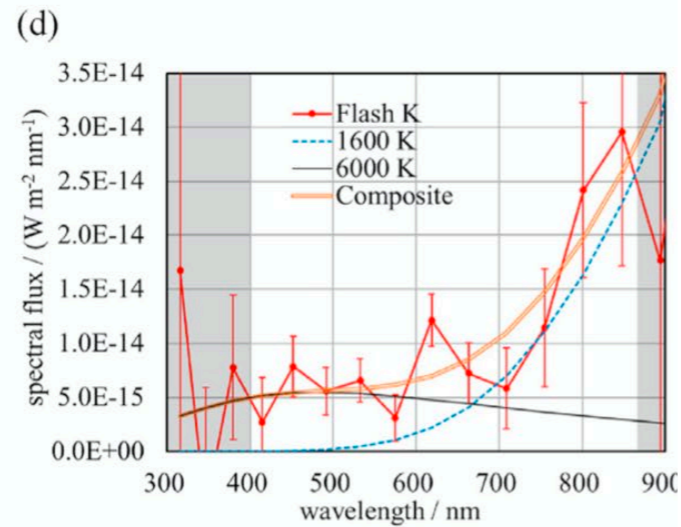
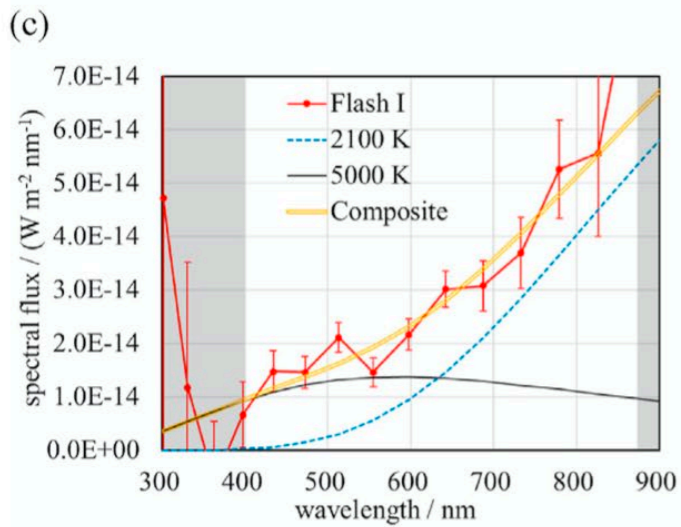
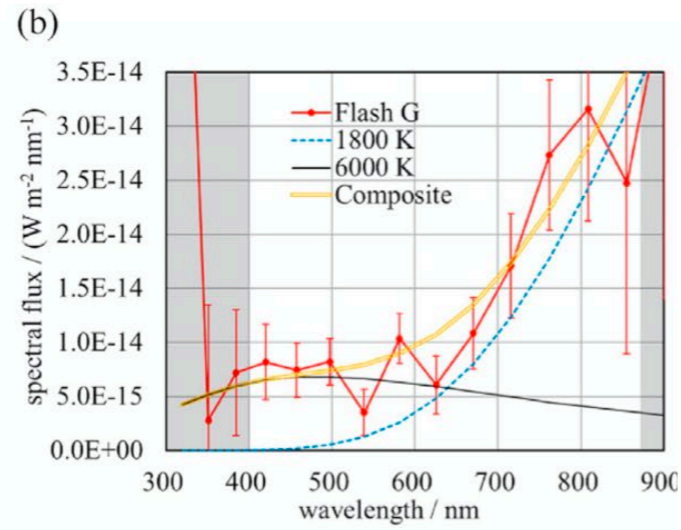
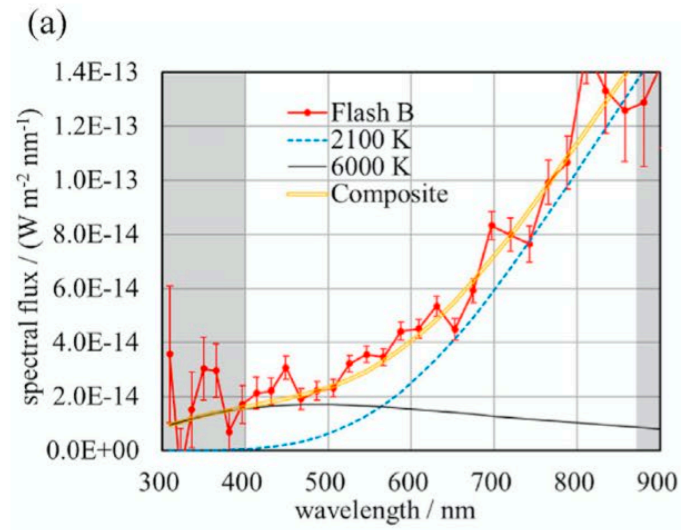
月の夜側

3時間で **1.3kg**以上が衝突  
 $> 3.1 \times 10^{-5} \text{ g/km}^2/\text{hr}$   
 $\sim 10 \text{ kg/hr}$  地球換算

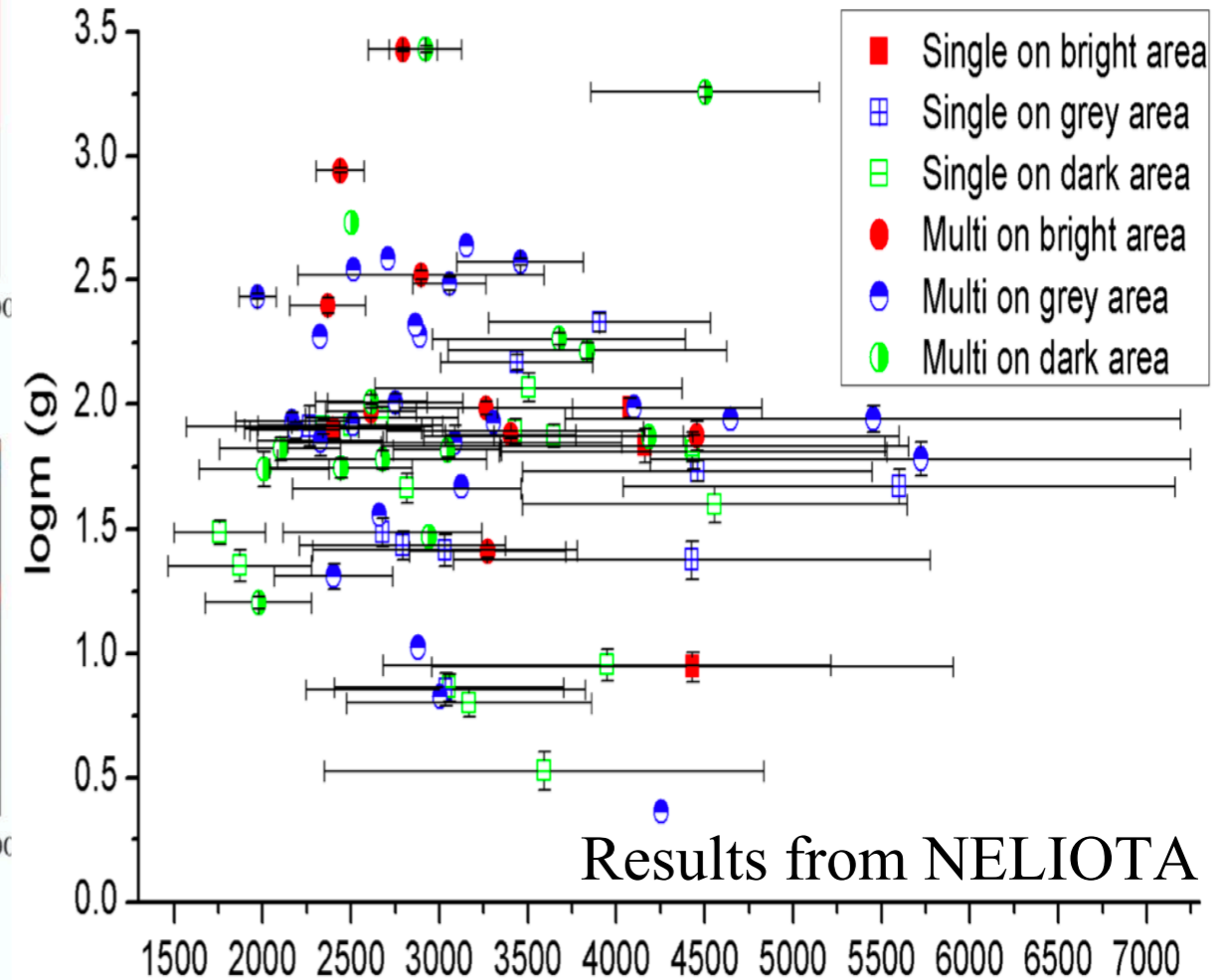
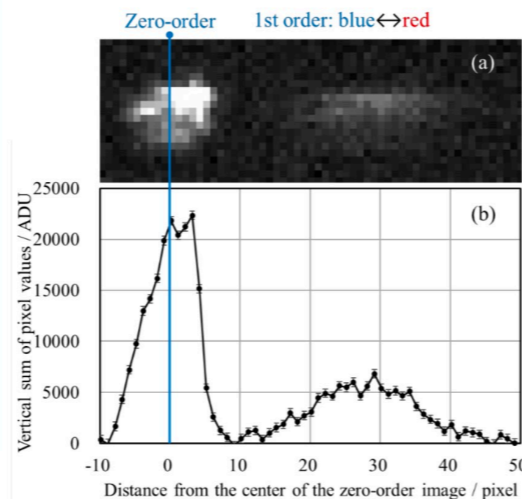
| UT on Dec15 | G-mag | R-mag* | Angle | Energy[J]                 | Mass[g]                   | Diameter |
|-------------|-------|--------|-------|---------------------------|---------------------------|----------|
| HH:MM:SS    | GAIA  |        | [deg] | $\eta=5.0 \times 10^{-4}$ | $\eta=1.4 \times 10^{-3}$ | [cm]     |

\*GAIA G-10.25-42 Johnson R-band assuming Black Body  $T=3000 \text{ K}$  1.10E+08 3.06E+08 185.2 - **516.4** 5.2 - **7.3**

