

# 要旨

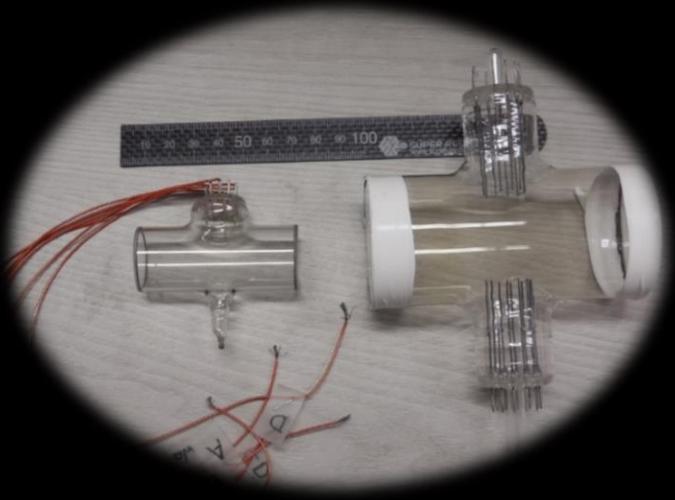
## D/H吸収セルの開発と惑星科学への貢献

吉岡和夫, 桑原正輝, 田口真, 川原琢也, 亀田真吾, 吉川一郎

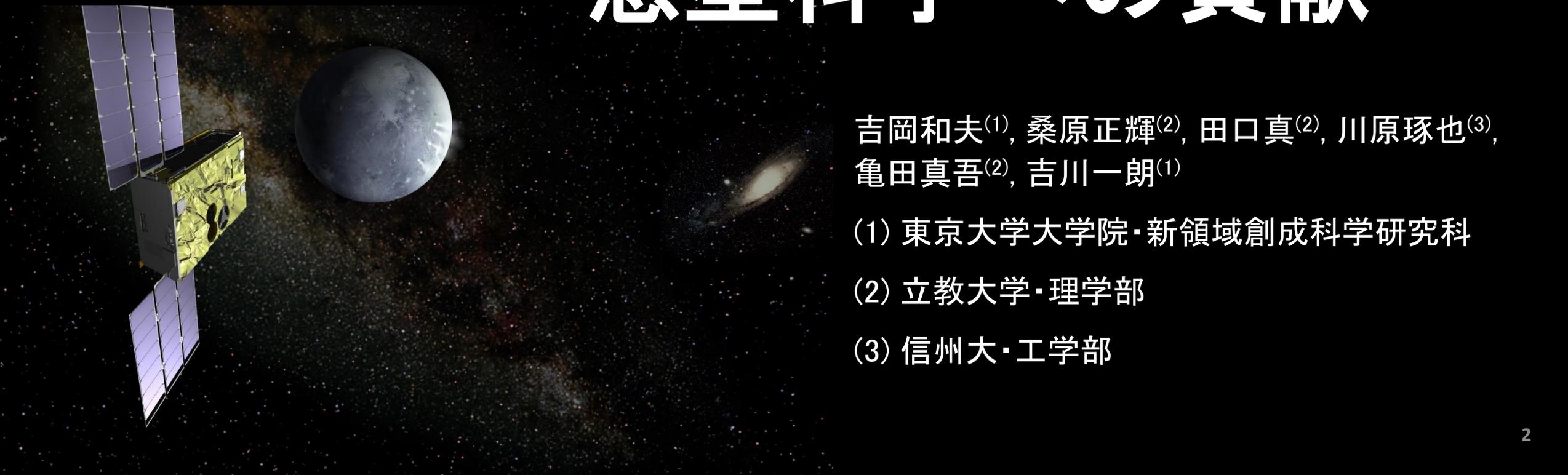
近年、50kg級の超小型に分類される人工衛星や探査機による太陽系天体の観測計画が、国内外の大学・研究機関で進められている。一般的に、予算や開発期間に厳しい制約があるため即応性と柔軟性が要求される超小型計画において、光を用いた遠隔観測は極めて重要かつ強力な手段である。具体的には、対象天体に近づくだけでも、観測装置に到来する光量が飛躍的に増大するため、軌道投入や着陸運用などの工学的に高いハードルを設けずにも斬新な科学成果を期待できるという点が強みである。

本発表では、吸収セルを用いた超高波長分解能撮像装置を紹介する。この技術は、水素原子の共鳴散乱を用いて対象天体の大気が発する水素(もしくは重水素)の輝線(ライマンアルファ、波長121.6nm)を分光観測するものである。回折格子を用いた一般的な仕組みの分光器では、重量制約を鑑みると達成不可能なほど高い分解能を実現できる観測装置であり、超小型探査機に適している。

2016年に行った放射光施設を用いた予備実験では、水素と重水素のライマンアルファ(波長差33pm)を分離し、それぞれの吸収プロファイルを測定するためのフィラメント電力や封入水素圧力等の最適なパラメタの導出に成功した。この結果と、これまで我々が開発してきた観測装置の光検出器や電気回路部の知見をもとに、超小型探査機への搭載を考えた現実的なデザインや、残されている開発課題について紹介する。



# D/H吸収セルの開発と 惑星科学への貢献



吉岡和夫<sup>(1)</sup>, 桑原正輝<sup>(2)</sup>, 田口真<sup>(2)</sup>, 川原琢也<sup>(3)</sup>,  
亀田真吾<sup>(2)</sup>, 吉川一朗<sup>(1)</sup>

