

The approach for the origin of the water through the remote D/H observation (Case for The Comet Interceptor mission)

吉岡和夫，笠原慧，米本周平，桑原正輝，村上豪，船瀬龍，尾崎直哉，田口真，亀田真吾，川原琢也

要旨

彗星や小惑星などの太陽系小天体において、水 (H_2O) は太陽系の進化過程の解明と生命存在可能性の鍵を握る重要な物質である。多くの場合、天体内部に保持されている水は、太陽光や潮汐加熱により表層もしくは宇宙空間に放出され、さらに紫外線により水素原子・酸素原子に解離される。従って、これらの二次生成物の空間分布や同位体組成比の把握も、太陽系の成り立ちを理解する上で極めて重要である。一般的な彗星の場合、核の大きさは数10km程度であるが、核をとりまく水素ガス（通称：彗星コマ）は、1AUサイズにまで広がることが知られており、重要な観測対象である。

我々は、光を用いた遠隔的な観測を通して、上述の水星コマを始めとする天体を取り巻く水素ガスの密度分布と同位体比（D/H比）を導出する手法を開発している。具体的には、水素の主量子数が2から1へ遷移する際に発せられる輝線（Lyman- α ）を用いて、水素ガスの密度分布を導出する。さらに、吸収セルフィルタと呼ばれる特殊な光学素子を光軸上に配置することで、水素と重水素の輝線を選別できる。なお、水素と重水素のLyman- α の波長はそれぞれ（121.567nm, 121.534nm）であり、33pmの波長差がある。通常の干渉フィルタでは選別不可能なこれらの輝線を、水素分子を封入したセル型フィルタによる原子吸光により選択的に観測する。

本発表では、上述の水素・重水素の遠隔分離観測手法を具体的に説明し、さらに応用例としてESA主導のF-class ミッション（Comet interceptor）への搭載を検討しているLyman- α 撮像装置の概要を紹介する。

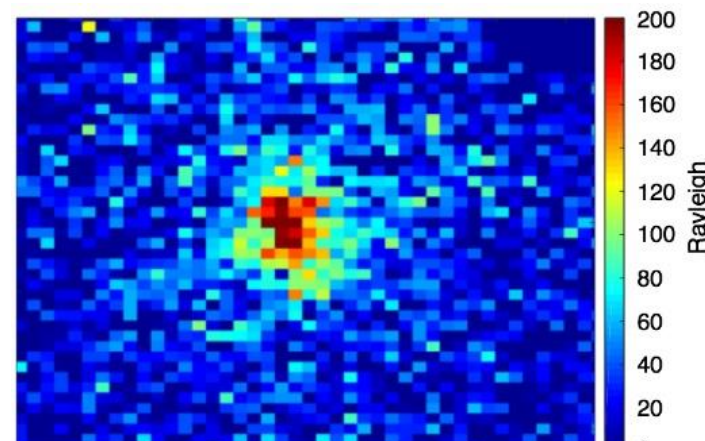
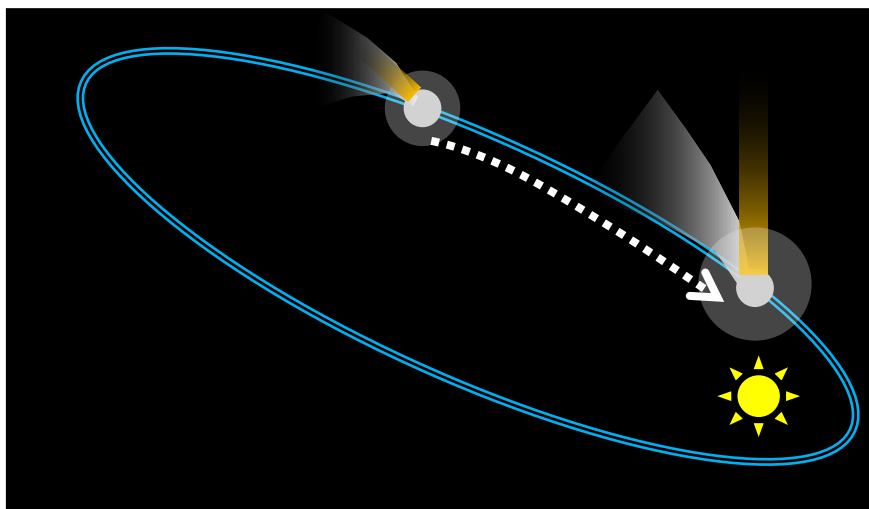
The approach for the origin of the water through the remote D/H observation (Case for the Comet Interceptor mission)

K. Yoshioka, S. Kasahara, S. Yonemoto⁽¹⁾, M. Kuwabara, G. Murakami, R. Funase, N. Ozaki⁽²⁾, M. Taguchi, S. Kameda⁽³⁾, T. Kawahara⁽⁴⁾

(1) 東京大学, (2) ISAS/JAXA, (3) 立教大学, (4) 信州大学

彗星と水素原子

- 彗星の核およびコマの一部は氷 (H_2O) やOHで構成される。
- 太陽の紫外線を浴びた H_2O やOHから水素原子 (H) が生成される (紫外線解離)
- 彗星近傍の水素は水蒸気生成率 (彗星の活動度) を反映する
 - DNCの活動度太陽距離依存?
- 水素同位体比 (D/H) は大気散逸過程 (質量分別) や太陽系の水進化に直結する



Ly- α from 67P taken by LAICA
[Shinnaka et al. 2017]