# 月面衝突閃光の黒体温度推定



## Yanagisawa + (2021)



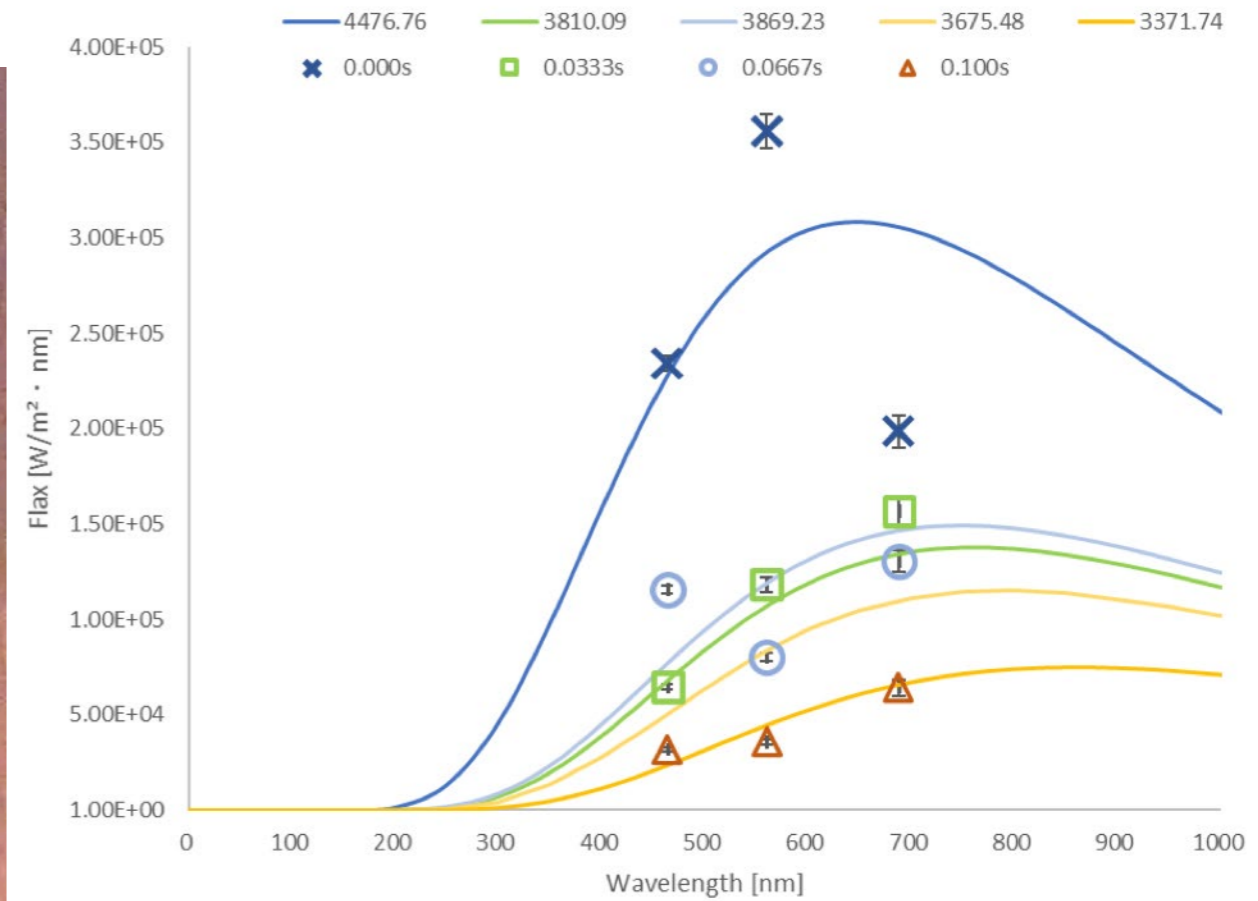
Results from NELIOTA

Temperature (K)  
C. Avdellidou and J. Vaubaillon (2019)

A. Liakos et al. (2019)

# Color temperature of Geminids LIF

## Color spectra of Geminids LIF



Blue (plasma) → Red (blackbody)

奥山純吾 (卒論, 2021)

Camera: NCR-550a(NEC/Goto Inc.)

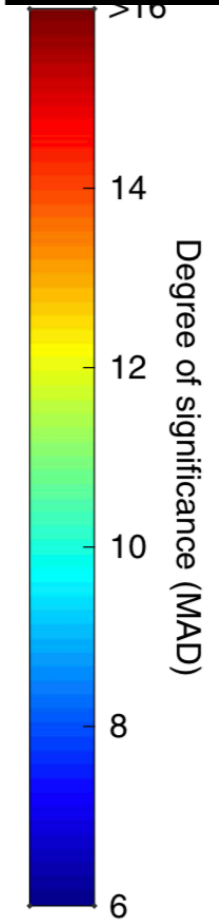
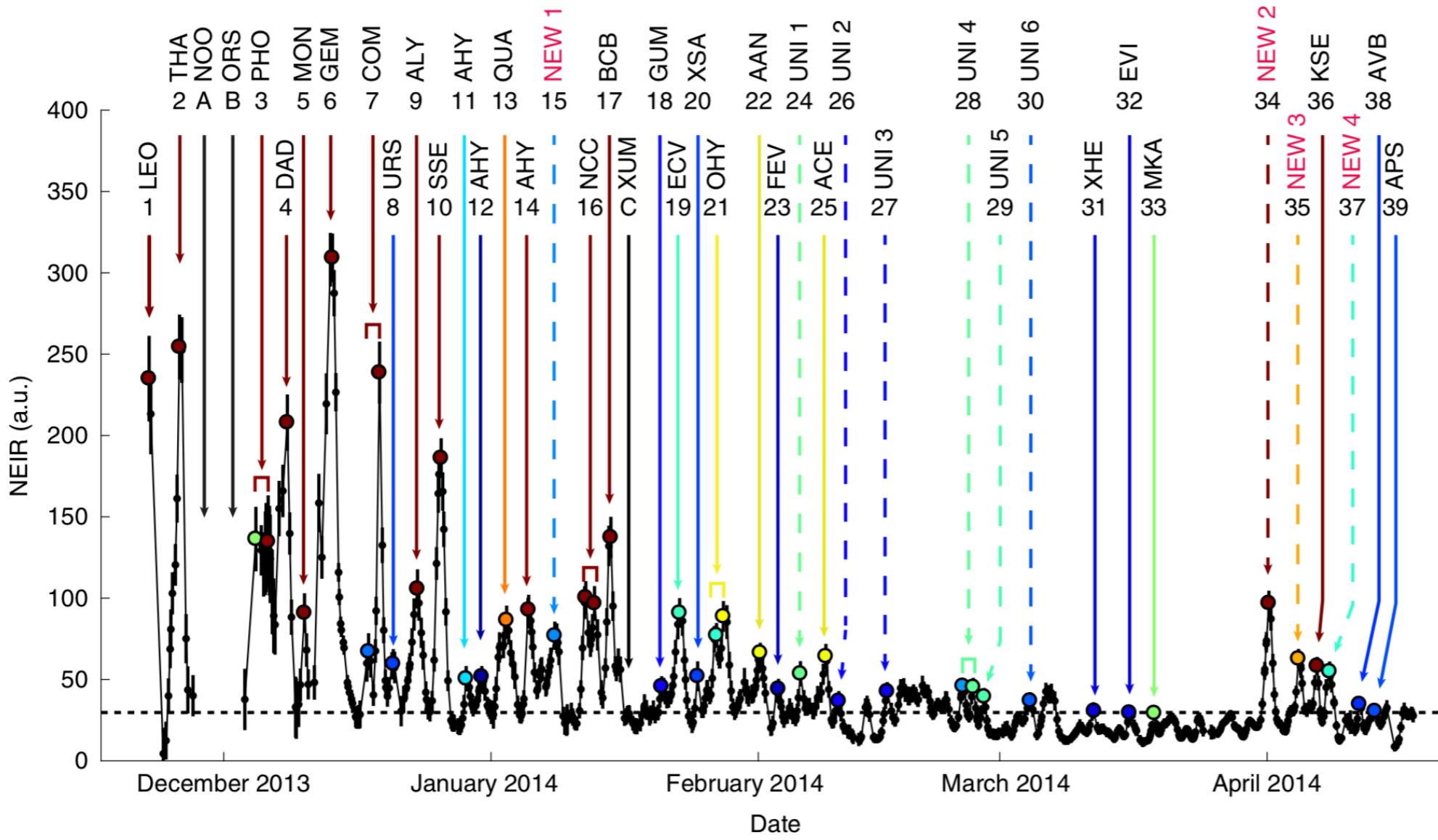
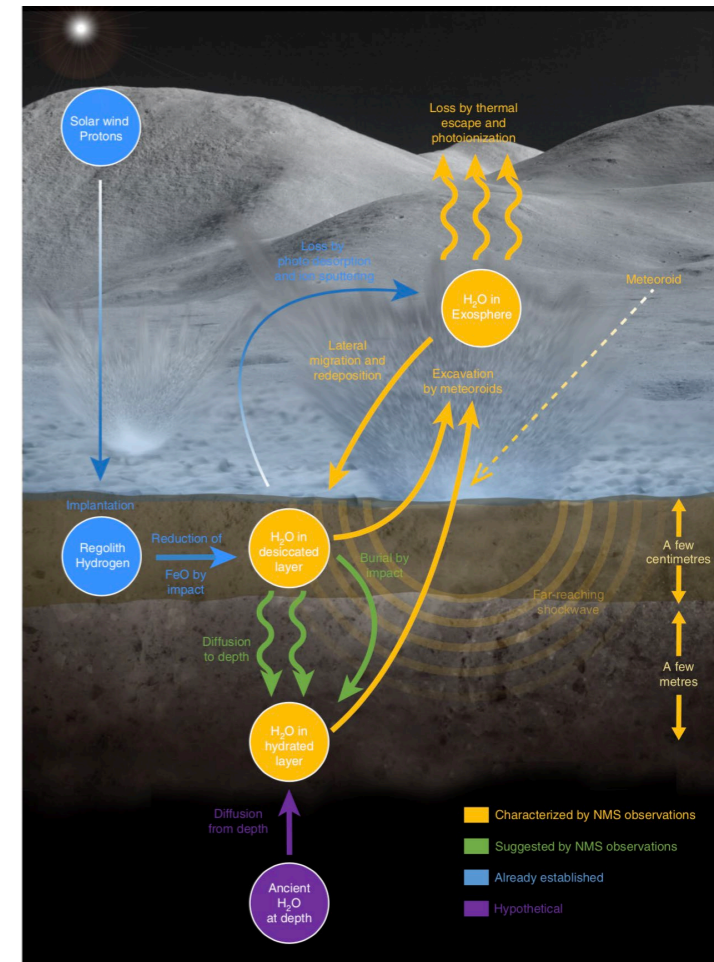
Table 1. Geminids Lunar Impact Flashes on 15 December 2007.

| Flash | Time (UT) | latitude | longitude | mag. | duration | mass   | Impact Angle |
|-------|-----------|----------|-----------|------|----------|--------|--------------|
| A     | 8:28:18   | +1       | -83       | 9    | 0.033 s  | 0.1 kg | 4cm 51       |
| B     | 8:54:25   | -16      | -62       | 6    | 0.017    | 2      | 11cm 57      |
| C     | 8:55:26   | -17      | -84       | 5    | 0.32     | 3      | 12cm 42      |
| D     | 10:08:10  | -20      | -75       | 5    | 0.32     | 5      | D=15cm 47    |

| Time (s) | Temperature (K) |
|----------|-----------------|
| 0.000    | 4476.4±95.3     |
| 0.0333   | 3810.1±29.0     |
| 0.0667   | 3869.2±146.5    |
| 0.100    | 3371.7±72.5     |

# LADEE( Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer)

流星群に伴う月面衝突頻度と水蒸気検出タイミングが一致  
 29/32 events; 9割以上が流星群の活動と一致



Benna+ (2019)