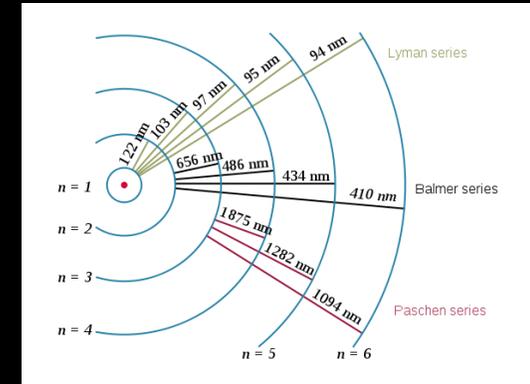
(1) 東京大学大学院・新領域創成科学研究科

(2) 立教大学・理学部

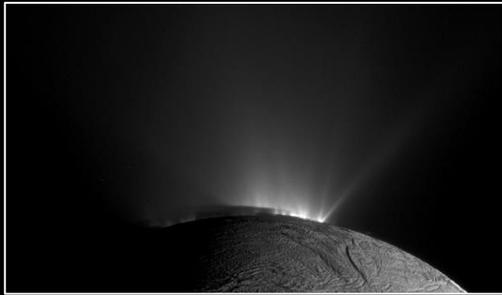
(3) 信州大・工学部

# 水素・重水素(H, D)について

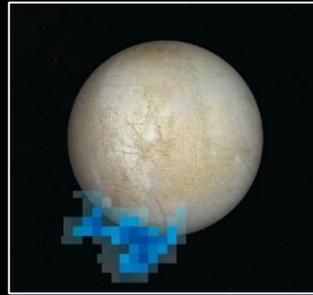
- 水素・重水素 (H, D)
  - H<sub>2</sub>O, HDOから光乖離を経て生成される
- H, DそれぞれLyman- $\alpha$ 線を放つ(光る)
  - H: 121.56701 nm, D: 121.53379 nm, ( $\Delta\lambda=33\text{pm}$ )
- H, Dの明るさ比(密度比)
  - D, H輝線強度を別々に測定できれば、それぞれの存在比を遠隔的に測定可能



Comet 67P/CG [ESA]



Water vapour plumes over Europa [ESA]



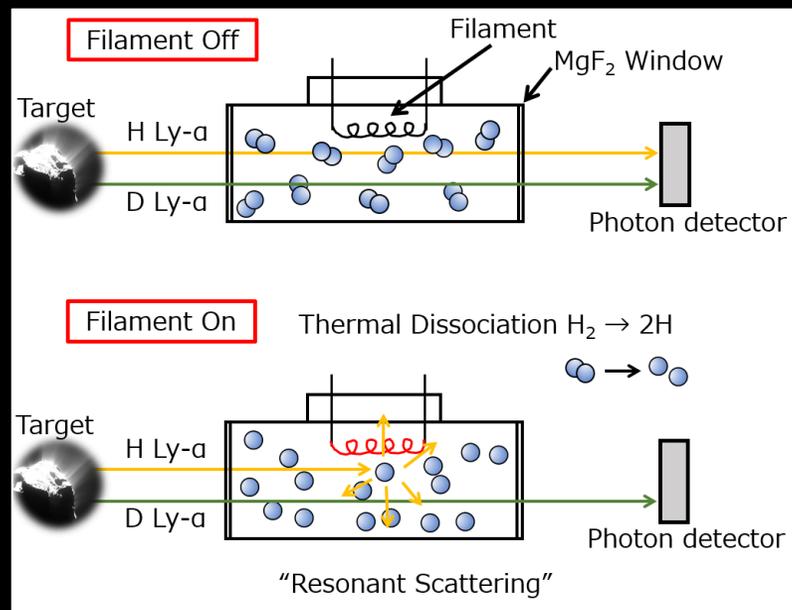
Water vapour plumes over Enceladus [JPL]

- 地球の水(および揮発性物質)の起源  
地球の水は彗星や小天体からもたらされたのか？
- 惑星からの大気散逸プロセスの解明  
太陽系天体大気は、生成から消失までどのような物理に支配されるのか？
- 惑星コロナや惑星間空間の水素温度  
惑星コロナ温度は太陽などの外的要因にどのような影響を受けるのか？

# 吸収セルによる超高分解能波長選別



ガラスセル(フィラメント導入端子つき)