彗星D/H比の観測

- 彗星のD/H比観測の主流は水分子の赤外分光
- 数例の“その場観測”と“紫外線分光観測”
- 赤外線観測はD/H比が低くなる傾向？

彗星のD/H比（観測手法ごとに分類）

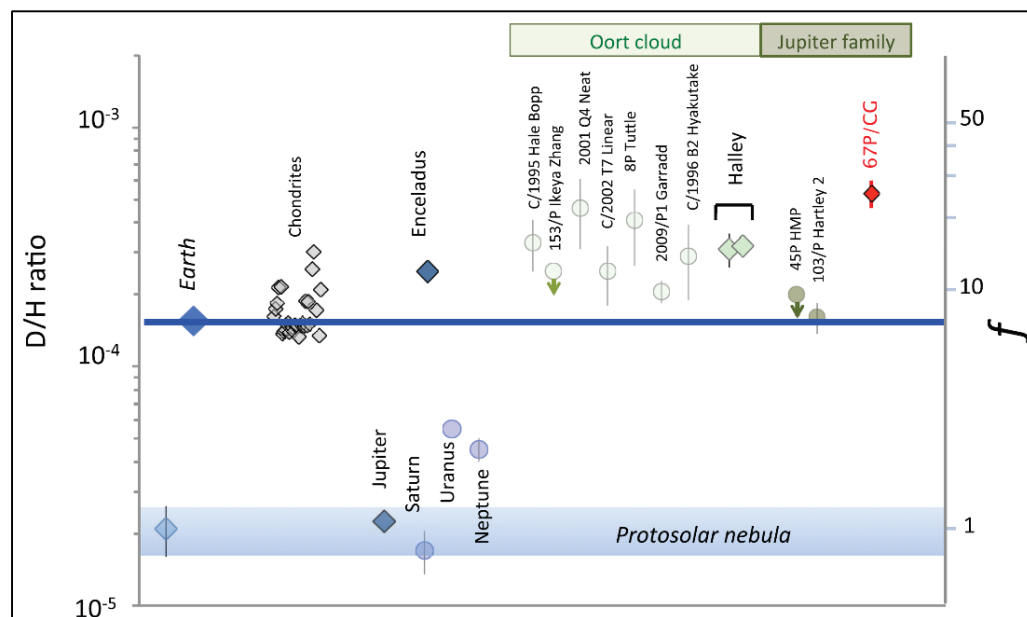
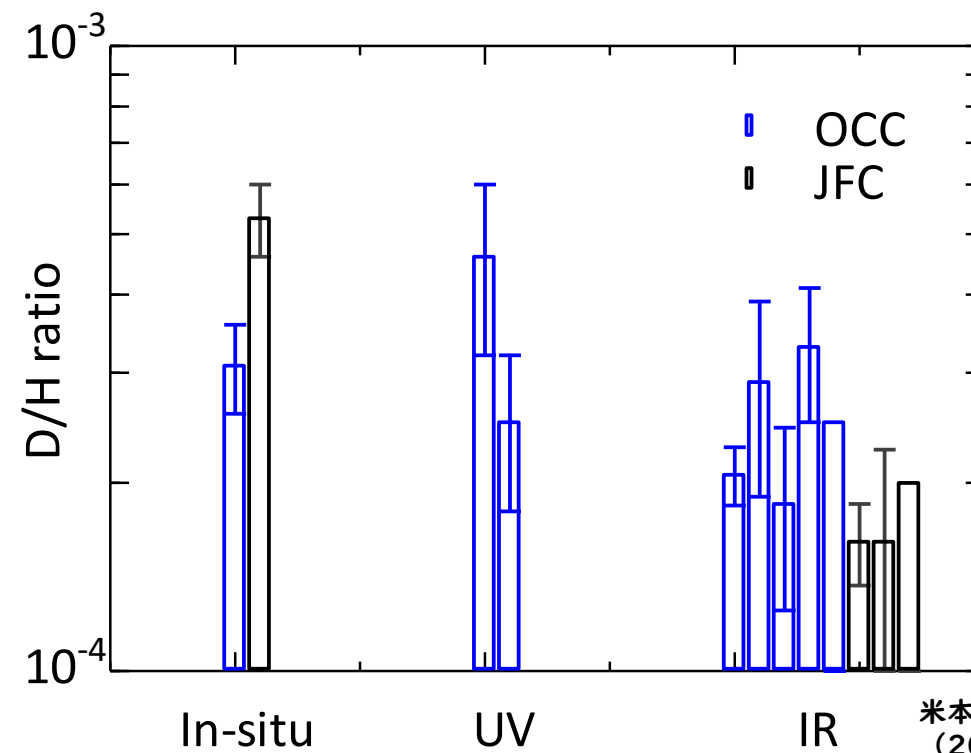


Fig. 3. D/H ratios in different objects of the solar system. Data are from (1, 2, 5–7, 26–28) and references therein. Diamonds represent data obtained by means of in situ measurements, and circles refer to data obtained with astronomical methods.

Altwegg et al. 2015



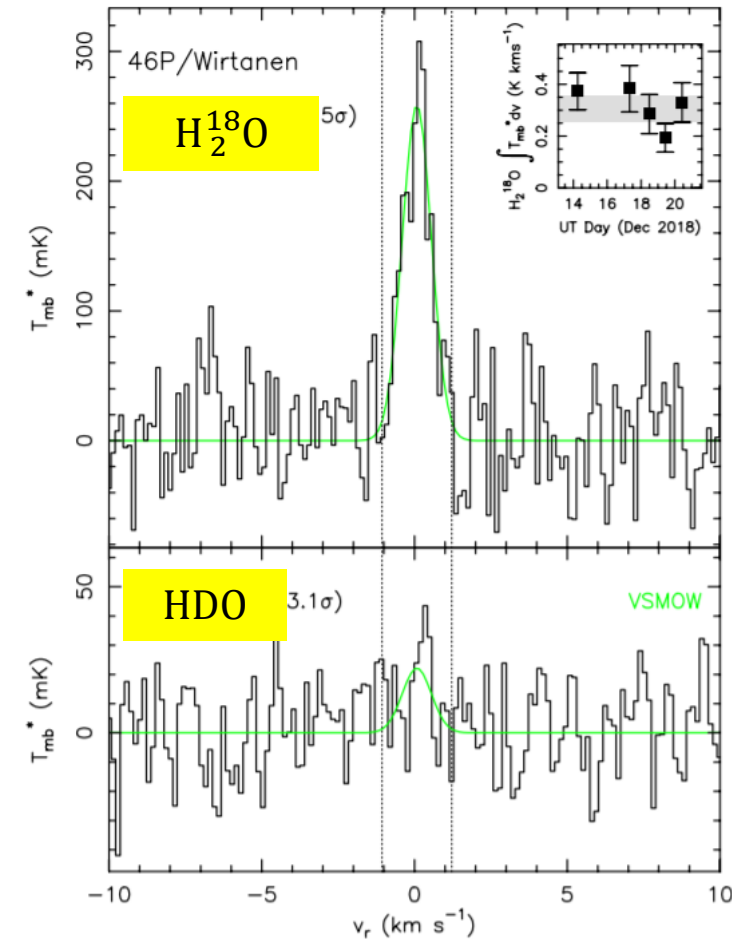
米本M論
(2020) より

赤外線によるD/H測定の実例（SOFIA）

- 手法：成層圏(11,000–14,000km)の飛行機から2.7m望遠鏡を用いた赤外分光
- 対象：46P/Wirtanen (JFC) 彗星近傍の H_2^{18}O , HD^{16}O
 - H_2^{16}O は観測不可（大気の影響）
 - D/Hの議論をするためにはO同位体比を仮定（例： $^{16}\text{O}:^{18}\text{O} = 500:1$ ）する必要がある。