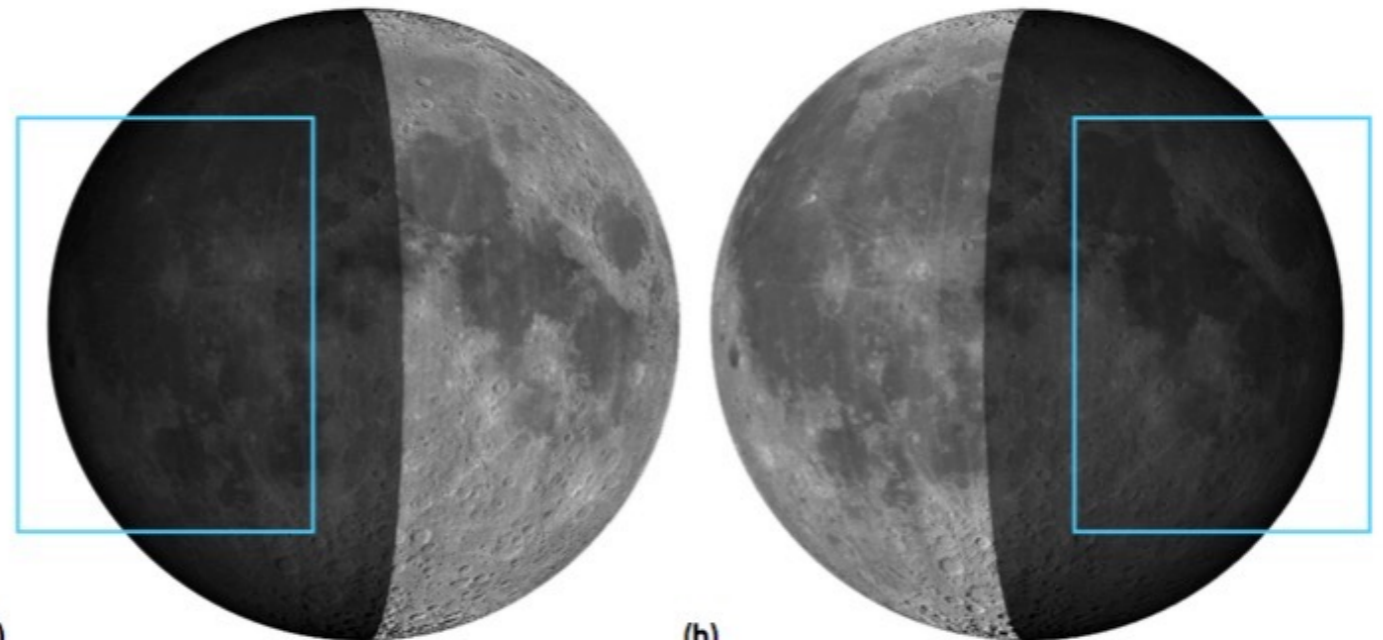
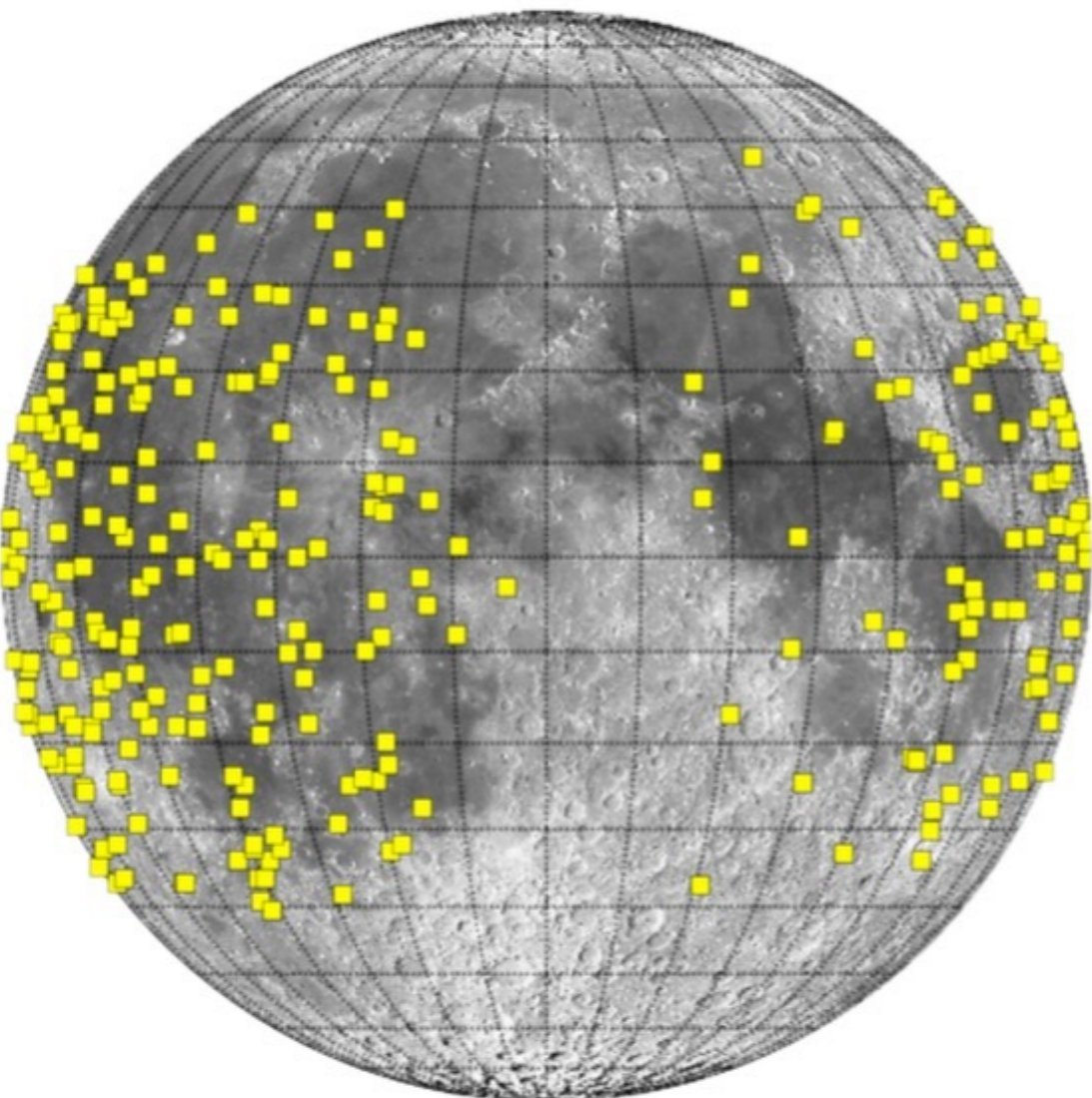
# Biased Ground-based Observation

**No observation is made near the poles & along the line of 0° longitude.**

- **detections only on the lunar leading and trailing sides**
- **observable only few hours after dusk or before dawn**
- **Earth-shine enhances the background**

>400 events detected by NASA(MSFC)  
2005 - 2014

Suggs (2014), D.E. Moser(2015)

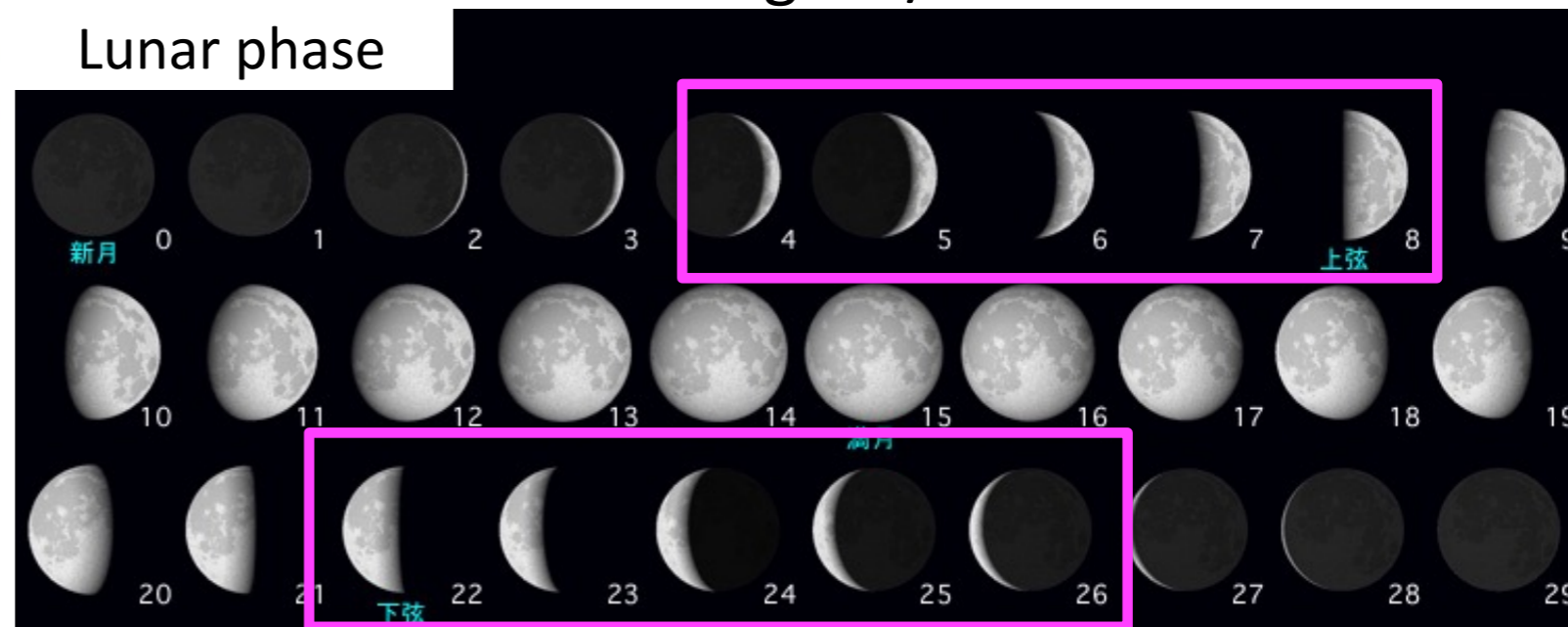


(a)

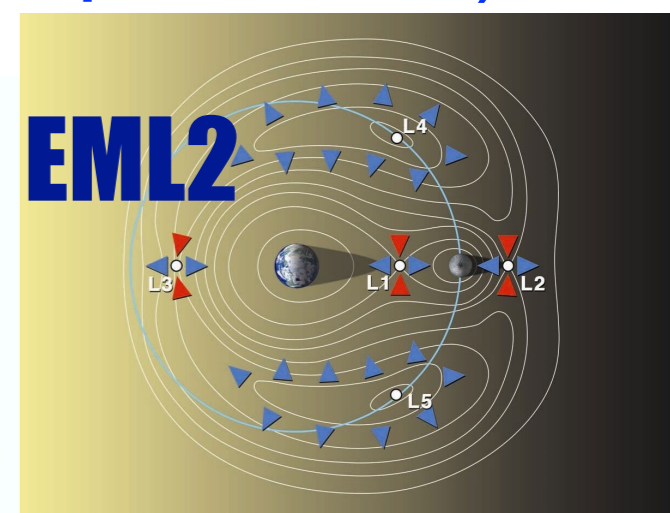
(b)

~10 nights / month

Lunar phase



# 地球-月ラグランジュ点(EML2)探査・6U超小型探査機 エクレウス EQUULEUS(EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft)



Antenna (X-Band LGA)

各種制御ボード

バッテリー

水タンク

サンセンサ

気化室

X帯トランスポンダ

推進系制御ボード

スラスタ

アンテナ  
(X-Band LGA)