フィラメントを加熱して水素分子を乖離する  
→水素原子が生成される

## 吸収セルのキーワード

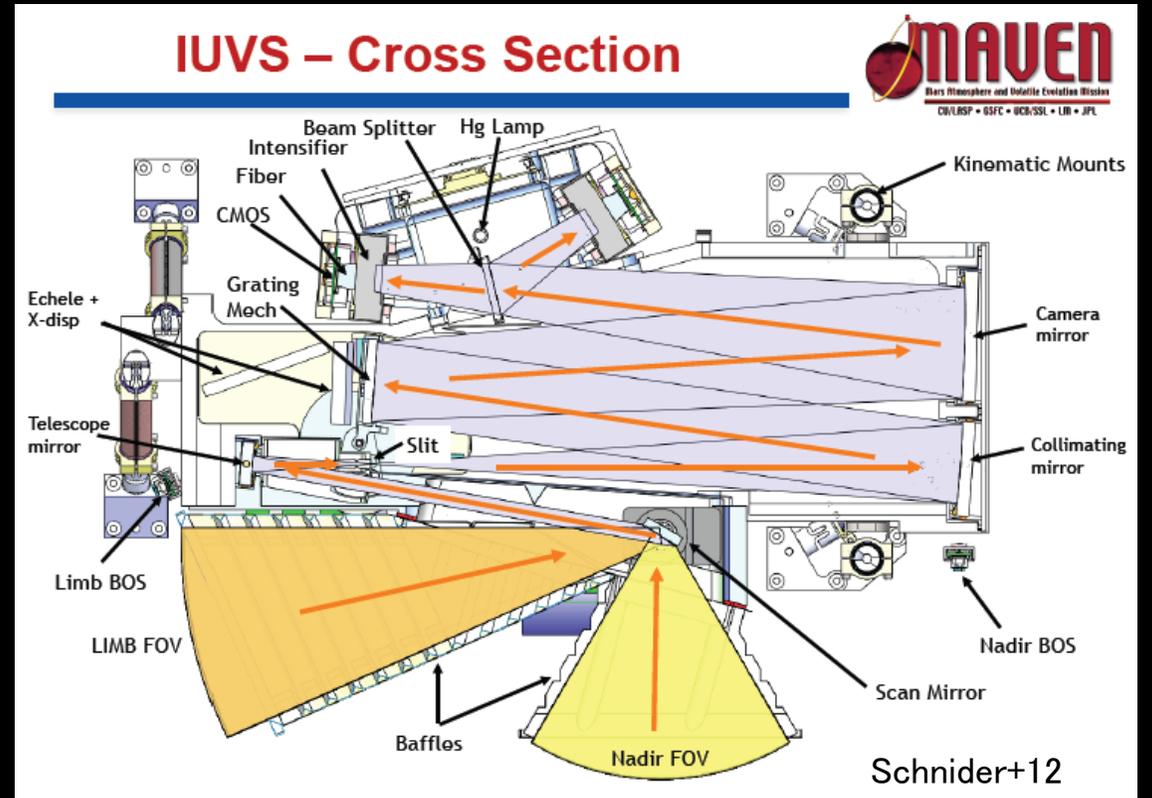
- ・フィルタ
- ・共鳴散乱
- ・熱乖離(分子⇒原子)

- ・ 特定波長のみを吸収(実際には共鳴散乱)する
- ・ 光検出器の前面に設置することで、波長選択フィルタとして使える
- ・ 水素輝線(Ly- $\alpha$ )の超高精度観測が可能(例:H, DのLy- $\alpha$ は33pm差)
- ・ 輝線の吸収度の乖離度依存性から、温度も測定可能(後述)

# Lyman- $\alpha$ 分光を力技でやる場合



MAVEN搭載のIUVSと開発メンバー



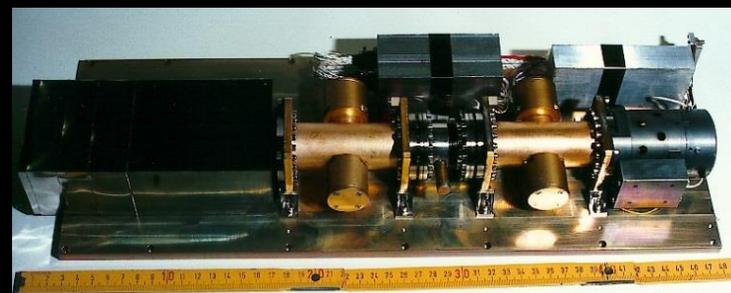
IUVS on board MAVEN spacecraft, 27kg!!

# 先人の足跡

Team	Cell	Platform	Output	Papers
Bertaux et al. (フランス) 70~80s	Glass	Space shuttle Prognoz-5	IPMのH温度測定 ジオコロナD/H測定	Bertaux 77 Bertaux+ 78 Bertaux+ 84
Werner et al. (ドイツ) 90s	Metal + MgF2	Cassini/IUVS	-	Werner+ 04 Esposito+ 04
Taguchi, Kawahara et al. (日本) 90s	Glass	Nozomi	-	Kawahara+ 97 Taguchi+ 00
Redwine et al. (米国) 10s	Metal + MgF2	??	??	Redwine+ 13
This study	Glass	??	火星とか...	Kuwabara+ 18