航空機一体型の観測施設（SOFIA web.）

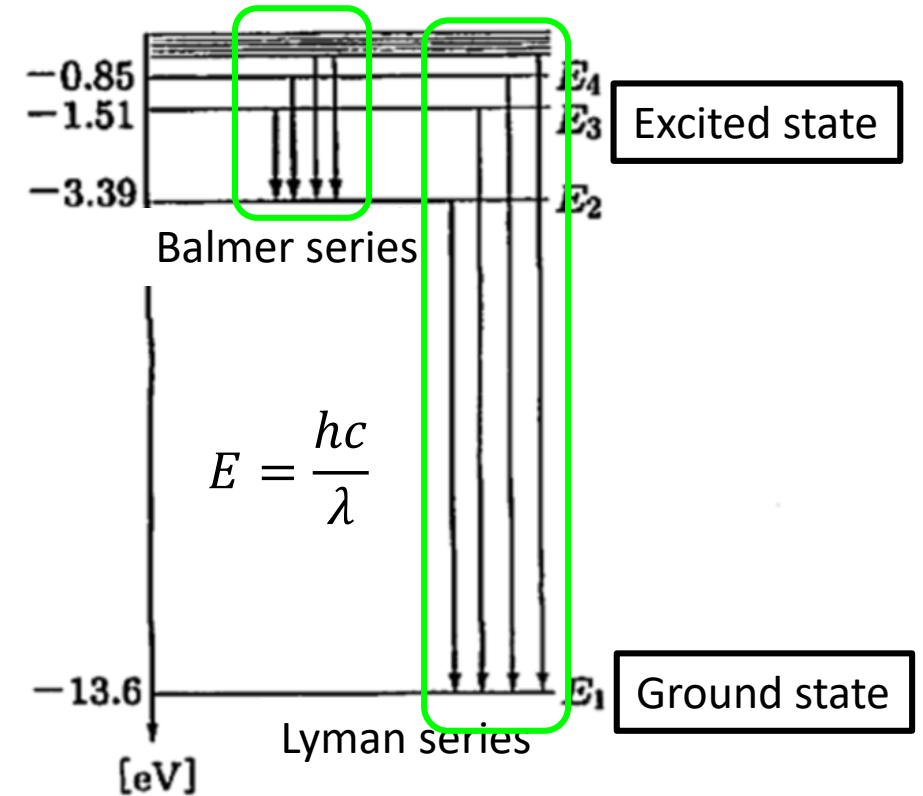


SOFIAで得られたIRスペクトル

Lis et al. 2019

D, H (輝線) の観測

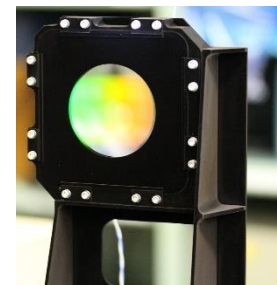
- H, DそれぞれLyman- α 線をもつ
 - H: 121.56701 nm
 - D: 121.53379 nm ($\Delta\lambda=33\text{pm}$)
- 主量子数 ($n=2,3,4\cdots$)から基底状態に遷移する際に放出される光エネルギー：Lyman系列
 - $n=2$ に遷移する輝線群は可視領域 (Balmer系列)
- $N=2$ から $n=1$ への遷移確率はどの原子のどの遷移よりも高い ($\rightarrow$ 宇宙一明るい輝線)
- H, Dの明るさ比 (密度比)
 - D, H輝線強度を別々に測定できれば、それぞれの存在比を遠隔的に測定可能



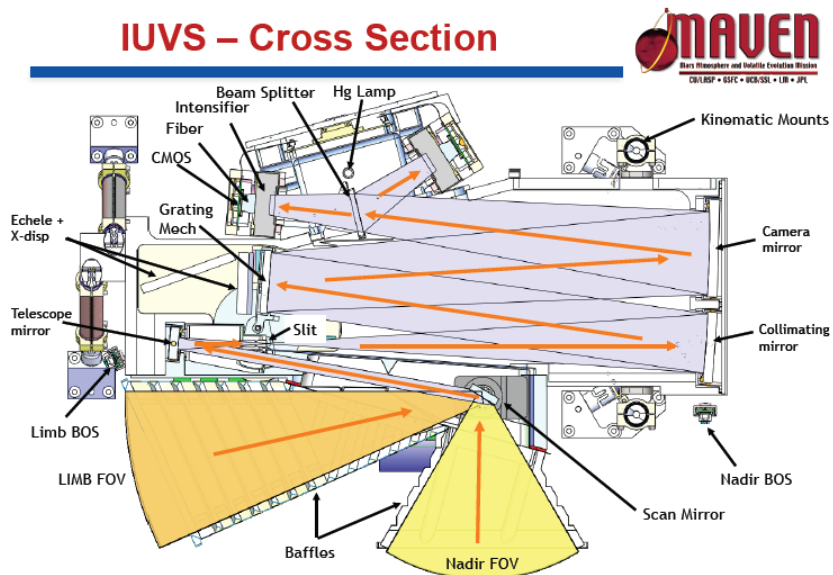
水素原子のエネルギー準位

輝線の分離方法

- 波長分解能 $>8,000@120\text{nm}$ が必要
 - H: 121.56701 nm , D: 121.53379 nm ($\Delta\lambda=33\text{pm}$)
 - HST/STIS: $\sim 30,000$, MAVEN/IUVS: $\sim 15,000$
 - Hisaki/EXCEED: $200\sim 400@120\text{nm}$
- やはり正統派の手法で分光すべきか
 - エッセル分光 (HST/STIS, MAVEN/IUVS)



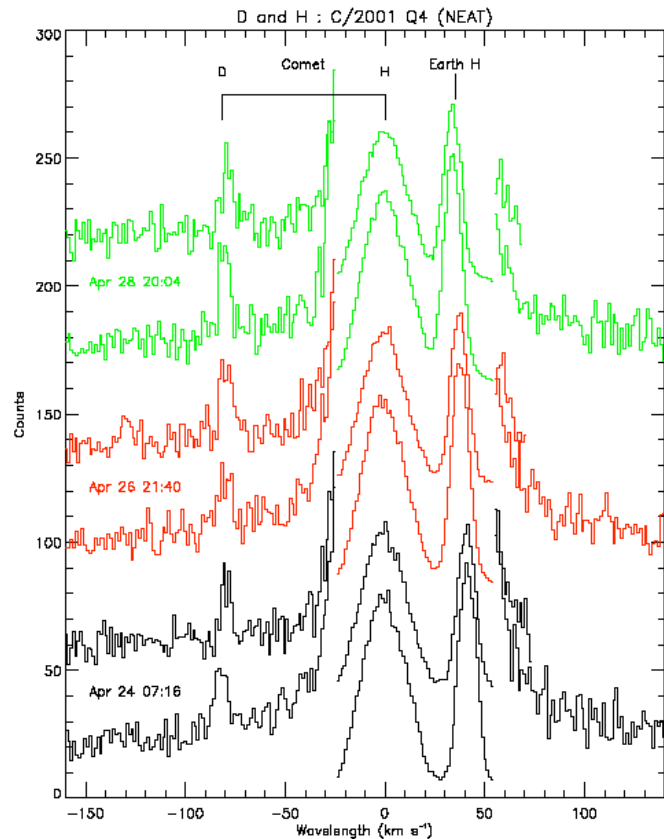
ひさき衛星搭載の分光器
1800 lines/mm



IUVS on board MAVEN spacecraft, 26kg, 20W
(CU web.)

