

「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」

「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会

平成28年12月20～22日

核融合科学研究所

水素吸収セル法による 惑星コロナ観測

田口 真

立教大学理学部物理学科

日食時に観測されるコロナ



Corona: 日食時に太陽の周りに現れる白い光彩

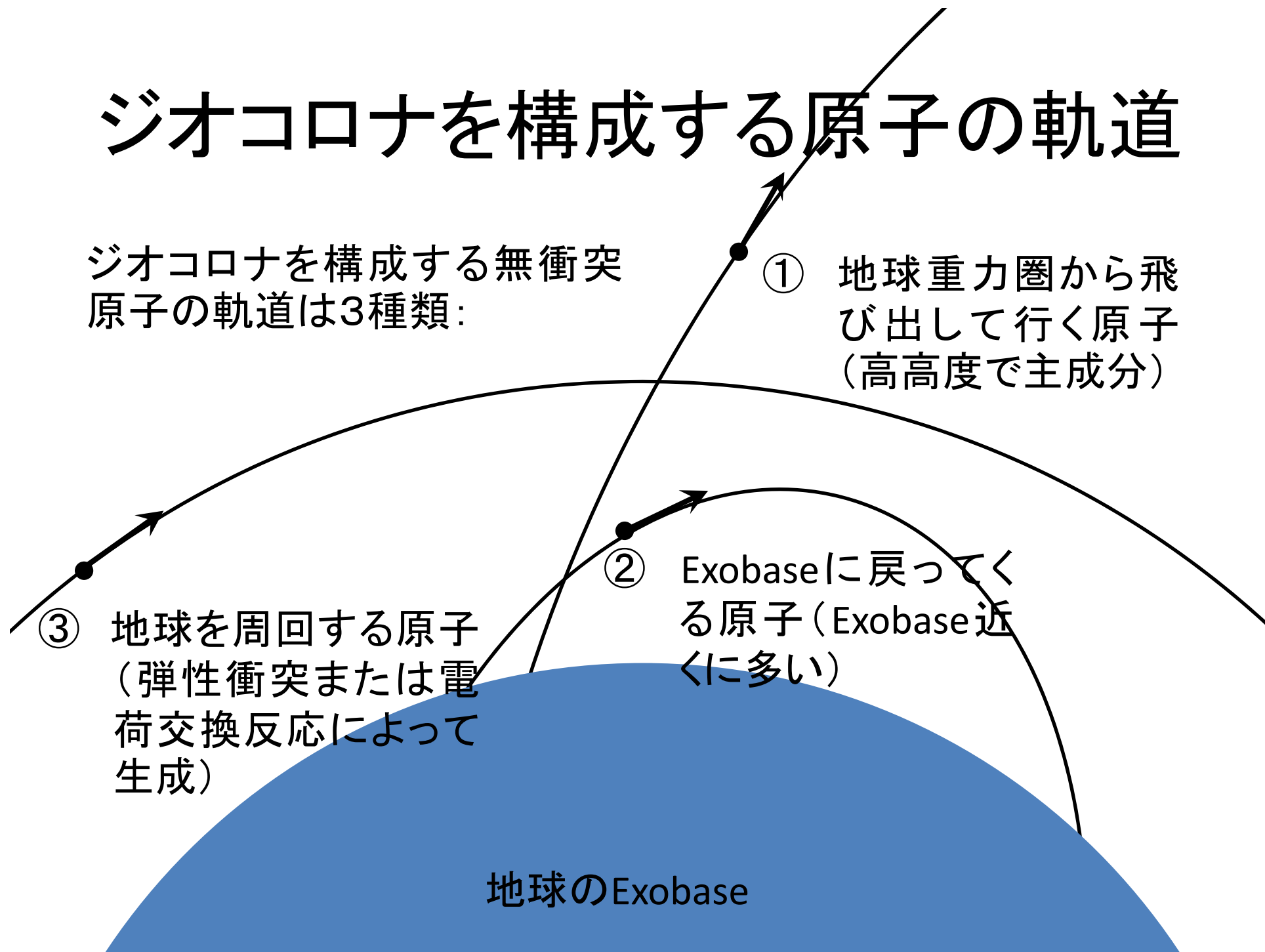
Wikipedia

ジオコロナとは

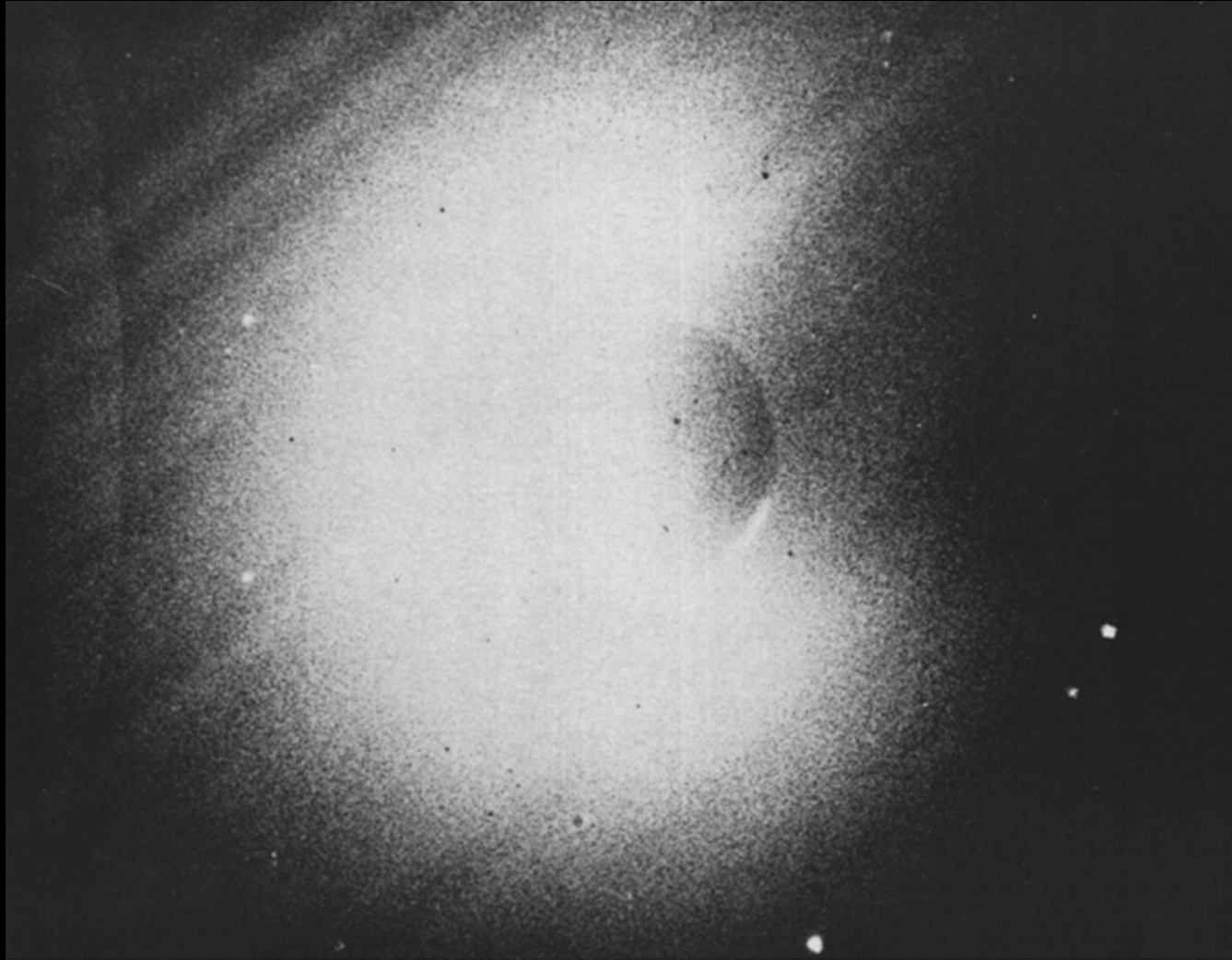
- 地球大気のExobase(原子が無衝突になる下限高度、400~800 km)から飛び出した原子が太陽光を散乱して光る現象。水素ライマン α (121.6 nm)が最も明るい。ヘリウムや酸素も光る。
- 太陽光を共鳴散乱することにより光る。
- 地球中心からの距離 $3R_E$ より上空では単一散乱。低高度では多重散乱が効いてくる。
- 1950年代後半からロケットにより観測されている。
- 地球周回衛星による観測が主。地球から離れた場所からの観測はMariner 5 [Wallace et al., 1970]、Apollo 16 [Carruthers et al., 1976]、Nozomi [Tsuchiya, 2003]、Procyon [Kameda, 2015]。

ジオコロナを構成する原子の軌道

ジオコロナを構成する無衝突原子の軌道は3種類:

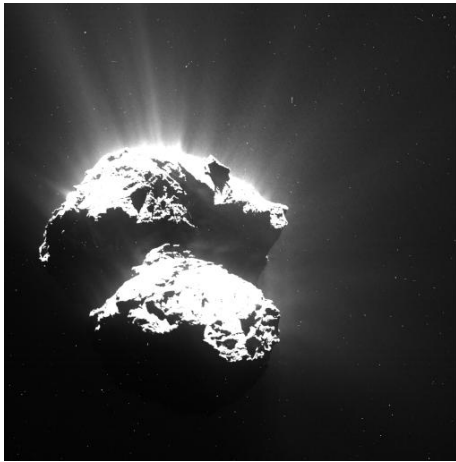


Apollo 16によって月面から撮像されたジオ korona



Carruthers et al. [1976]

太陽系内天体からの水素散逸

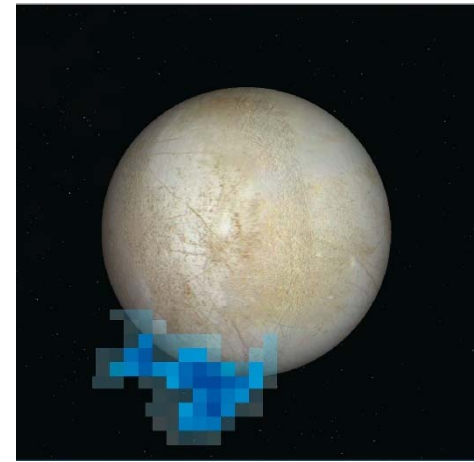


Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko [ESA]

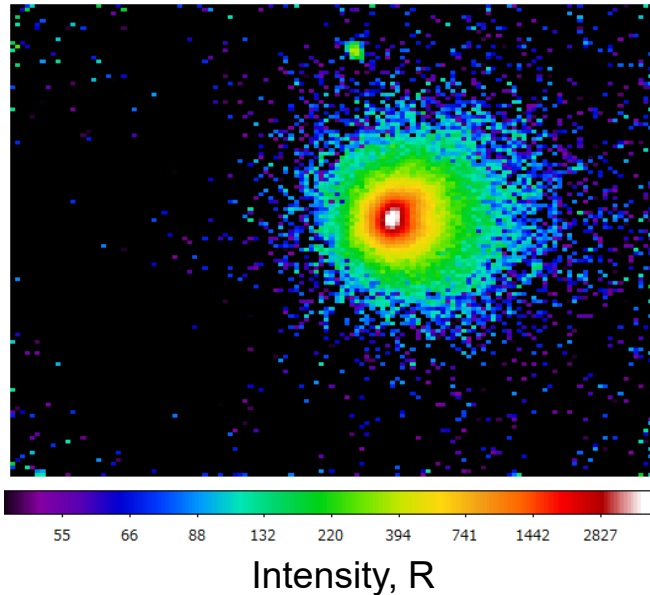
生命体の発生・生存には液体の水が不可欠と信じられている。太陽系内の惑星、衛星、彗星に含まれる水は光解離して水素を発生する。水素は天体の重力を振り切って宇宙空間に散逸する。水素原子は太陽光を散乱して光る。→惑星コロナ



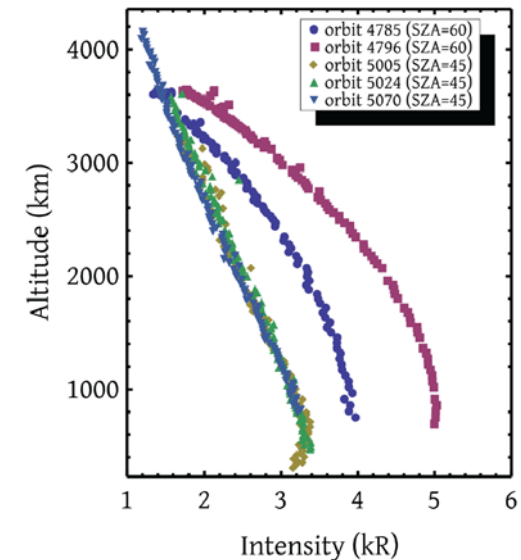
Water vapour plumes over Enceladus [JPL]



Water vapour plumes over Europa [ESA]