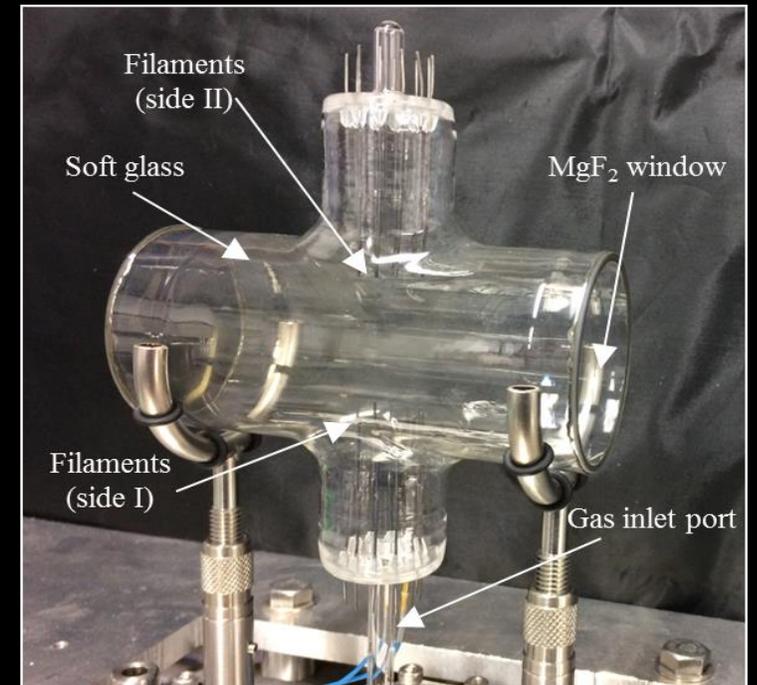
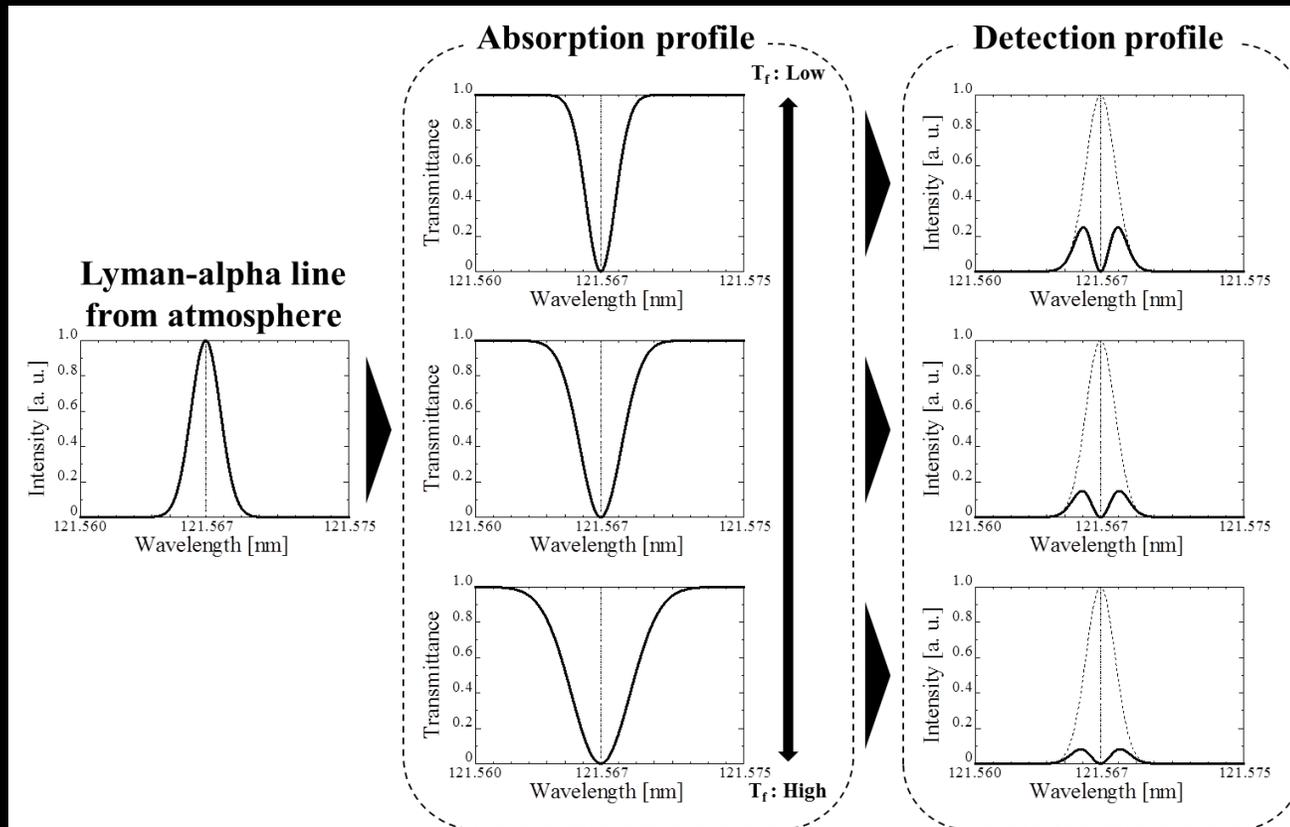
Taguchi+00