紫外線によるD/H測定例（HST）

- ・ 高分散分光器とドップラースhiftをうまく使った観測



C/2001 Q4 (NEAT)

HST/STIS高分散分光で得られた彗星のスペクトル

$$D/H = (4.6 \pm 1.4) \times 10^{-4}$$

Weaver et al. 2008

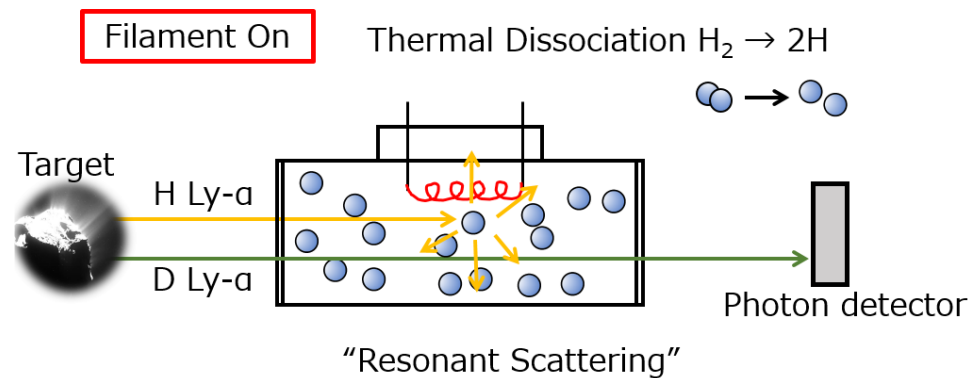
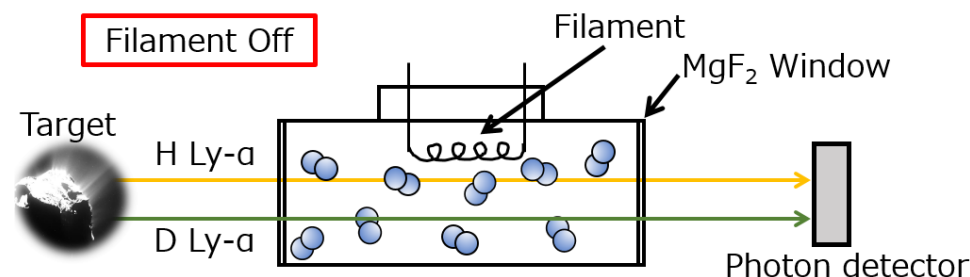
Jehin et al. 2009

吸収セルフィルタによる簡便な(?)分光

- 特定波長 ($\text{H Ly-}\alpha$) のみを吸収 (実際には共鳴散乱) する
- H輝線 ($\text{Ly-}\alpha$) の超高精度分光が可能
- 輝線の吸収度の解離度依存性から温度も測定可能 (後述)



ガラスセル (フィラメント導入端子つき)



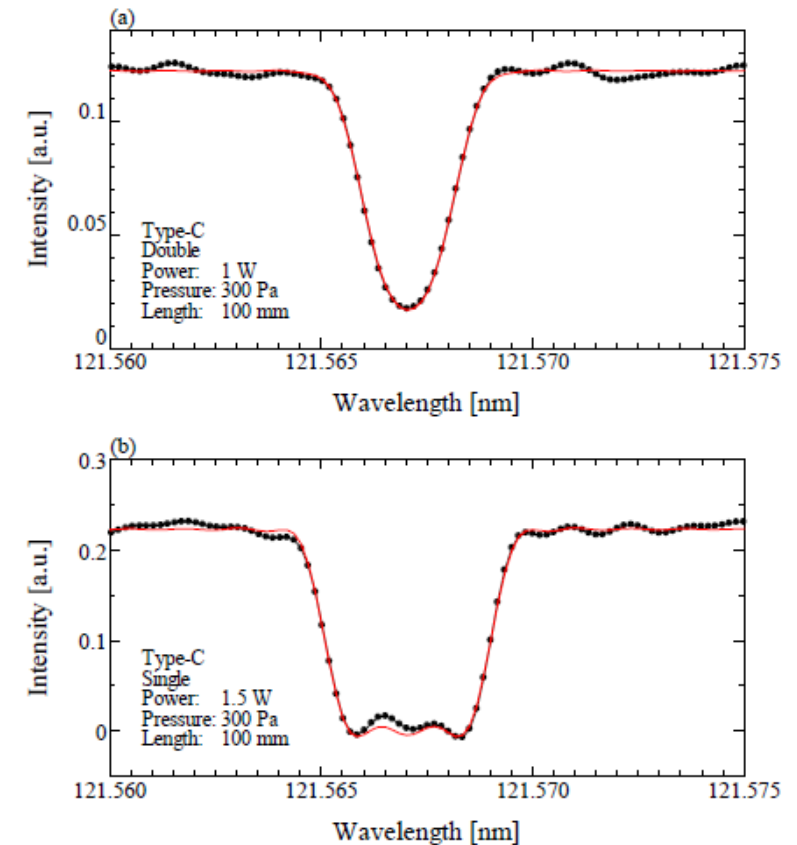
吸収セルのキーワード

- フィルタ
- 共鳴散乱
- 熱解離 (分子 $\Rightarrow$ 原子)

フィラメントを加熱して水素分子を解離
(水素原子が生成される)

セル内の水素原子による吸収特性

- フィラメントの温度（印加電力）により水素解離度が変わる。
 - 低温→解離度低い→吸収効率低い&吸収幅狭い
 - 高温→解離度高い→吸収効率高い&吸収幅広い
- フィラメントの材質や形状により，吸収効率や寿命が大きく異なる（→開発要素）
- フィラメント電力を多段式にすれば，対象ガスの温度を推定できる（→校正勝負）。