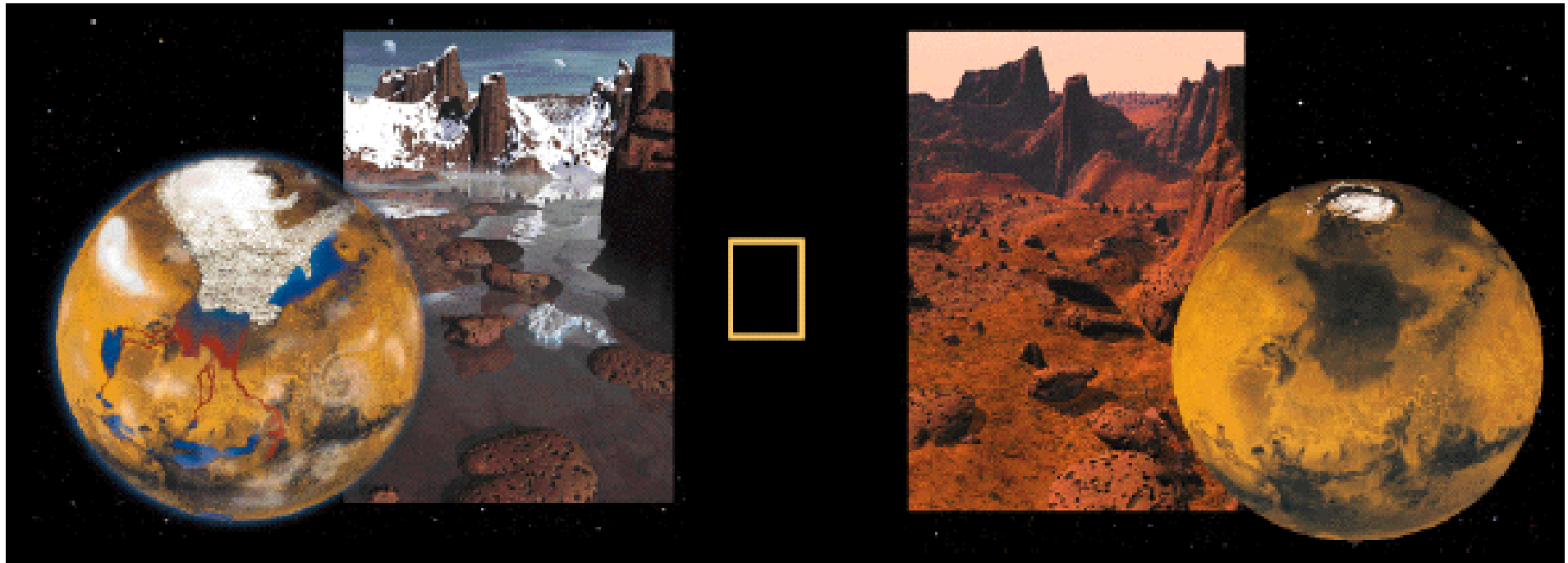


Geocorona observed by LAICA [Sato, 2015]



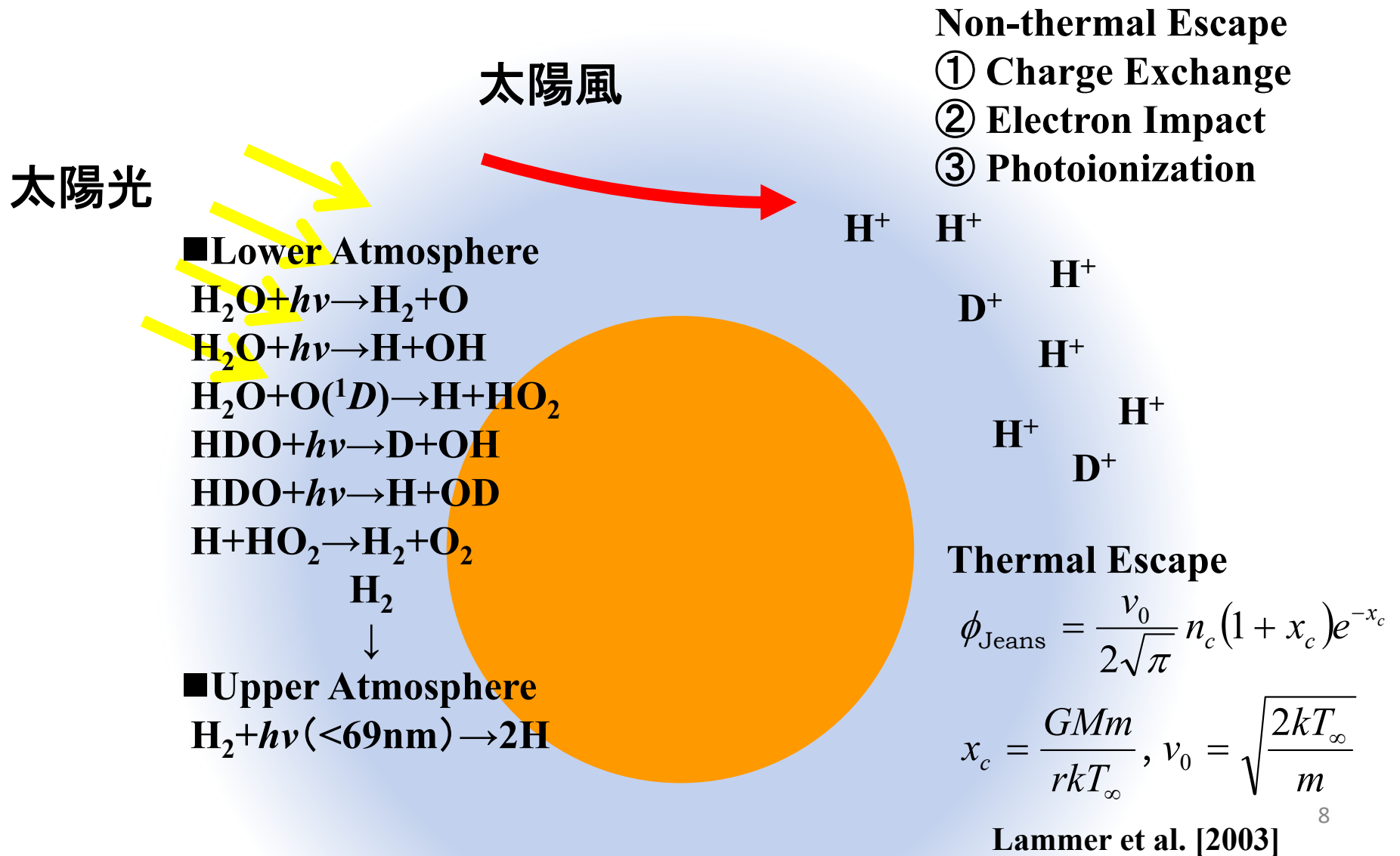
Martian hydrogen corona [Chaffin et al., 2011]