DELPHINUS

PHOENIX

姿勢制御ユニット

10cm

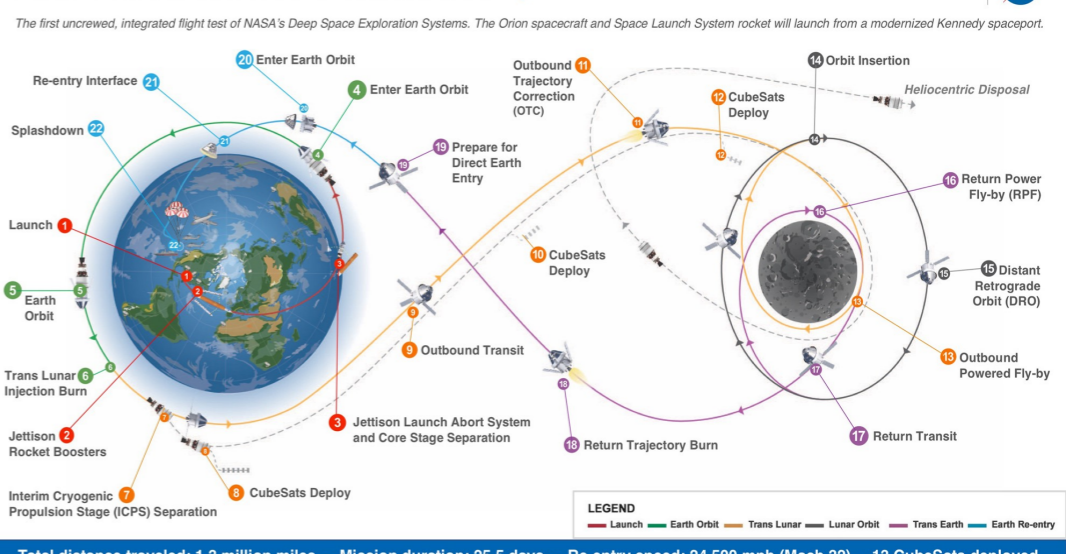
20cm

30cm



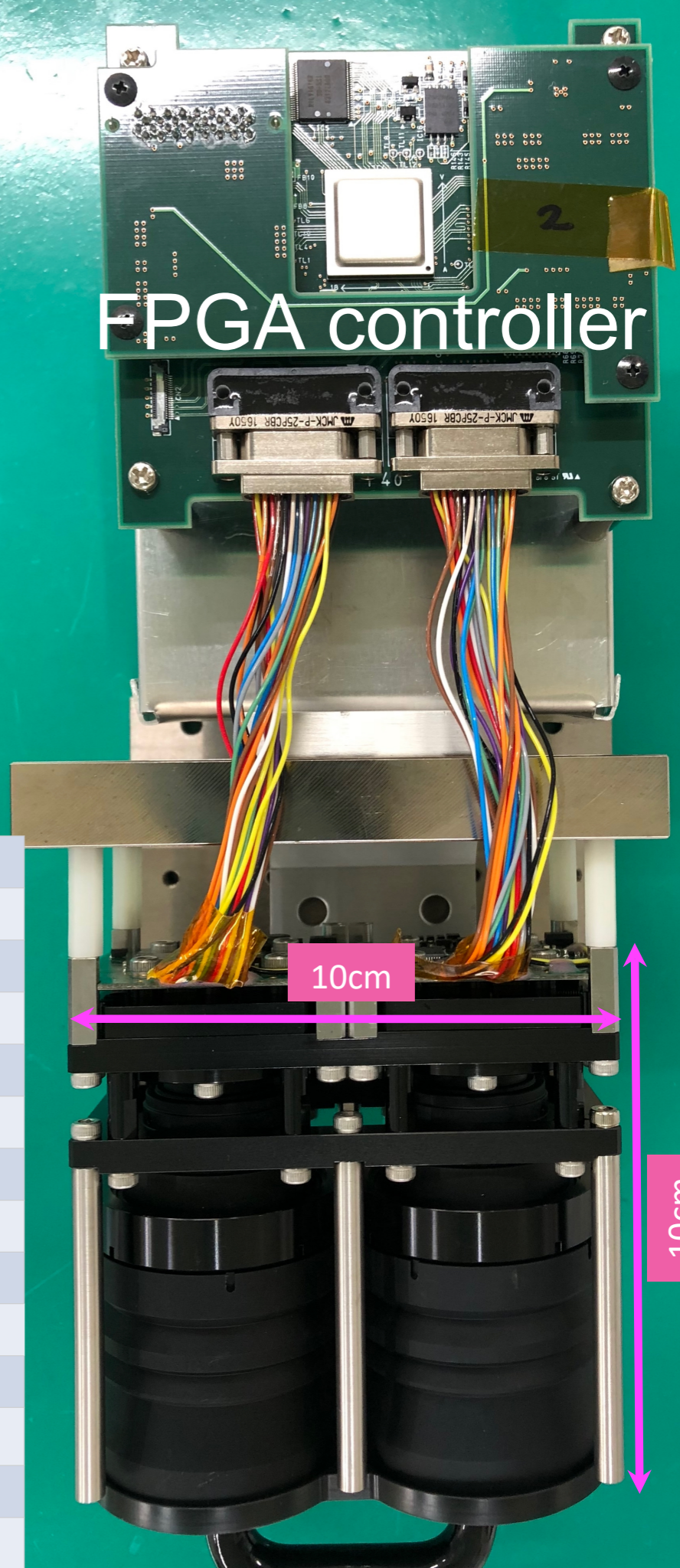
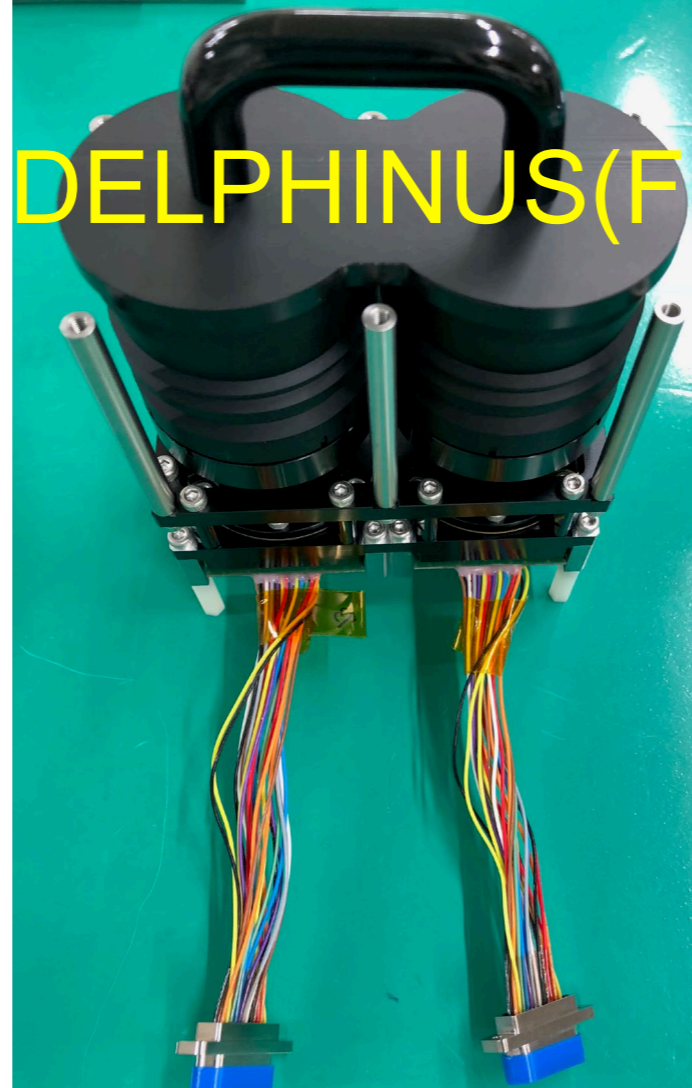
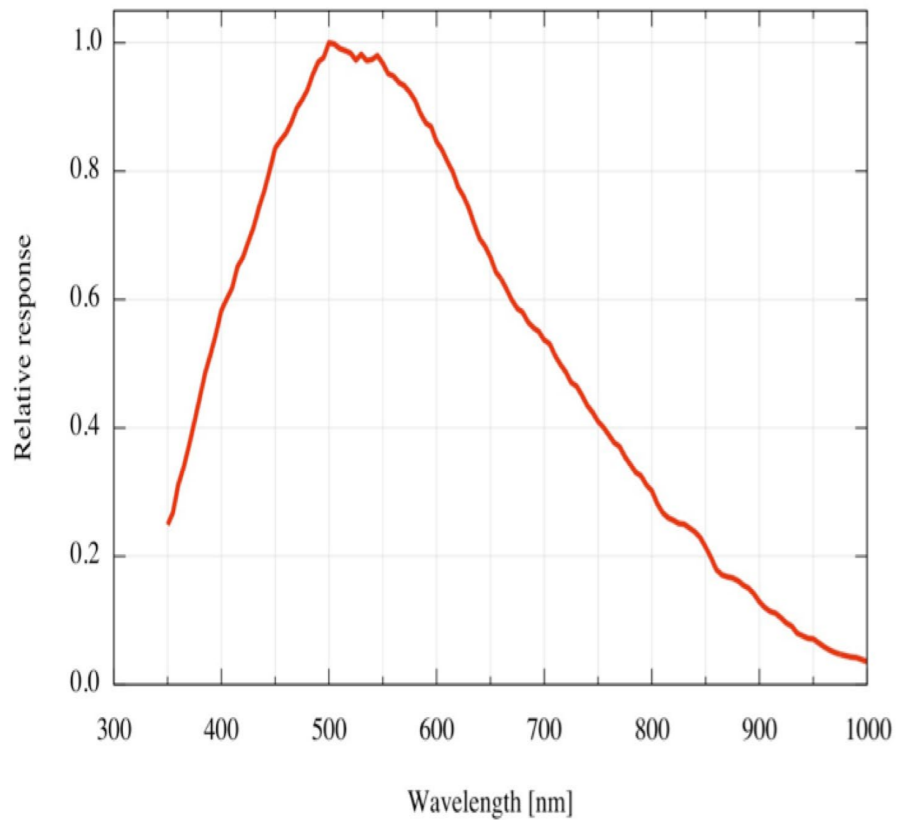
2021年 NASA-SLSの相乗りで打ち上げ予定

## EXPLORATION MISSION-1





## Spectral sensitivity of the sensor



**Pixel number** 659 (H) x 494 (V)

**Pixel size** 7.4 $\mu$ m (H) x 7.4  $\mu$ m (V)

**Lens (2 pieces)** f=50mm/F1.4

**FOV** 5.58 x 4.19 deg

**Wavelength** 400-800nm

**Lunar impact flash mode** Exposure = 1/60 sec

**Asteroid observing mode** Exposure = 1/4000 ~ 34 sec

**Limiting magnitude for stars** 5.5 Vmag with 1/60 sec exposure

**Limiting magnitude for LIFs** 4.5 Vmag with 1/60 sec exposure

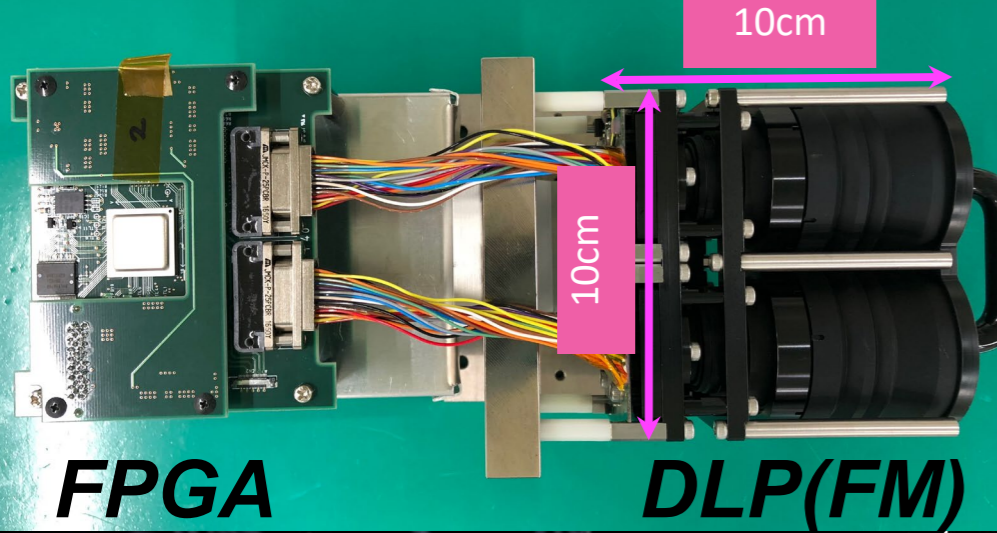
**Power consumption** 0.8 W

**Dimensions** 100mm(W) x 50mm(D) x 100mm(H)

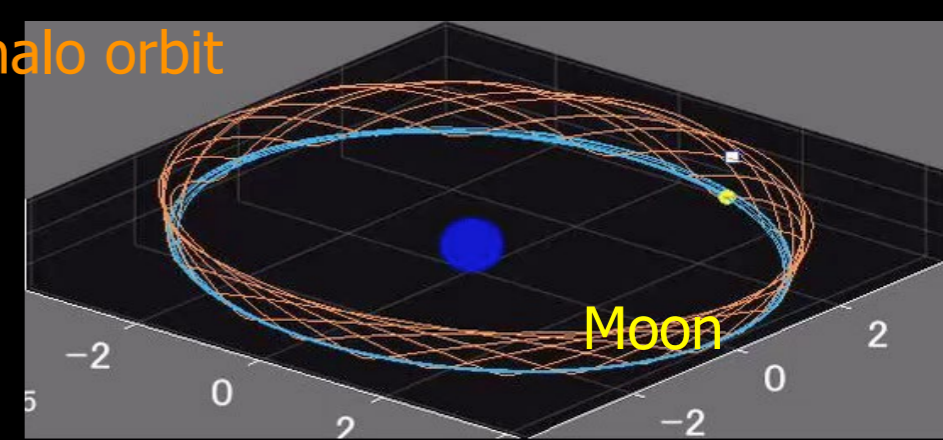
**Operating Temperature** -10 $^{\circ}$ C ~ +40 $^{\circ}$ C