Werner+04

# セルを使った温度測定

- 吸収セルは、D/Hの明るさ測定だけでなく、Hの温度測定も可能



Kuwabara+18, RSI

# セルを使った温度測定の実験原理

- セルの吸収線幅は、フィラメント温度で調整可能。
- 観測対象の温度(ライプロファイル)を推定可能。

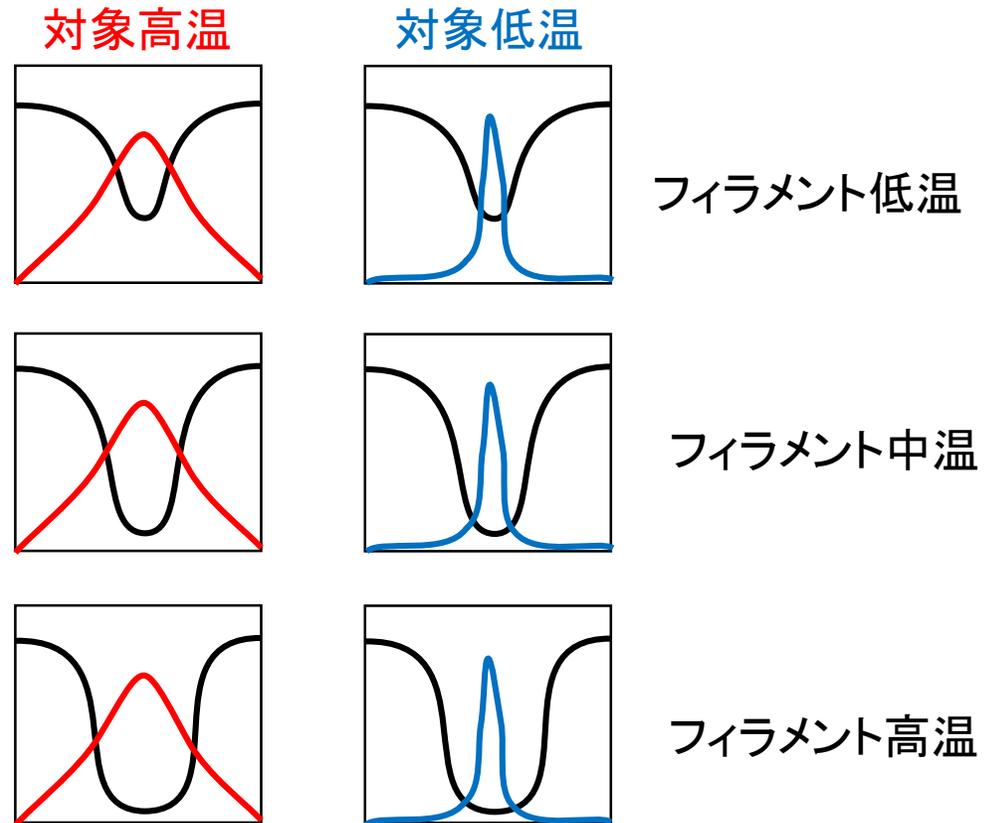
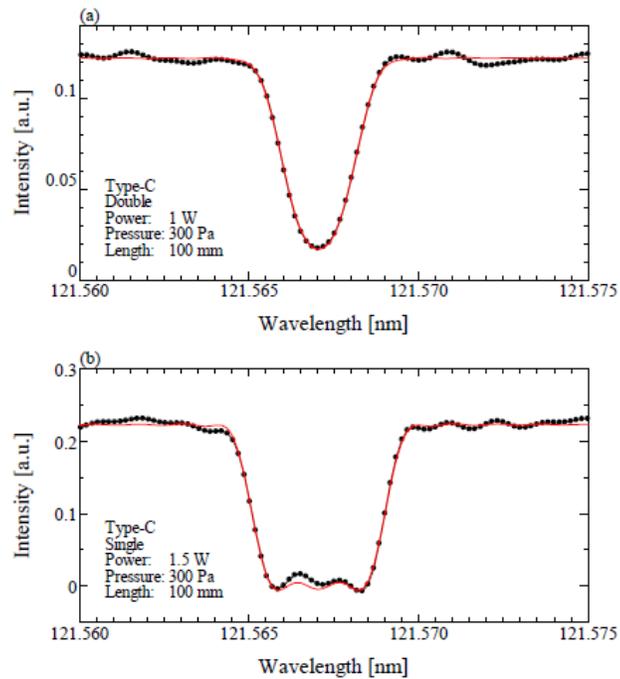
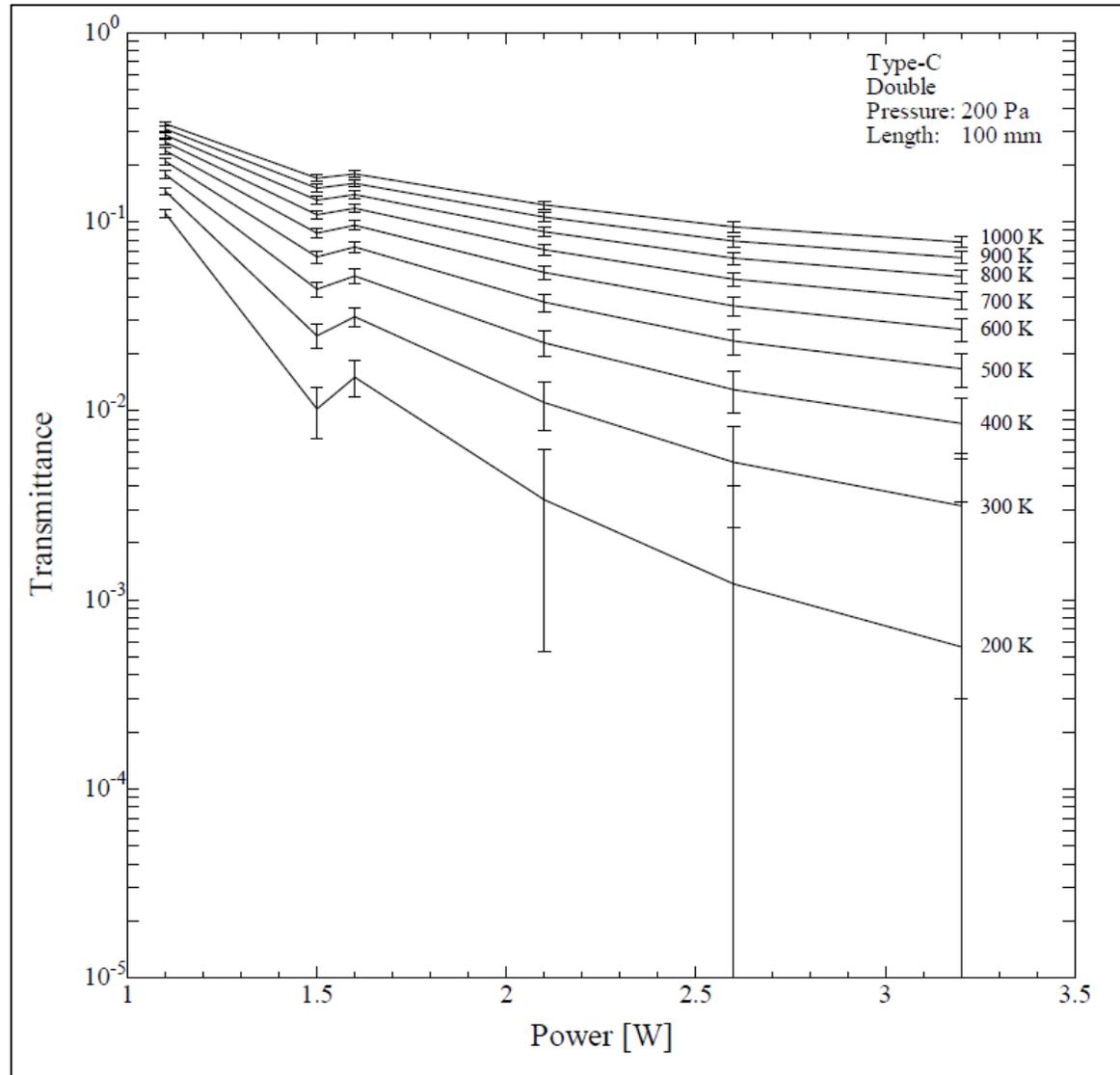