過去と現在の火星



火星表層環境の超長期的変遷の想像図。大量の液体の水を湛えた温暖湿潤な時期があって、それが現在の寒冷気候へと進化してきたと考えられている。

水の散逸過程



水の散逸過程(熱的散逸)

$$\phi_{\text{Jeans}} = \frac{v_0}{2\sqrt{\pi}} n_c (1 + x_c) e^{-x_c}$$

$$x_c = \frac{GMm}{rkT_\infty}$$

ϕ_{Jeans} : Jeansエスケープによる散逸率

n_c : Exobaseでの密度

T_∞ : Exobaseより上の温度

水の散逸過程

$$\text{HDO}/\text{H}_2\text{O} = 2 \text{D}/\text{H}$$

$$\text{D}/\text{H}(t) = \text{D}/\text{H}(0) \left(\frac{W(t) + L(t)}{W(t)} \right)^{1-F}$$

$$F = \frac{\phi_D / \phi_H}{\text{D}/\text{H}} = 2 \frac{\phi_D / \phi_H}{\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}}$$

W: 時刻 t での水の量、L: 時刻 t までに失われた水の量

ϕ_H : Hの散逸率、 ϕ_D : Dの散逸率

F : Fractionation factor

- ① Hの高度分布（現在の水の散逸が分かる）
- ② D/H比（過去の水の散逸が分かる）

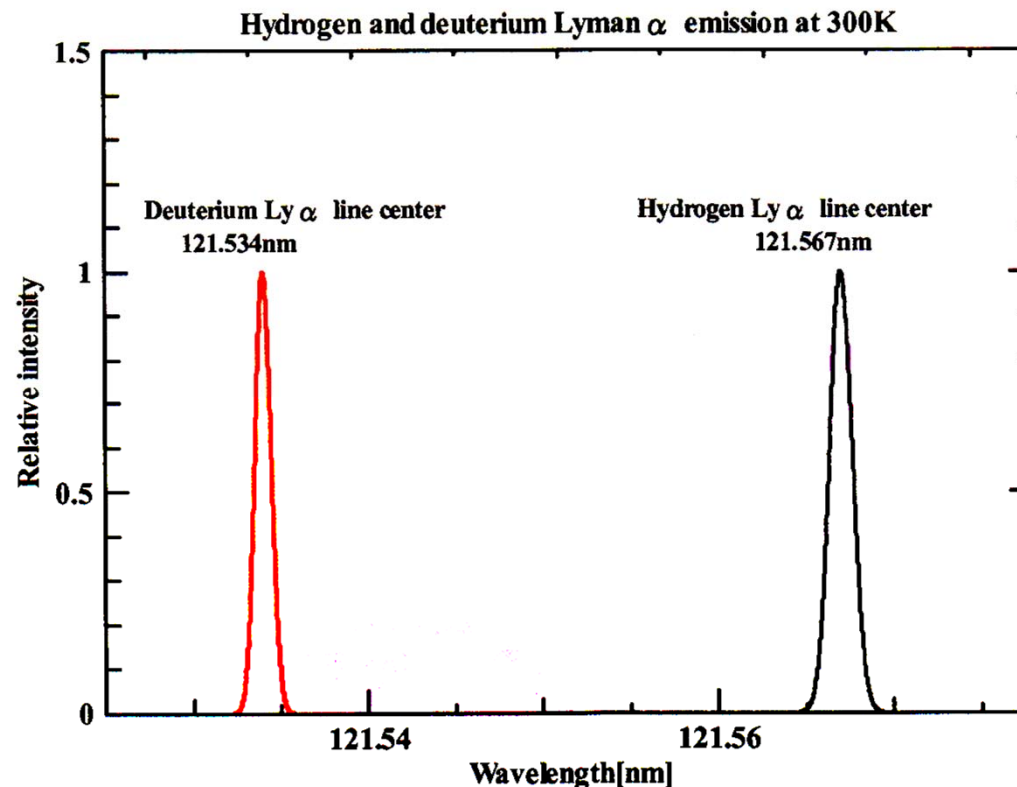
惑星コロナのD/H観測

惑星コロナ水素・重水素ライマン α $\delta\lambda=0.033$ nm

太陽光の共鳴散乱(太陽水素ライマン α FWHM= ~ 0.1 nm)

発光強度は水素・重水素の密度に比例

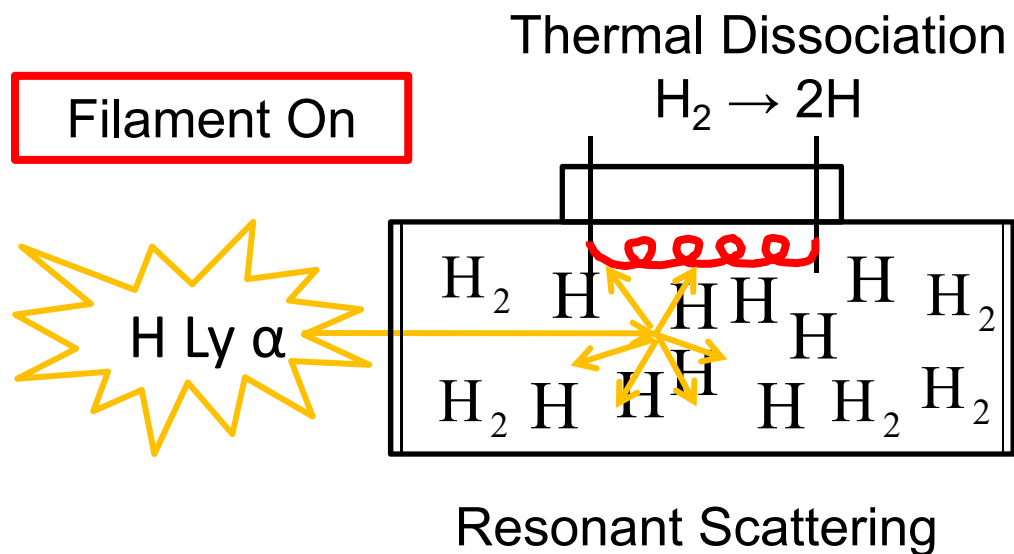
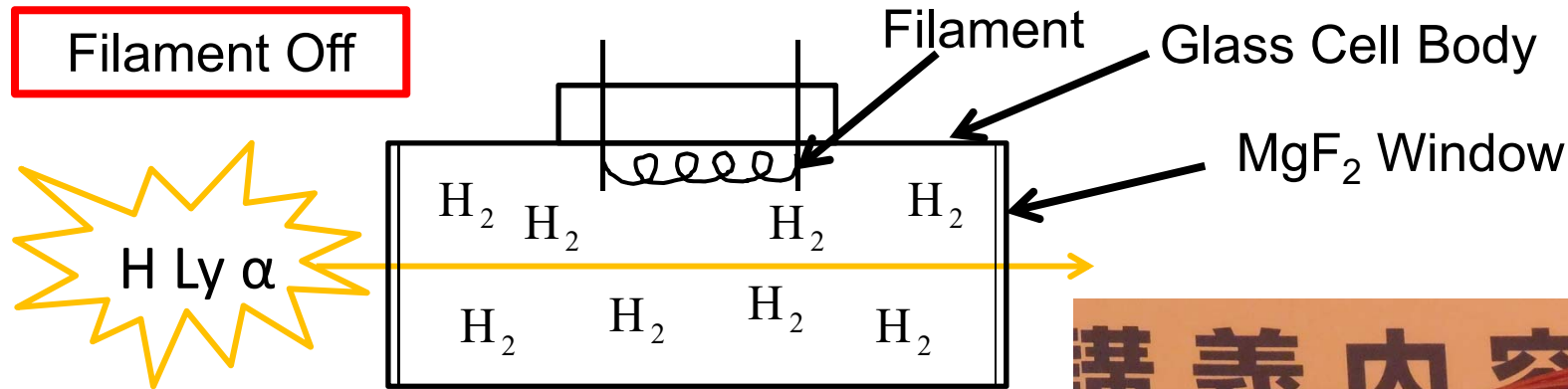
両者を分離するには高分解能分光器が必要