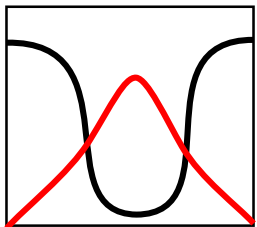
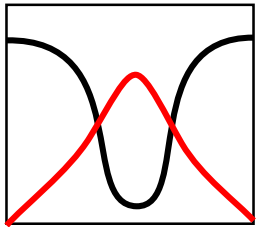
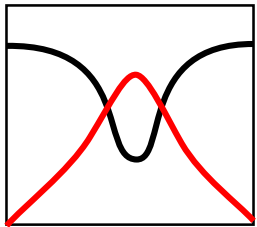


セルによる吸収スペクトルの
温度依存性（桑原D論）

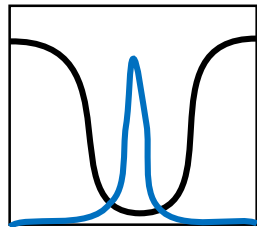
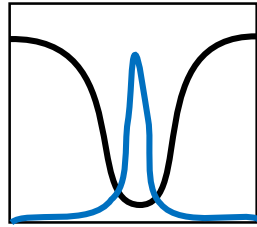
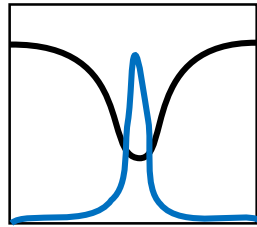
セルを用いた温度推定の原理

- フィラメント電力 vs 透過率の関係から温度を導出する。

高温な観測対象



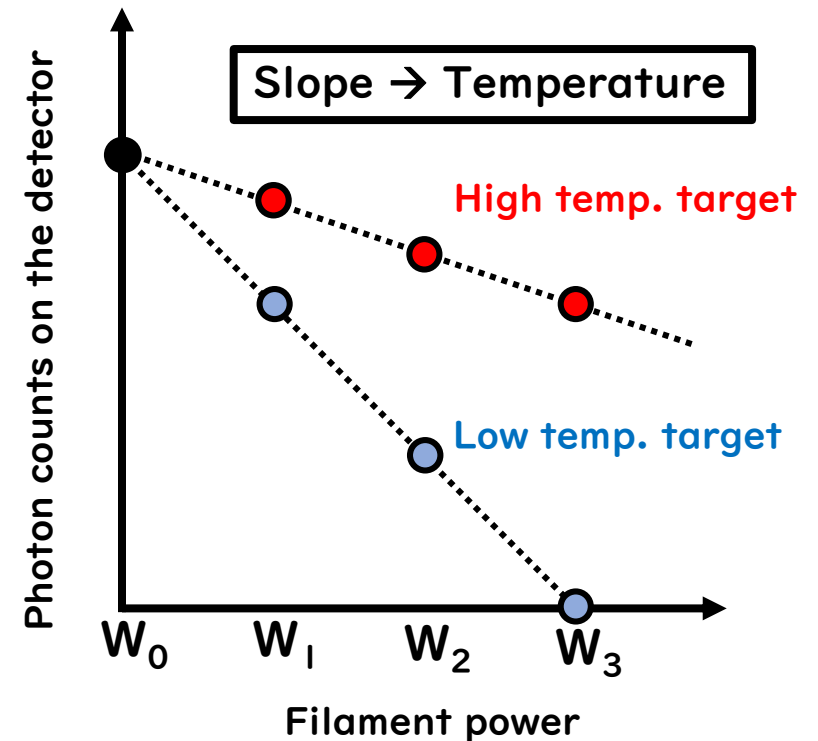
低温な観測対象



Filament temp. = low

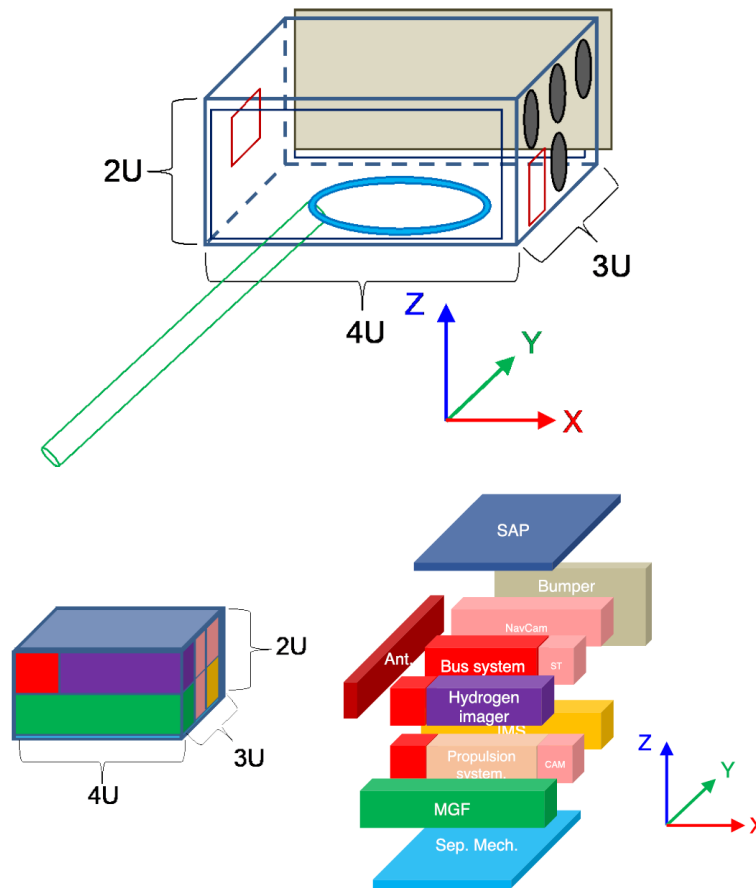
Filament temp. = mid.