**Mass** 572 g excluding FPGA controller

**Controller** FPGA + CPU



EML2 halo orbit



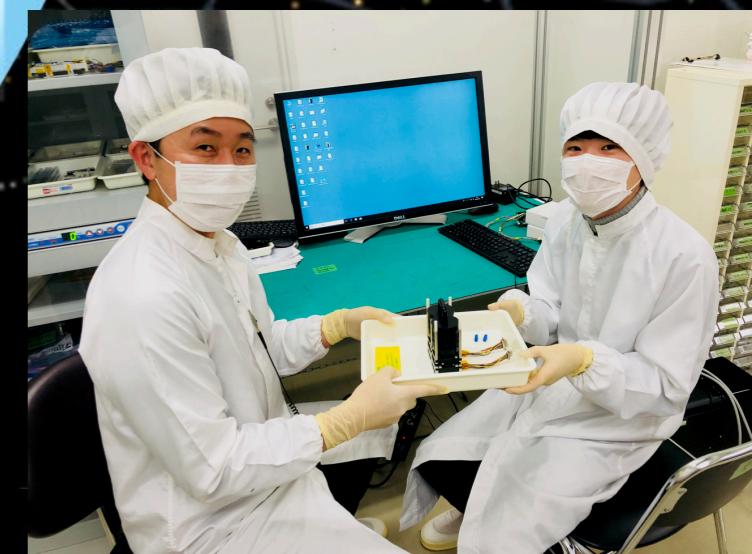
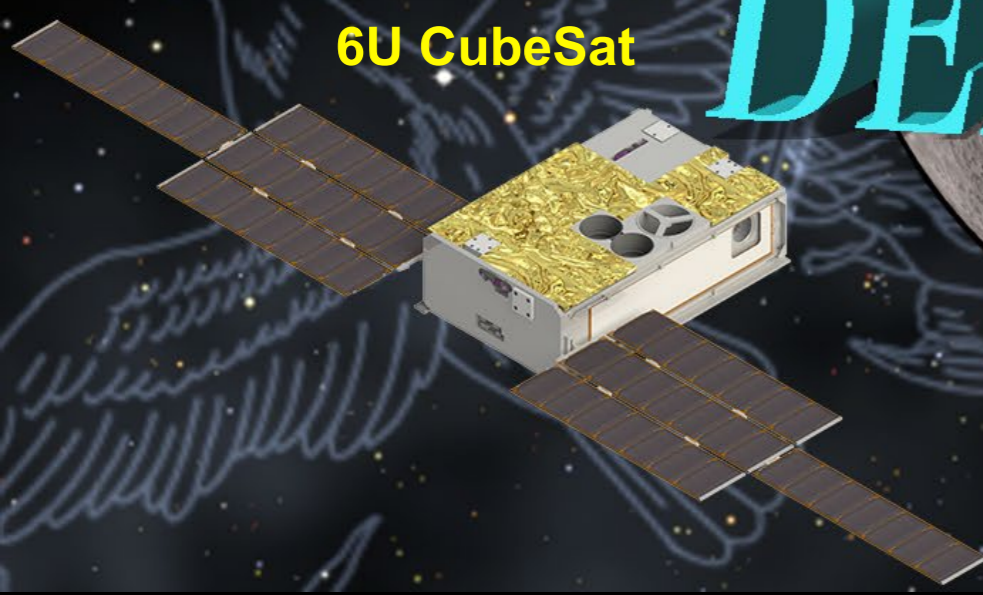
EQUULEUS

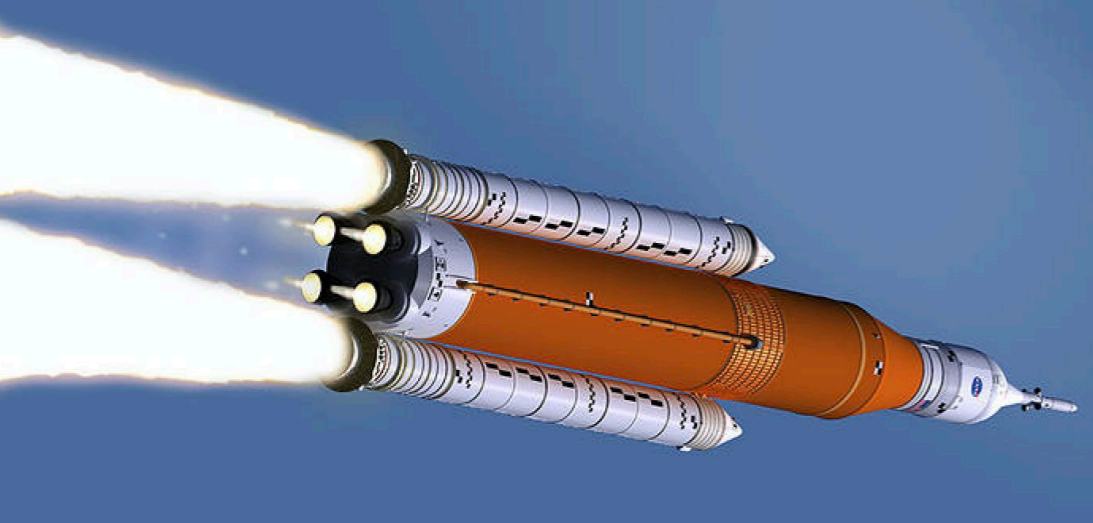
# Detection camera for Lunar impact PHenomena IN 6U Spacecraft