Figure 3.4. Obtained spectra near the center of the hydrogen Lyman-alpha line with two different applied powers (black circles). The model spectrum assumes a Doppler broadening (in red). The small regular oscillation is an instrumental effect due to the shape of the apparatus function; see text for details.

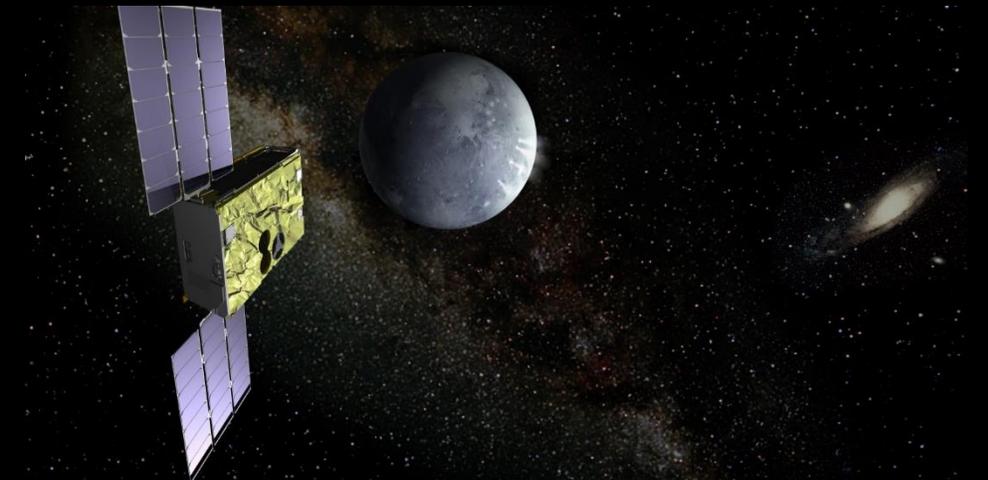
桑原正輝博士論文より

# セルの乖離度と対象天体のH温度の関係



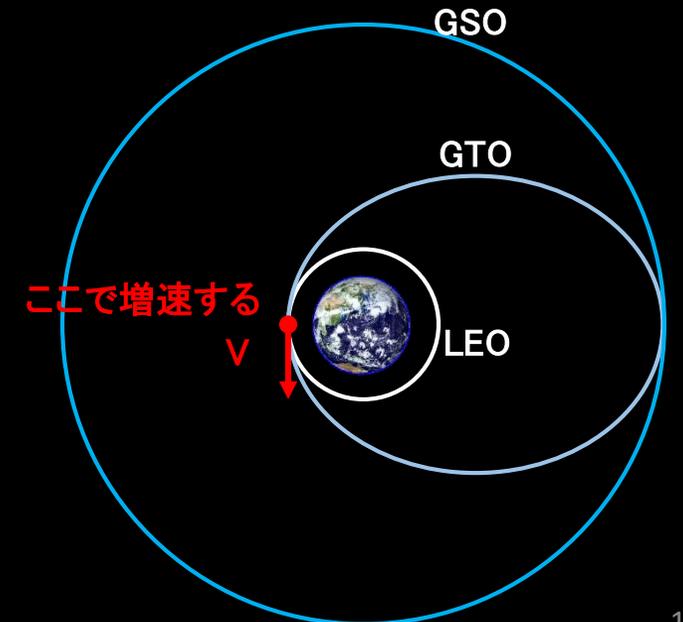
# 吸収セルの使い道

- 吸収セルのメリット
  - 超高分解能分光を小型で実現できる。
  - 水素コロナの温度を遠隔観測できる。
- 超小型探査機にぴったり
  - 月・惑星遷移軌道投入にはGTO軌道近地点での噴射増速(キックモーター)が効率最高。
    - $\Delta V=0.7$  km/sあれば月に到達できる。
    - $\Delta V=1.2$  km/sあれば火星・金星に到達できる。