Filament temp. = high



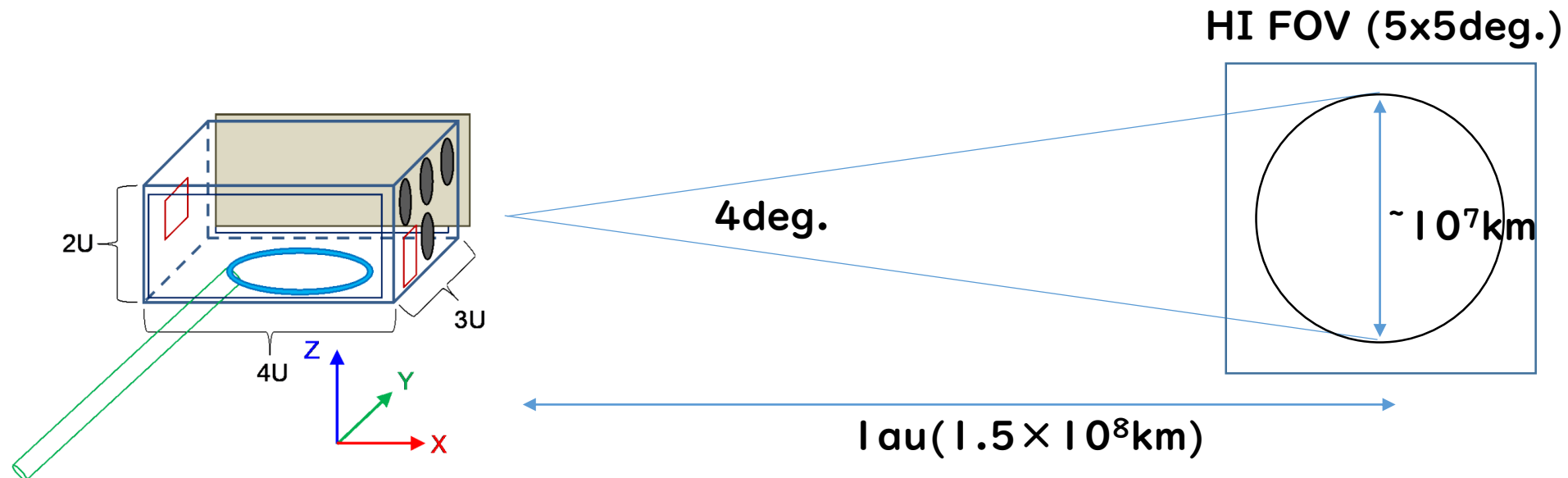
Comet interceptor 搭載案 (TBD)

- 寸法 : $<2.5U$
- 質量 : $<3\text{kg}$
- 電力 : $<5W$

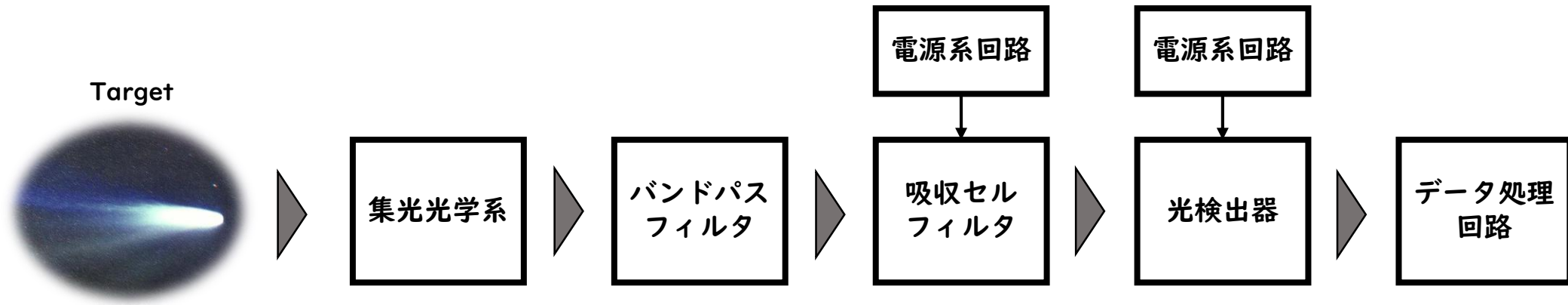


Comet interceptor 搭載案

- 彗星核： $\sim 1\text{ km}$
- H_2O コマ： 10^5 km
- H コマ： 10^7 km
- 寸法： $< 2.5\text{ U}$ ，質量： $< 3\text{ kg}$ ，電力： $< 5\text{ W}$

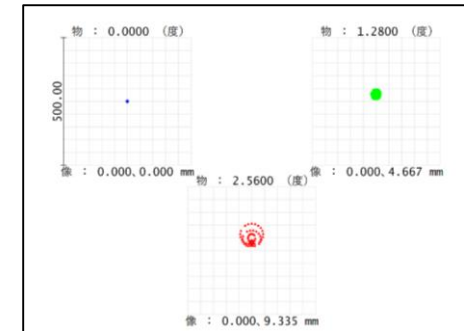
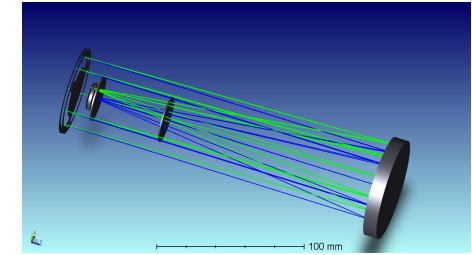
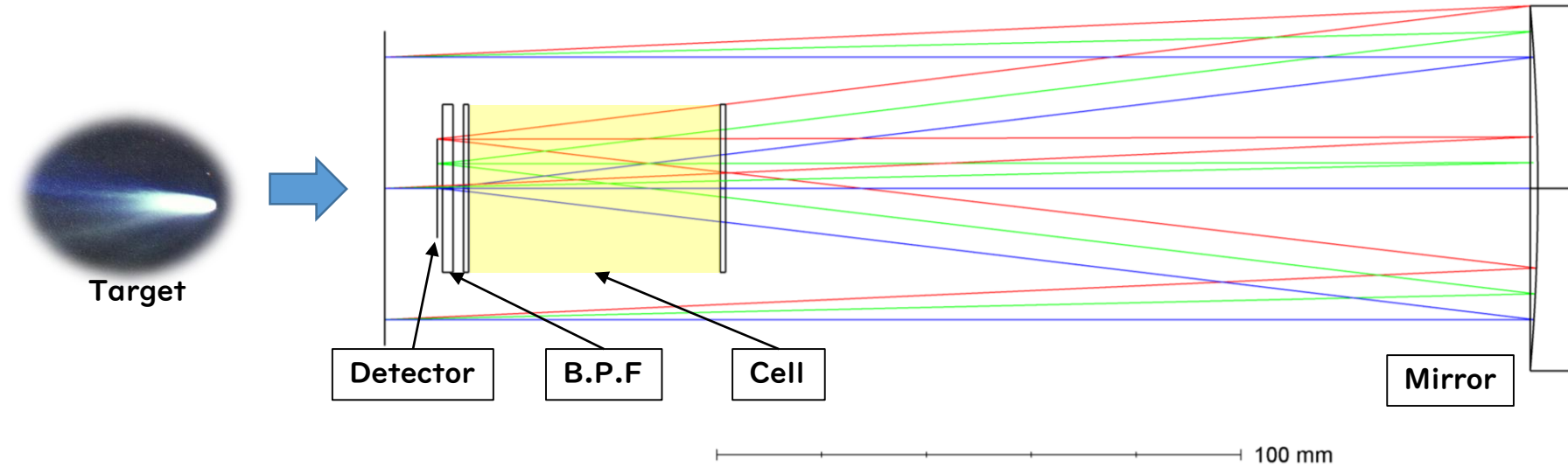