DELPHINUS

## DELPHINUS

6U CubeSat





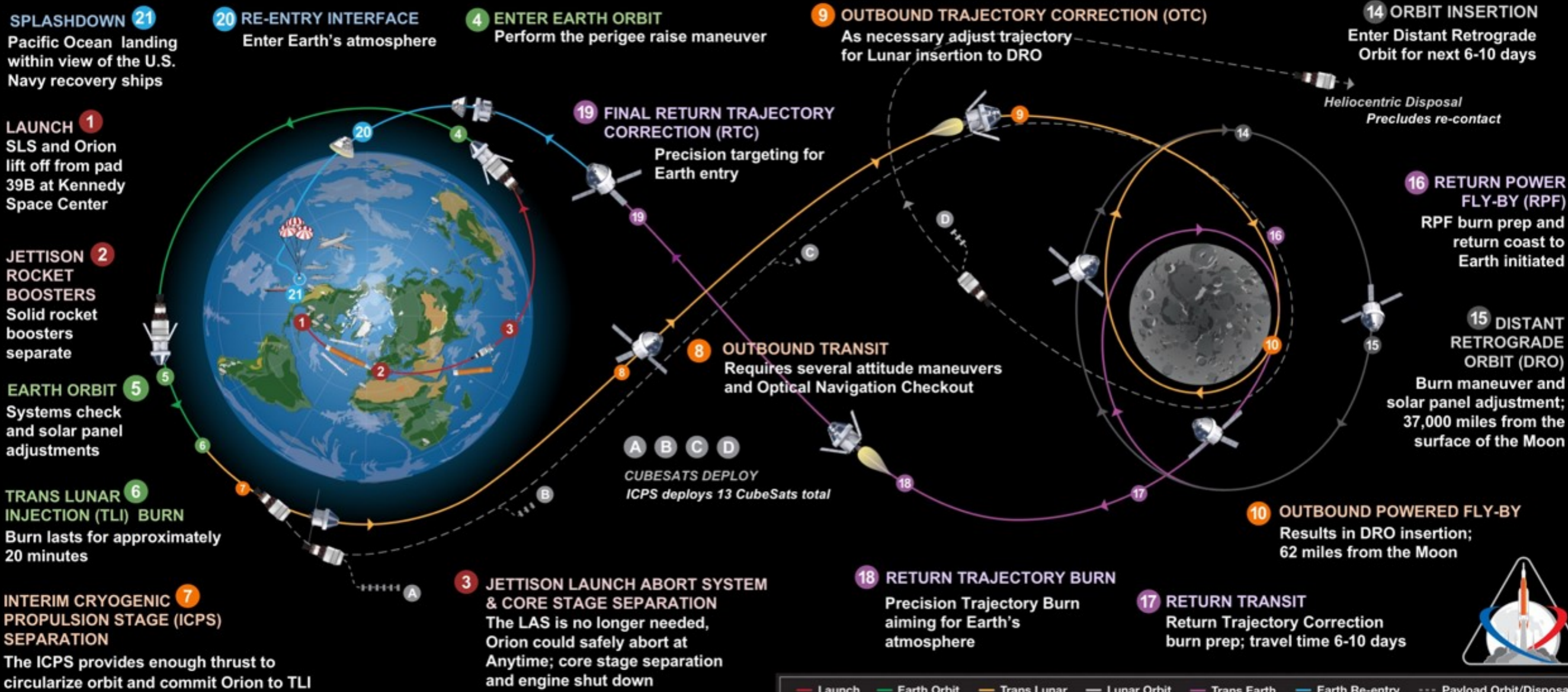
# NASA SLS ロケット EM-1

2021年打ち上げ予定



## EXPLORATION MISSION-1

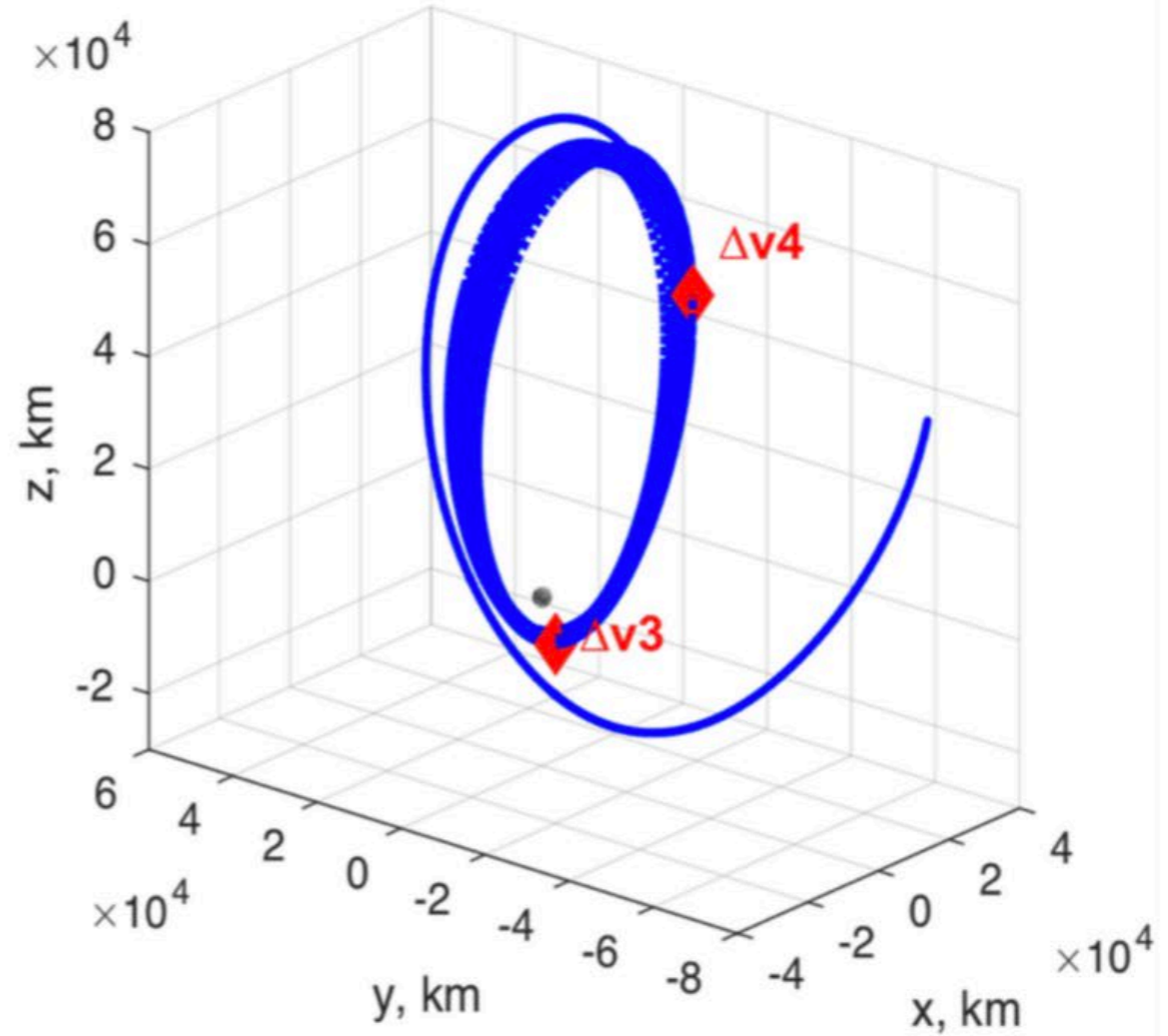
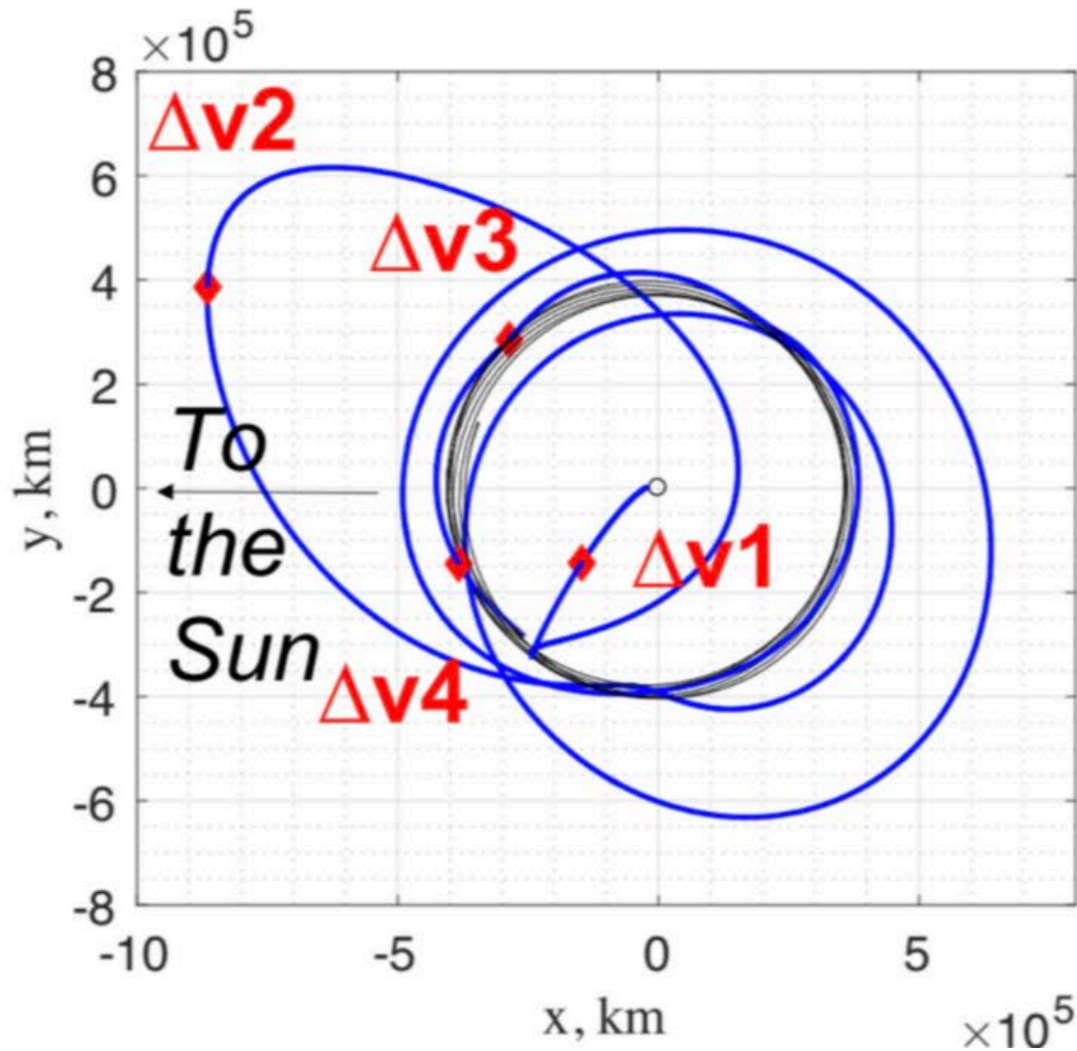
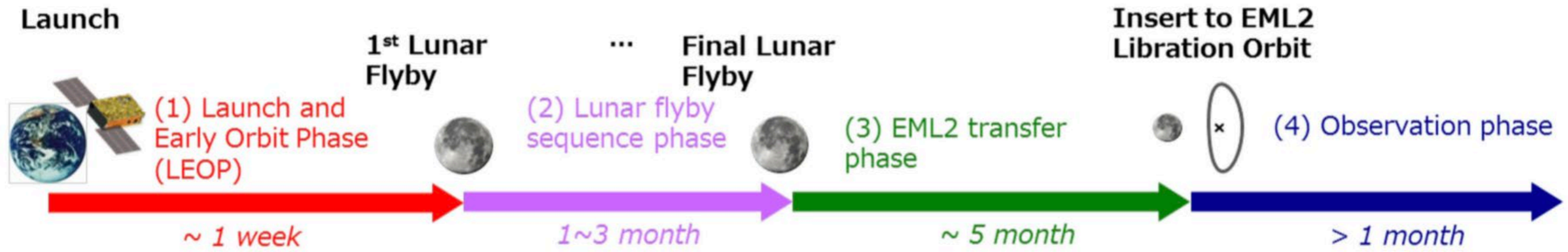
The first uncrewed, integrated flight test of NASA's Orion spacecraft and Space Launch System rocket, launching from a modernized Kennedy spaceport



Total distance traveled: 1.3 million miles – Mission duration: 25.5 days – Re-entry speed: 24,500 mph (Mach 32) – 13 CubeSats deployed

# *EQUULEUS; EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft*

S/C will perform **~6 months flight to EML2** with  $\Delta V$  of **as low as ~10m/s** (deterministic) by using **multiple lunar gravity assists** (capacity: **~70m/s**)