目標天体	必要な増速度
月	0.68 km/s
水星	3.10 km/s
金星	1.06 km/s
火星	1.15 km/s
木星	3.88 km/s

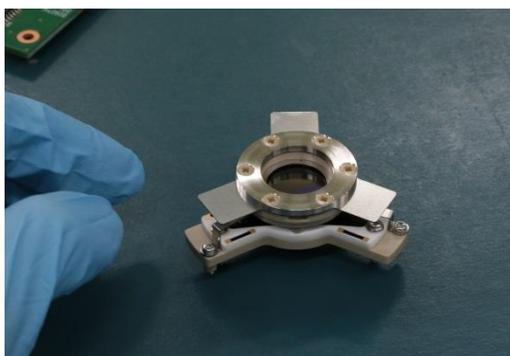
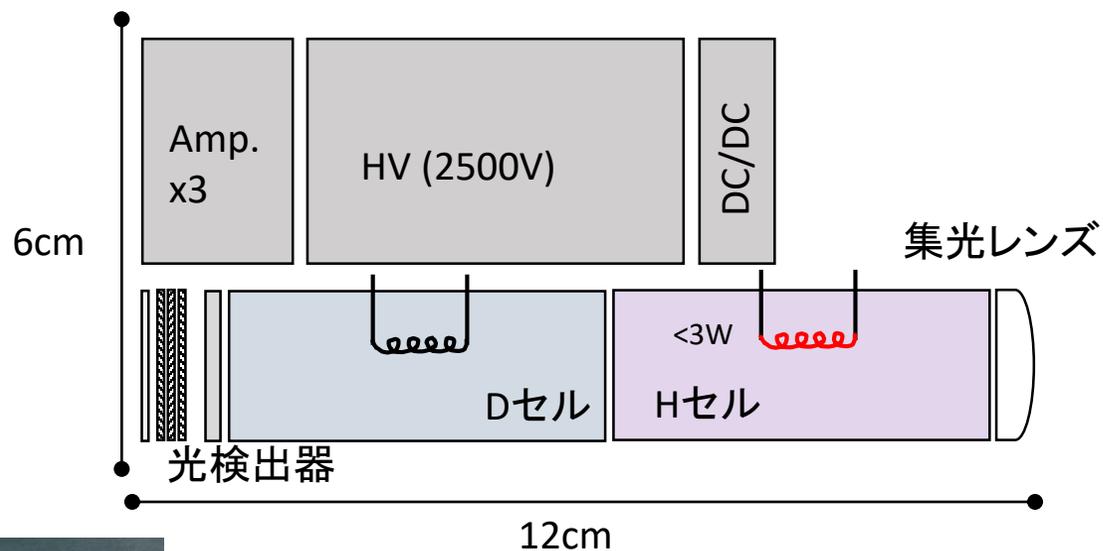
GTO近地点から天体遷移軌道にのるために必要な増速度(図中のV)



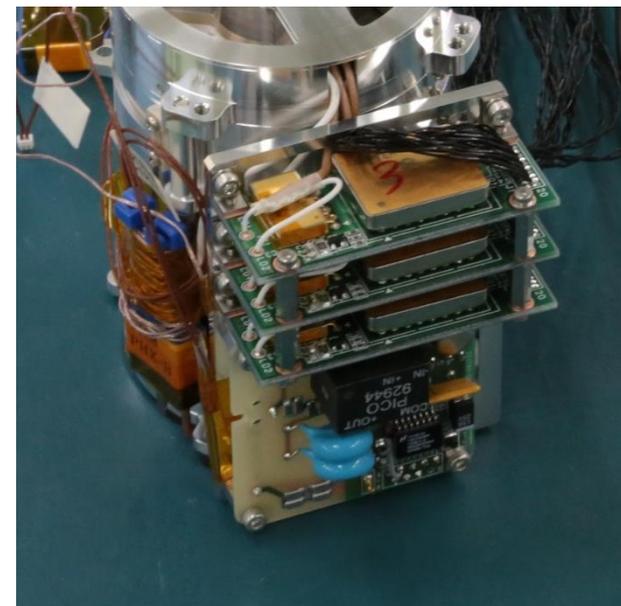
# 吸収セルを使った観測機をデザインしてみた

- **豪華版: Hセル + Dセル + 2次元検出器**
  - H/Dの比、H, Dの温度測定、空間分布
- **通常版: Hセル + Dセル + 1次元検出器**
  - H/Dの比、H, Dの温度測定
- **お手軽版: Hセル + 1次元検出器**
  - H/Dの比\*、Hの温度測定

# 観測機デザイン:豪華版



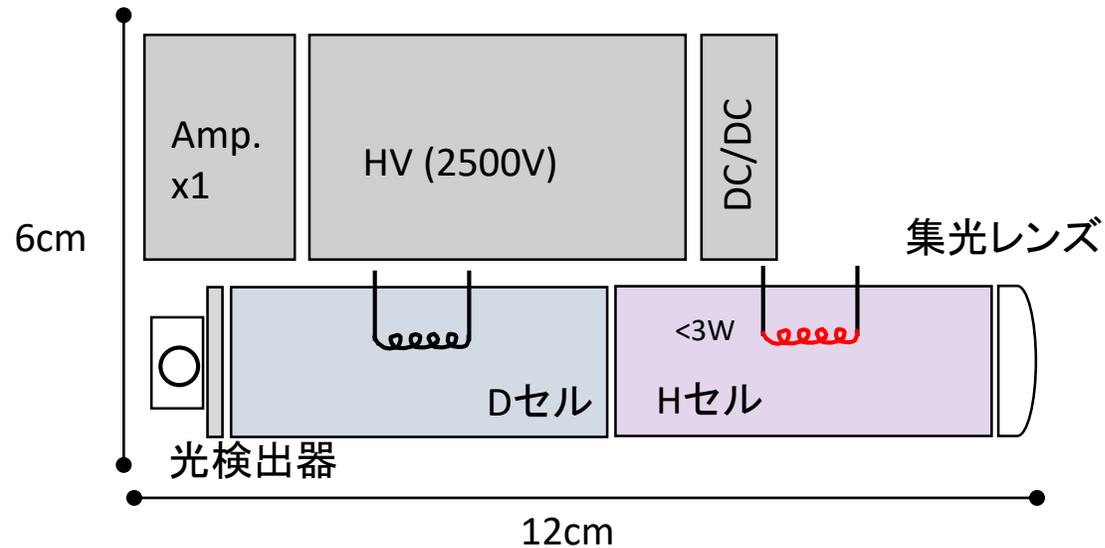
MCP光検出器



EQUULEUS/PHOENIXの電気回路部  
(AMP × 3, HV × 1)