装置概要



- 集光光学系：観測対象からくる光を効率よく集める
- バンドパスフィルタ：対象以外（Ly- α 以外）の光を極力除去する
- セルフィルタ：H,DのLy- α を選別する
- 光検出器：光学系から到来する光を電気信号に変換する
- データ処理回路：光検出器の信号を画像化し，探査機DRに送信する
- 電源系回路：セルフィルタのフィラメントと光検出器を動作させる

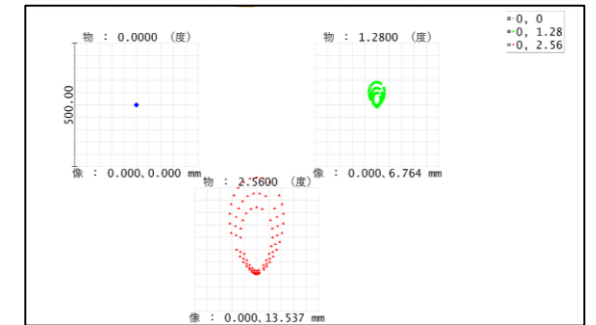
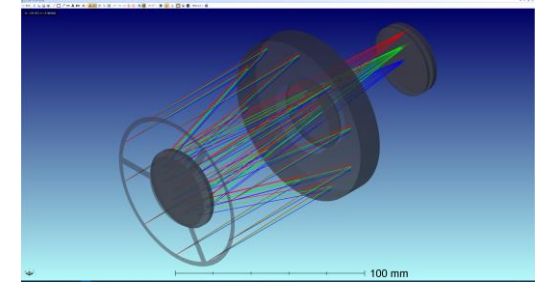
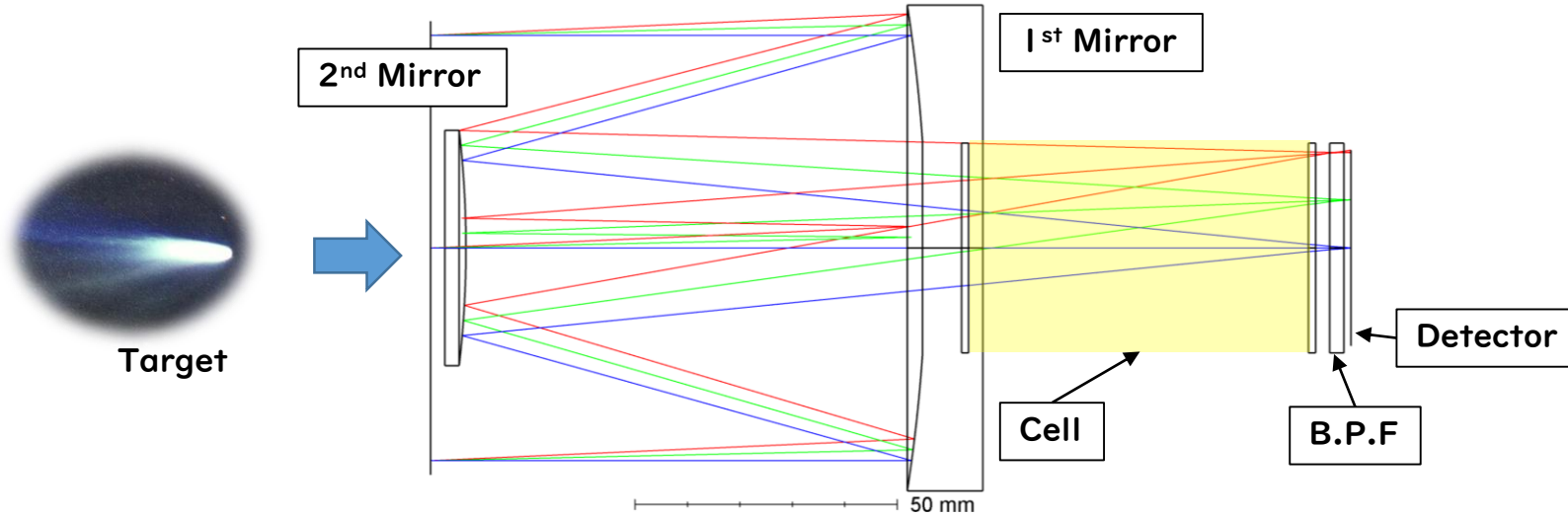
設計案Ⅰ [220mm x 70mm x 70mm]



Spot diagrams (optimized for center of the image)

Parameters	Values	Note
Field of view	$\pm 2.56^\circ$	~900km from 10,000km (1auの距離からコマ全体を見渡せる画角)
Image size	256 x 256 pix	0.02deg./pix (3.5km from 10,000km)
Aperture and mirror size	$\Phi 50\text{mm}$, 70mm	Al/MgF ₂ coating, f=209mm (F/4.2)
Cell filter	$\Phi 3\text{cm}$, L=5cm	MgF ₂ (t=1mm x 2), Transmittance: ~50% (filament off)
Band pass filter	$\Phi 2.5\text{cm}$	Transmittance ~5% (<<1% OI 1304 transmittance)
Detector	$\Phi 2\text{cm}$ MCP+RAE(?)	1 pixel = 0.11x0.11mm, QDE~10%
Spot diagram (ECE80%)	0.02mm - 0.1mm	Smaller than 1 pixel
Effective area	0.02 cm ²	Geometrical: 10cm ² , Efficiencies: 0.8 x 0.5 x 0.05 x 0.1
Count rate	12 counts/min./pix/kR	1 pixel: 0.02deg.x0.02deg.

設計案2 [180mm x 85mm x 85mm]