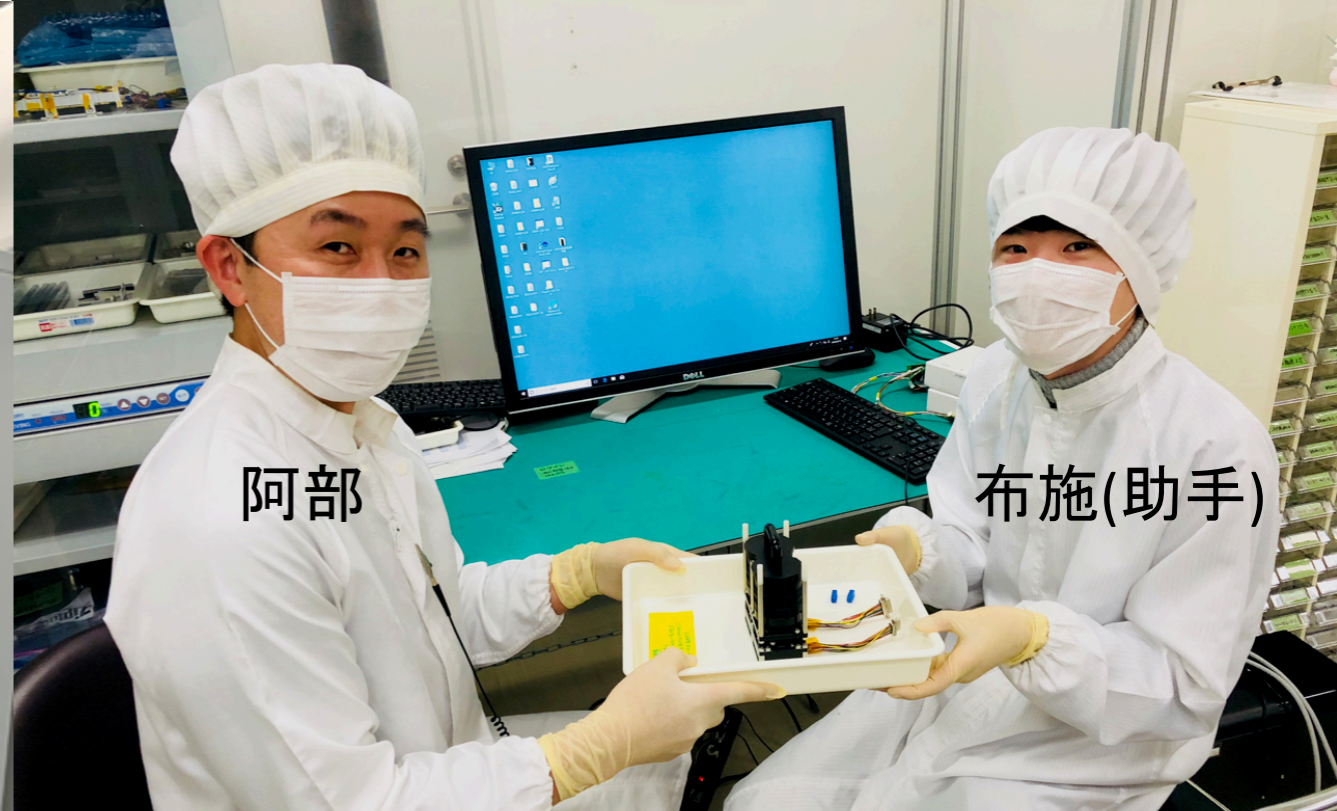
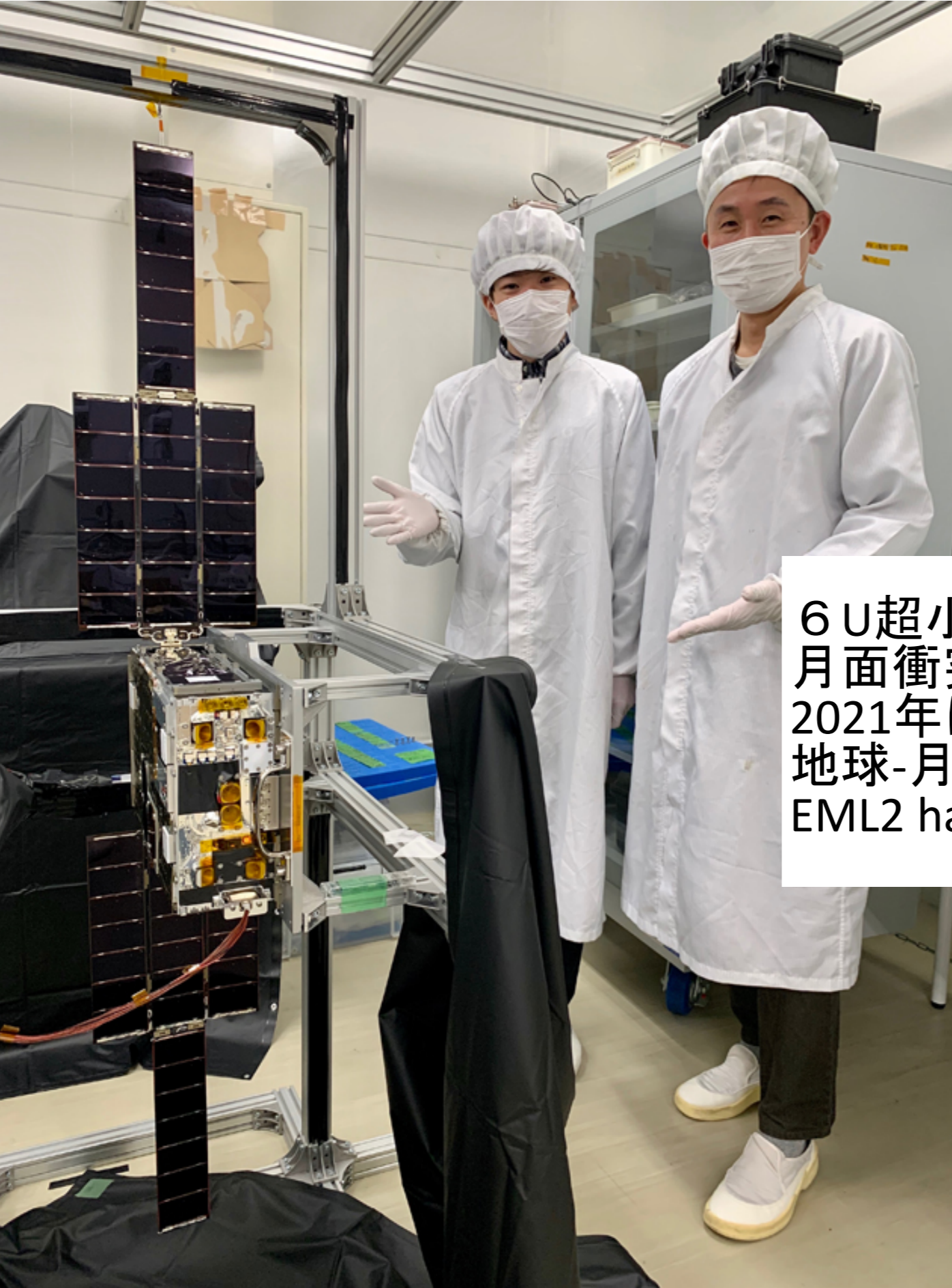


Left: notional EQUULEUS trajectory in the Sun–Earth rotating frame.

Funase+ (2020)

Right: arrival and science orbit in the Earth–Moon rotating frame.

\*LGA: Lunar Gravity Assist, EML2: Earth-Moon L2 p



阿部

布施(助手)

6U超小型探査機エクレウス(東大/JAXA)  
月面衝突閃光観測カメラ・デルフィヌス搭載  
2021年にNASA-Artemis1で打ち上げ  
地球-月ラグランジュ点 EML2へ向かう  
EML2 halo軌道での長時間連続観測を計画





ラグランジュ点から  
月面衝突閃光を狙え!

2016年にEQUULEUSに搭載するオプション機器が、柳澤正久(電気通信大学)、矢野 創 (ISAS)、船瀬 龍(東京大学)と私で検討され、世界初の宇宙からの月面衝突閃光(Lunar Impact Flash、以下LIF)の観測は、「将来の有人探査を推進するのに役立つものであること」というNASAの要請\*にも合致し、超小型で実証する意義は大きいと意見が一致しました。デルフィヌス(DELPHINUS: DEtection camera for Lunar impact PHenomena IN 6U Spacecraft)すなわち「いるか座」は、夏の夜空に「エクレウス(こうま座)」と並ぶ小さな星座から名を冠しています。

彗星や小惑星を起源とする直径 $\mu\text{m}$ ~mの流星体(メテオロイド)が秒速数10kmで地球大気に突入する際の発光現象が「流星」です。一方、大気のない月面にメテオロイドが直接衝突すると、LIFが可視光から近赤外波長域で発生します。地球から観測される一般的なLIFは、直径数cm~数10cmのメテオロイドの衝突に伴う、明るさ5~10等級、継続時間0.01~0.1秒の閃光で、1999年「しし座流星群」の際に初めて観測された現象です。

「火球」は、直径が数cm以上のメテオロイドによる稀な流星現象ですが、広大な月面を利用すると、火球サイズの衝突頻度とサイズ分布を約100倍効率良く調査することができます。NASA月周回衛星LROによる月面高解像度撮影から、新しいクレーターが多数発見されており、低重力下の月面では、衝突に伴うクレーター放出物が遠方まで飛ばされること

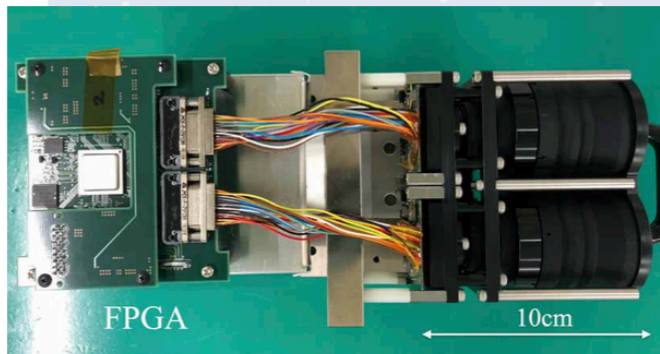


図1: DELPHINUSのフライトモデル

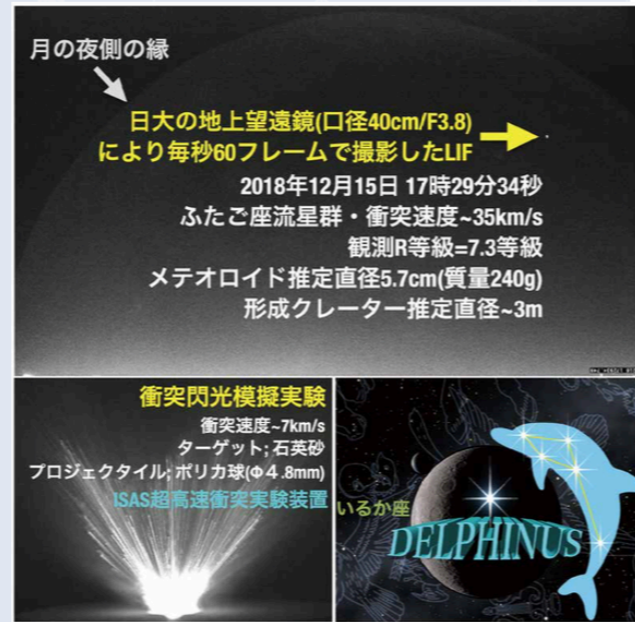


図2: LIF望遠鏡観測上、LIF模擬実験左下、DELPHINUSロゴマークと「いるか座」(右下)

もわかってきました。つまり継続的なLIF観測は、メテオロイドの衝突と飛散放出物による月面活動へのリスク評価に関わる、重要な月面環境モニターとも言えます。

DELPHINUSの開発では、まず、高感度CCDイメージセンサ搭載で宇宙実績のあるカメラモジュールを、北大と東北大から提供していただきました。次に、太陽離角45度までの観測を達成するため、月面の昼側からの迷光を低減する遮光板をセンサー前に設け、可視光の99.965%を吸収するカーボンナノチューブから構成される「ベンタブラック」を鏡筒内部のコーティングに採用した、焦点距離50mm/F1.4レンズ(設計波長380-750nm)を新規開発しました。カメラが2台あるのは、電気ノイズや宇宙線などの誤検出を除外するためです(図1)。每秒60枚のVGA白黒画像を連続取得してLIF候補を機上でリアルタイム検出しながらクリップ画像を生成するための画像処理用FPGA基板も新規製作しました。DELPHINUSの各種試験・性能評価や専用画像処理アルゴリズム開発などは、日大、電通大、東大の学生らの研究テーマとしても取り組んできました。

NASA成層圏赤外線天文台「SOFIA」による航空機観測から、月面全体に水分子が存在することが示唆され、NASA月大気・塵探査機「LADEE」に搭載された質量分析器により、年間を通じた多数の流星群極大のタイミングで月面から水蒸気が放出されていることが発見されています。これらの現象を理解する上でも、メテオロイドの月面衝突現象のメカニズムを詳しく知る必要があり、我々のグループでは、地上観測や室内実験にも取り組んでいます(図2)。

米国NASAや欧州NELIOTAでは、これまで計約600イベントのLIFの観測に成功していますが、地上観測では、三日月から半月の限られた観測期間に加え、地球で反射した太陽光が月面夜側を照らす「地球照」という悪条件が重なり、統計的な議論を行う良質なデータが不足しています。超小型探査機EQUULEUSで向かうEML2/ハロー軌道からLIF観測を実証し、将来の月周回有人拠点からの定常観測などにも繋げたいと考えています。 阿部 新助(あべしんすけ)

\* ISASニュース 2020年11月号本連載第1回目参照



ラグランジュ点から  
月面衝突閃光を狙え!



dearMoon

2023年に月へ行く  
クルー8名を世界中から募集



前澤友作&イーロンマスク特別インタビュー

# dearMoon PROJECT

2023年に計画されている、民間人初となる月周回の宇宙プロジェクト。  
イーロンマスク率いるSpaceX社のロケットに乗り、月を周回。  
約1週間で地球へと帰還する。