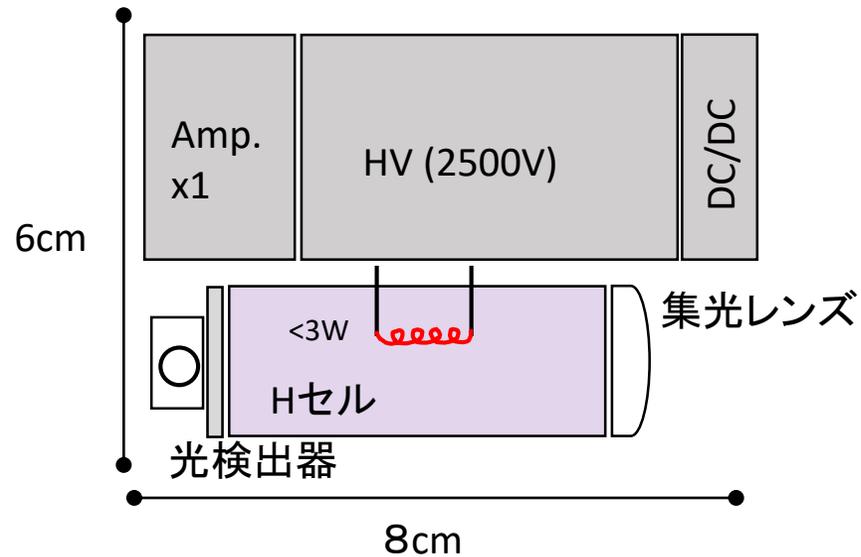
寸法: 6 x 12 x 3 cm (ホウラク域)  
質量: ~1kg+FPGA+ハウジング (<1kg) < 2kg  
電力: 0.5W(非観測時)  
1.0W(観測時・セルOFF)  
4.0W(観測時・セル方ON)  
7.0W(観測時・セル両ON)  
データ量: 32KB/1ショット

# 観測機デザイン: 通常版



寸法: 6 x 12 x 3 cm (ホウラク域)  
質量: ~1kg+FPGA+ハウジング (<1kg) < 2kg  
電力: 0.5W(非観測時)  
1.0W(観測時・セルOFF)  
4.0W(観測時・セル方ON)  
7.0W(観測時・セル両ON)  
データ量: 3.6KB/minute 1秒値の場合

# 観測機デザイン: お手軽版



寸法: 6 x 8 x 3 cm (ホウラク域)

質量: ~1kg+FPGA+ハウジング (<math><1kg</math>) <math>< 2kg</math>

電力: 0.5W(非観測時)

1.0W(観測時・セルOFF)

4.0W(観測時・セル方ON)

7.0W(観測時・セル両ON)

データ量: 3.6KB/minute 1秒値の場合

# まとめ

## • 吸収セルのメリット

- 超高分解能のフィルタとして使える
- 水素・重水素存在比を遠隔的に測定可能
- 吸収プロファイルから温度導出が可能

## • 吸収セルの難しいところ

- 対象天体との相対速度の影響
- 校正が大変

## • 超小型探査機と相性がよさそう

- 対象に近づくことで光学観測の精度は飛躍的に向上する。
- 対象に近づけるならば、1kgクラスの観測装置でも十分に新しい科学成果を期待できる。

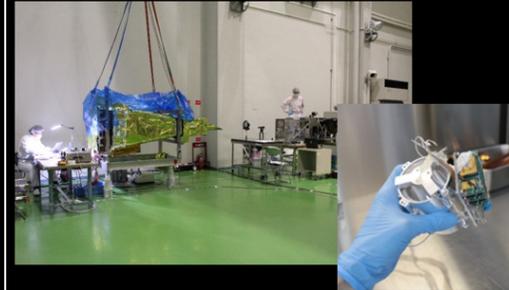
## 天体近傍からの光学観測の優位性

4~10桁の効率向上が見込める

- 目標天体への距離：300 km
- 想定重量
  - バス：16 kg
  - 観測機（分光撮像装置）：4 kg
- 想定受光面積
  - [EXCEED] × 0.01

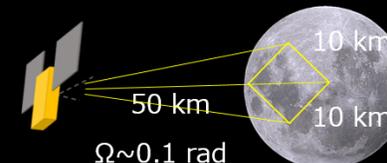
地球軌道からの観測に比べて受光面積が0.01倍になる場合の想定光量比

- 月 (38万km)  
→  $2 \times 10^6 \times 10^{-2}$  倍の光量
- 水星 (1AU)  
→  $3 \times 10^{11} \times 10^{-2}$  倍の光量
- 金星 (1AU)  
→  $3 \times 10^{11} \times 10^{-2}$  倍の光量
- 火星 (0.4AU)  
→  $4 \times 10^{10} \times 10^{-2}$  倍の光量
- 木星 (4AU)  
→  $1 \times 10^{13} \times 10^{-2}$  倍の光量



## 吸収セルを目標天体まで50kmに近づけたら...

- ざっくりした見積もり
  - H Ly-alpha brightness: 1R
  - Entrance: 2cm in diameter
  - MgF2 transmittance: 50%
  - Photon to electron conversion efficiency: 10%
  - Target area: 10 × 10km
  - Distance for the target: 50km
- 水素原子の輝線カウント
  - $(10^6/4\pi) \times 0.04$  [sr] × n [cm<sup>2</sup>] × 0.5 × 0.1 =  $5 \times 10^2$  [cps]
- 重水素原子の輝線カウント
  - Suppose D/H =  $10^{-4}$  (like on the Earth) the count rate is  $5 \times 10^{-2}$  [cps]



If from the Earth, (ex. 0.01AU), the count rate decreases x0.001.