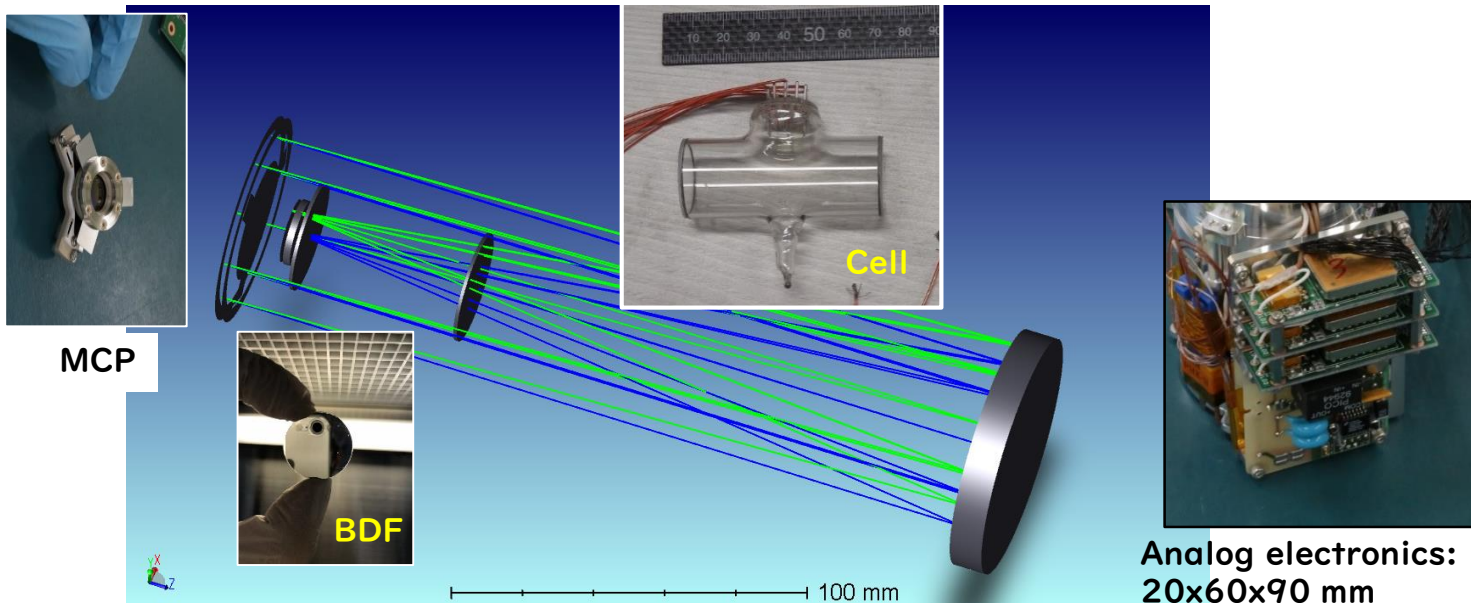
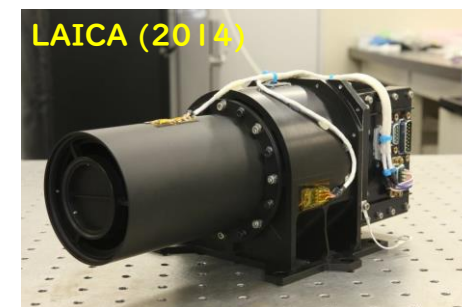
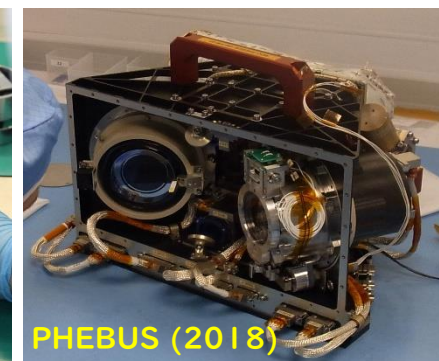


Spot diagrams (optimized for center of the image)

Parameters	Values	Note
Field of view	$\pm 2.56^\circ$	~900km from 10,000km (1auの距離からコマ全体を見渡せる画角)
Image size	256 x 256 pix	0.02deg./pix (3.5km from 10,000km)
Aperture and mirror size	$\Phi 60\text{mm}$, 66mm	Al/MgF ₂ coating, f=308mm (F/5.1)
Cell filter	$\Phi 3\text{cm}$, L=5cm	MgF ₂ (t=1mm x 2), Transmittance: ~50% (filament off)
Band pass filter	$\Phi 2.5\text{cm}$	Transmittance ~5% (<<1% OI 1304 transmittance)
Detector	$\Phi 2.8\text{cm}$ MCP+RAE(?)	1 pixel = 0.11 x 0.11 mm, QDE ~ 10%
Spot diagram (ECE80%)	0.02mm - 0.3mm	
Effective area	0.056 cm ²	Geometrical: 35cm ² , Efficiencies: 0.8 x 0.8 x 0.5 x 0.05 x 0.1
Count rate	33 counts/min./pix/kR	1 pixel: 0.02deg.x0.02deg.

構成要素と実績例

- 集光系：PRICYON/LAICA, Hisaki/EXCEED, etc.
- BPF：NOZOMI/UVS, PR./LAICA
- Cell：NOZOMI, SIHLA(TBD)
- 検出器：Bepi/PHEBUS, Hisaki/EXCEED, etc.
- アナログ回路：EQUULEUS/PHOENIX



外径寸法: $< 95 \times 95 \times 250$ mm
概算質量: ~ 2 kg (incl. housing)
概算電力:
1.0 W (standby mode)
1.5 W (observation mode without cell)
4.0 W (observation mode with cell)
データ容量: 131 kB/Image

運用計画案（希望含む）

- L2待機中の観測は難しい（～years）
 - チェックアウトとしての準定常観測（希望） → H密度の時間変化，D/H比の時間変化
- クルーズ中（～months）
 - 定常的に彗星を観測（希望） → H密度の時間変化，D/H比の時間変化
- フライバイ時（～days）
 - 近接撮像 → 核近傍のH密度の空間分布

Parameters	観測要求	備考
Period (Cruise)	1-2回/month	
Period (Approach)	1回/週	
観測時間	10-30 分	2-4 images per operation
電力	4 W (最大)	Mode1: 1.5W, Mode2: 4.0W
データ生成量	300-600 kB	150kB/Image

まとめ

- H原子は彗星近傍に多く分布しており，その空間・時間変動は彗星活動度を示す重要な観測対象。
- 他の元素と同様に水素同位体比（D/H）も彗星科学において極めて重要。
 - 太陽系の水進化（地球の水起源？），彗星からの大気散逸の物理
- 水素コロナの観測装置（HI: Hydrogen Imager）をComet interceptor に搭載予定。
 - オプションとしてH吸収セルを搭載することでD/H比も測定可能…。
 - 2020年度計画：各パーツのBBM製作（要素試験），観測可能性検討，光学設計確定

引用文献

- Altwegg et al., 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio, Science 347(6220), 1261952, 2015.
- Jehin et al. 2009, Isotopic ratios in Comets: Status and Perspectives, Earth Moon Planet, 105:167-180, 2009.
- Lis et al., Terrestrial deuterium-to-hydrogen ratio in water in hyperactive comets, A&A 625, L5, 2019.
- Shinnaka et. al., Imaging observations of the hydrogen coma of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in 2015 September by the PROCYON/LAICA, ApJ 153:76(6pp), 2017.
- Weaver et al., Atomic deuterium emission and the D/H ratio in comets. Asteroids, Comets, Meteors, 8216, 2008.
- <https://www.sofia.usra.edu/science>, <http://lasp.colorado.edu/home/maven/>