Ito [2000]

水素吸収セル法の原理

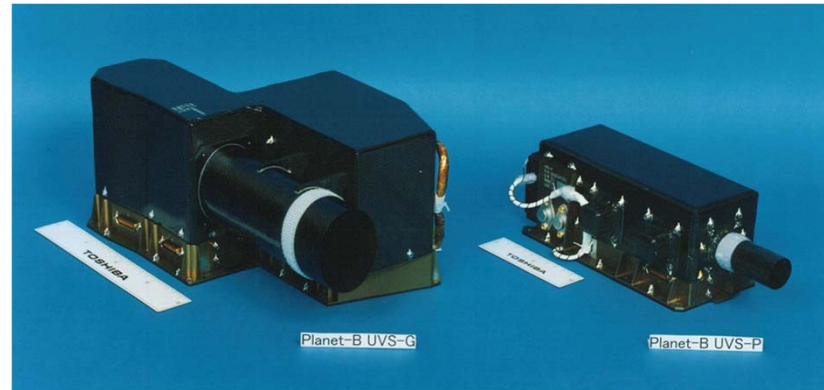
水素Lyman α 光(121.6 nm)を選択的に検出する方法



小型、軽量で温度・D/Hの推定も可能

A spare hydrogen absorption cell for NOZOMI/UVS-P

NOZOMI/UVS-P

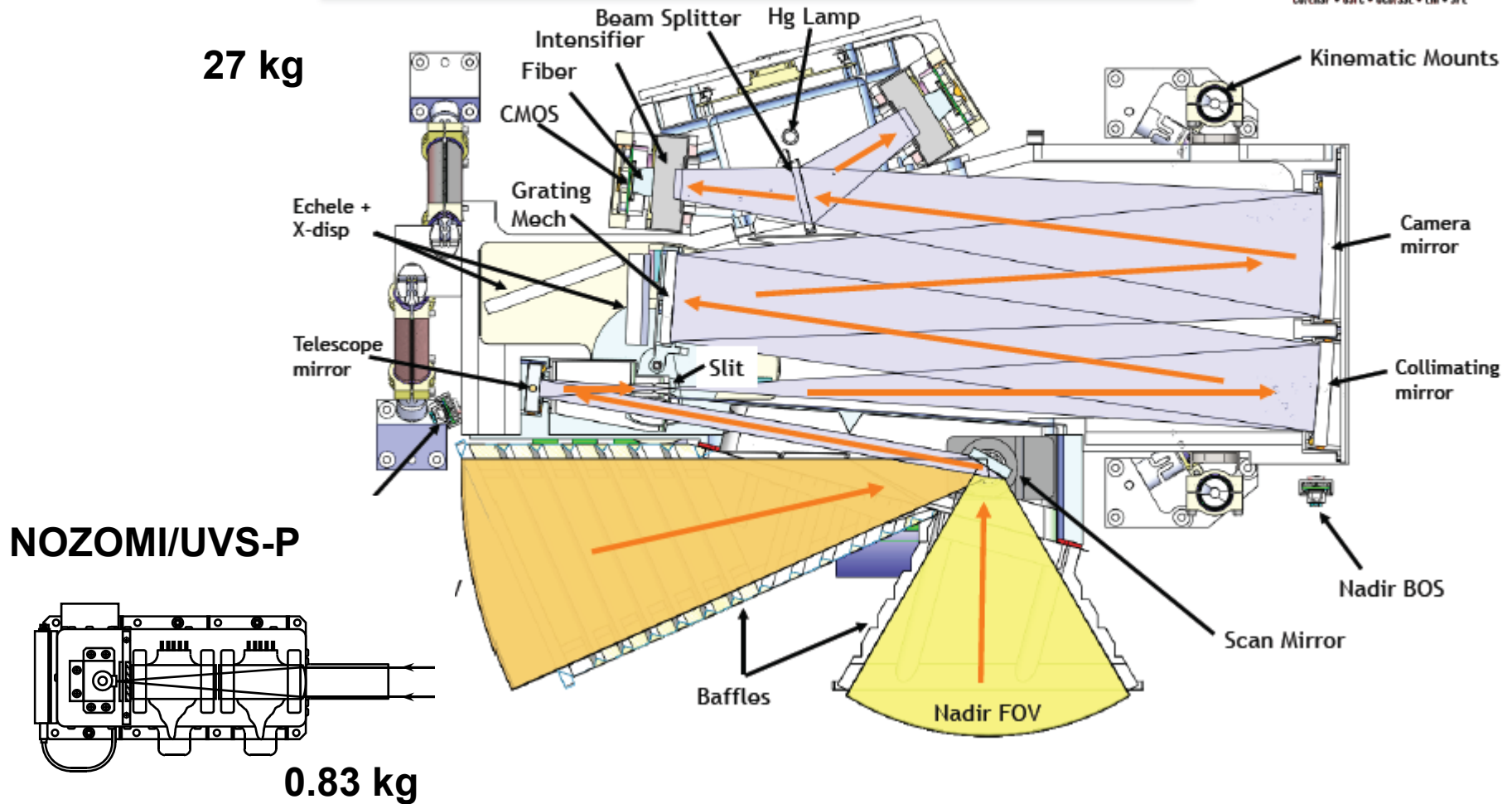


- 火星散逸大気のD/H直接観測
- 水素・重水素吸収セルをフィルターとして用いたフォトメーター
- 水素・重水素ライマン α (121.6 nm)発光強度を測定