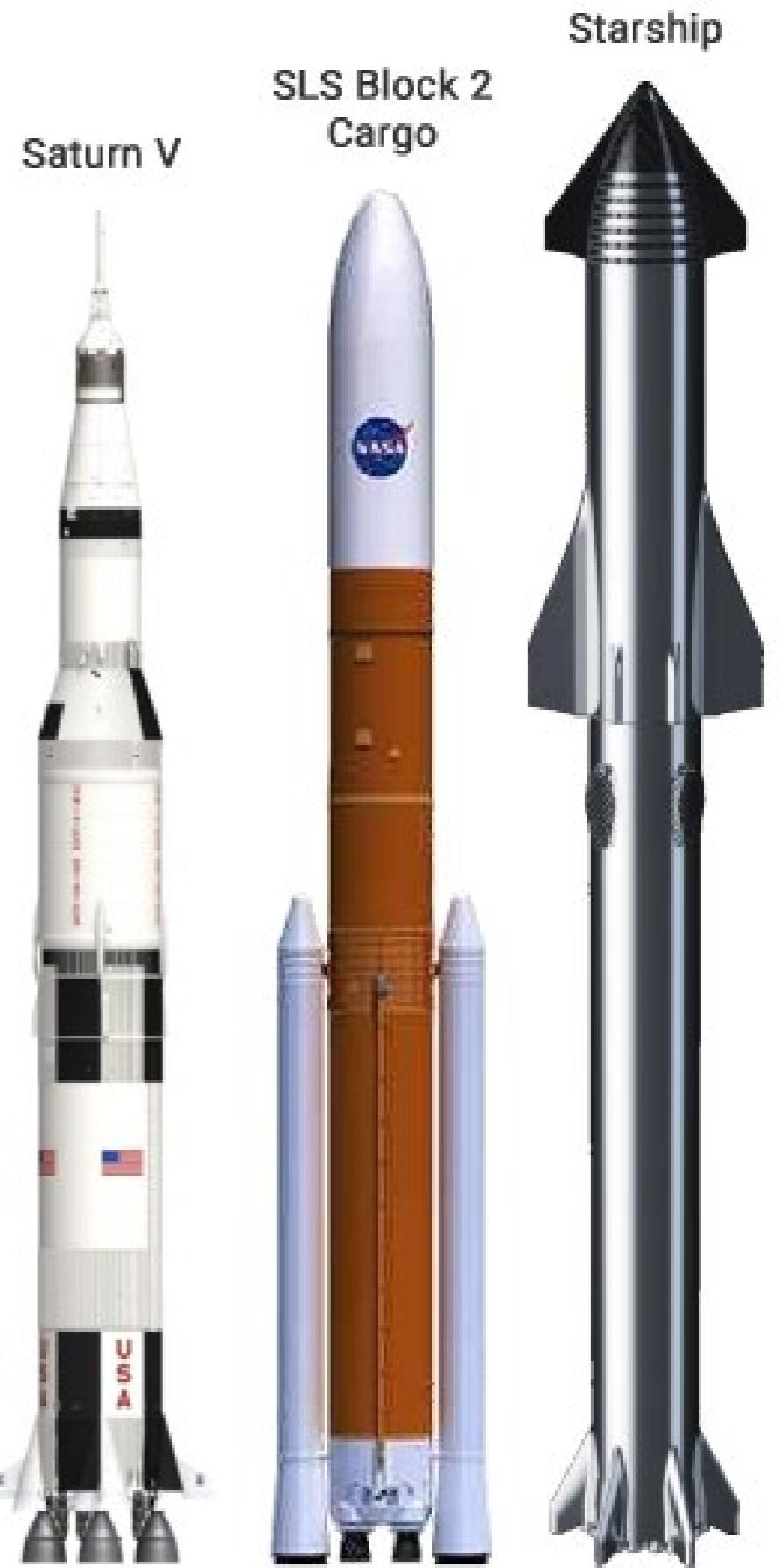
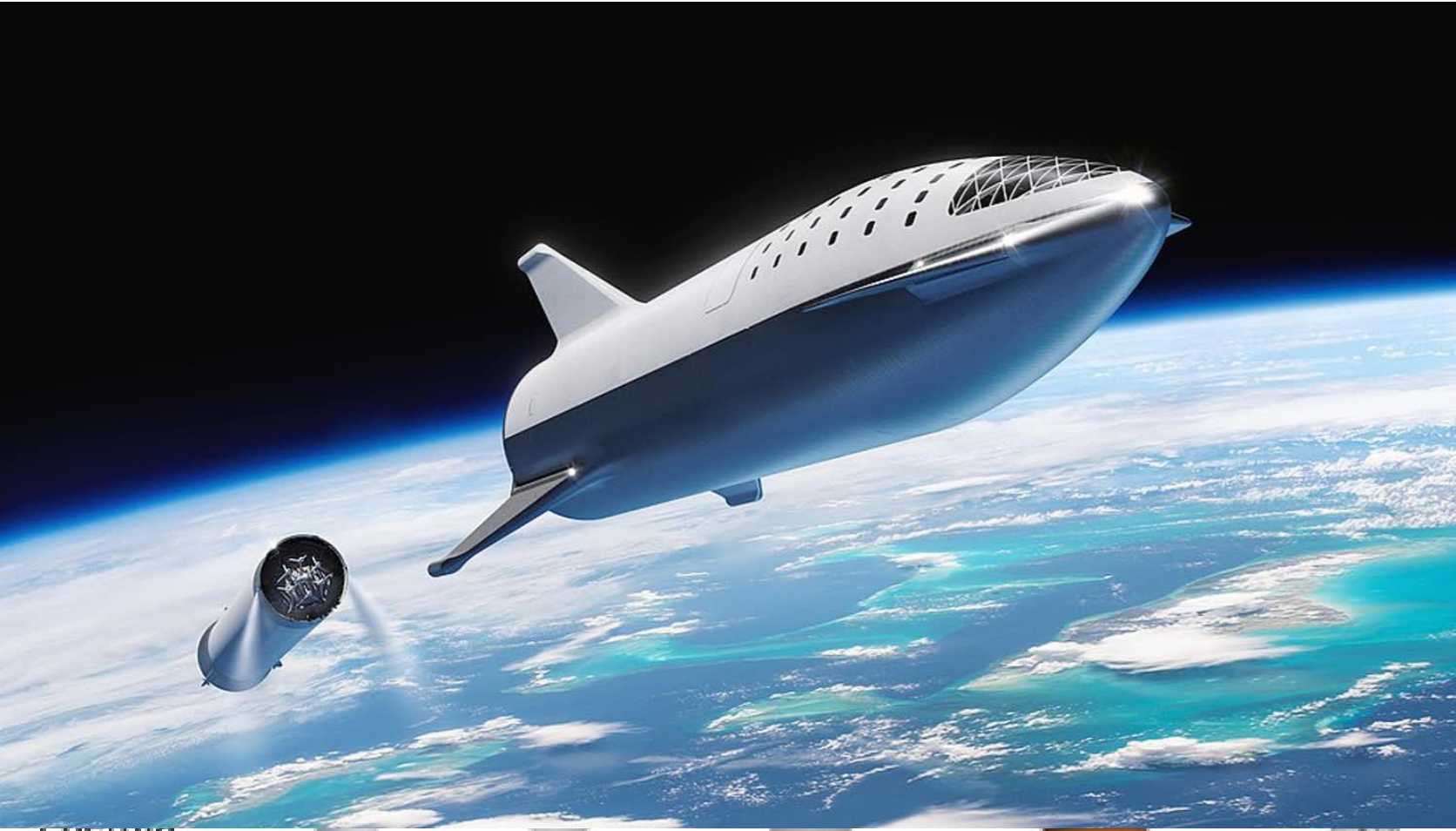
2018年に日本人実業家前澤友作が本プロジェクトの全席の権利を取得。  
前澤の「宇宙へ行くチャンスをより多くの、より多様な才能に開きたい」との願いから、  
2021年3月、8名の乗務員を世界中から募集することが発表された。



## 応募スケジュール ~100万人(259カ国)

- STEP 1** 事前登録 ~3/14 (日本時間23:59締切)  
事前登録した方は全員STEP2へ進みます!
- STEP 2** 書類選考 ~3/22 (日本時間23:59締切)
- STEP 3** 課題選考 ~120人(日本人7名)
- STEP 4** オンライン面談
- STEP 5** 最終面談+メディカルチェック  
- 5月下旬(予定)





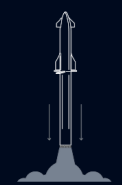
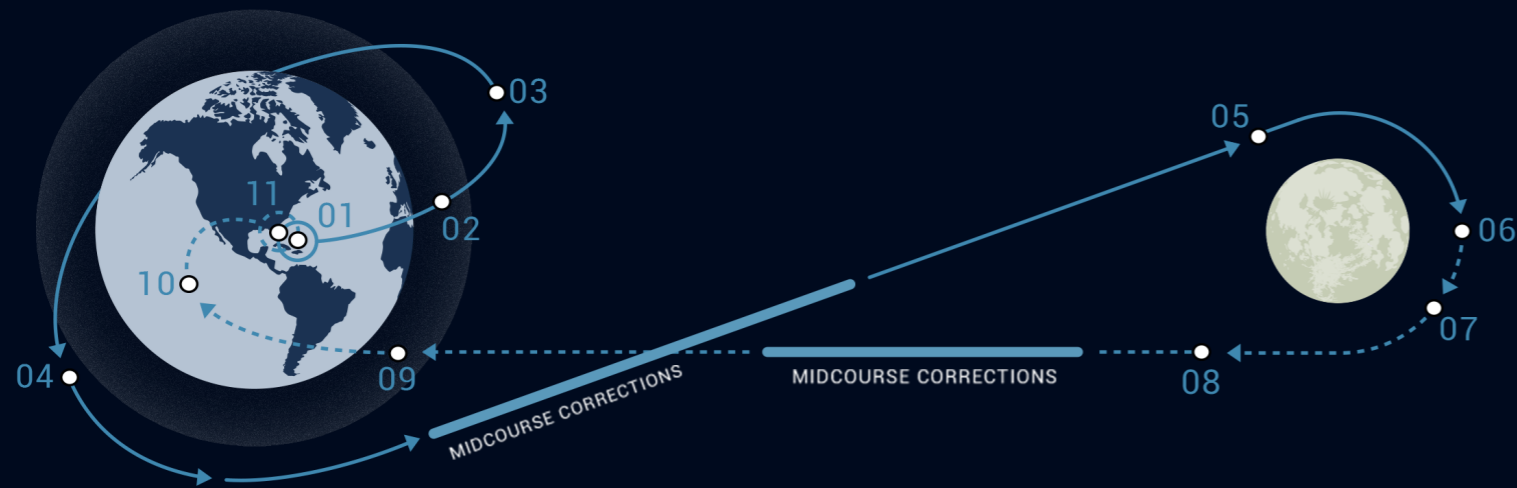
USA  
110.6 m  
140 t

USA  
111.3 m  
130 t

USA  
120 m<sup>51</sup>  
150 t

# FLIGHT PLAN

SPACEX



DD:HH:MM:SS  
00:00:00:00  
01  
Launch



00:00:02:51  
02  
Booster Separation



00:00:08:02  
03  
Park Orbit Insertion



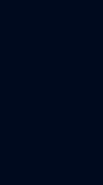
00:00:38:02  
04  
Trans Lunar Injection



02:05:42:35  
05  
Begin Lunar Flyby



02:20:59:06  
06  
Perilune



02:21:13:47  
07  
Earth Rise



03:12:51:21  
08  
End Lunar Flyby



05:22:43:42  
09  
Entry Interface



05:22:56:07  
10  
Reverse Thrusters



05:23:01:27  
11  
Landing



## ***Main Space Missions***

*1999-2002 NASA Leonid Multi-instrument Airborne Campaign*

*2006 NASA Stardust Capsule Reentry Observing Campaign*

*2001- JAXA HAYABUSA1, HAYABUSA2*

*2016- Univ. of Tokyo/JAXA EQUULEUS*

# ***Shinsuke Abe***

*Astronomer / Interdisciplinary Artist*

*I'm an astronomer and professor of Aerospace Engineering from Japan,*

*日本人の天文学者で、航空宇宙工学の准教授です。*