- 衛星軌道運動を利用した観測から、H及びD高度分布、D/H比を導出
- セルの吸収プロファイルを仮定し、コロナの発光プロファイル・ドップラーシフトを測定

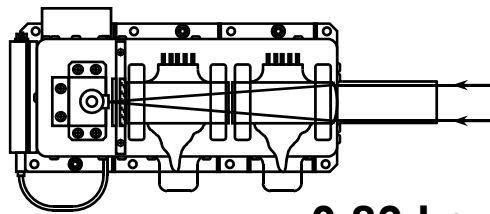
Kawahara et al. [1997]; Taguchi et al. [2000]

MAVEN/IUVS

IUVS – Cross Section



NOZOMI/UVS-P

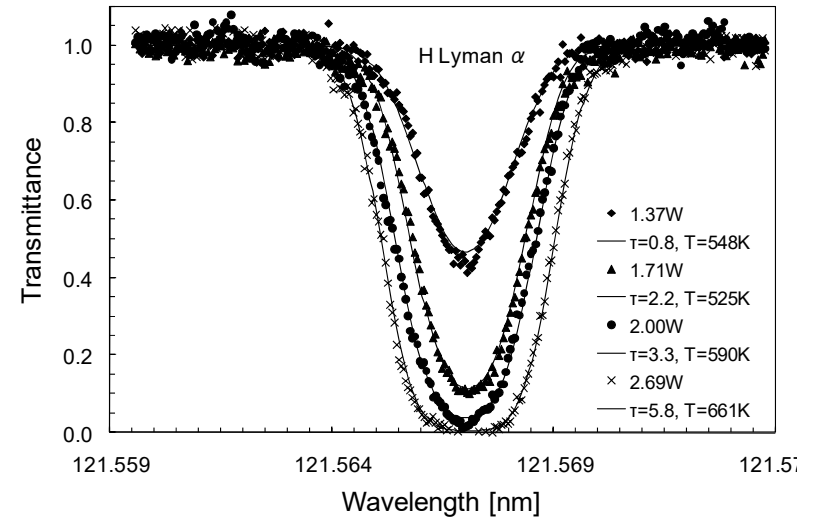
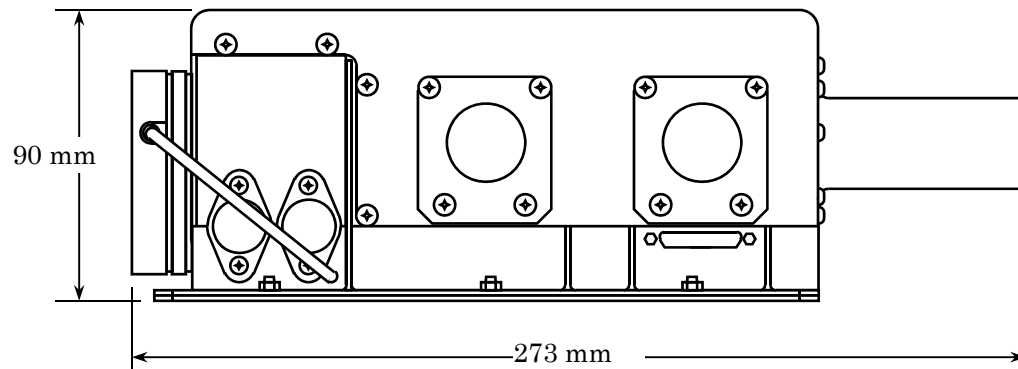
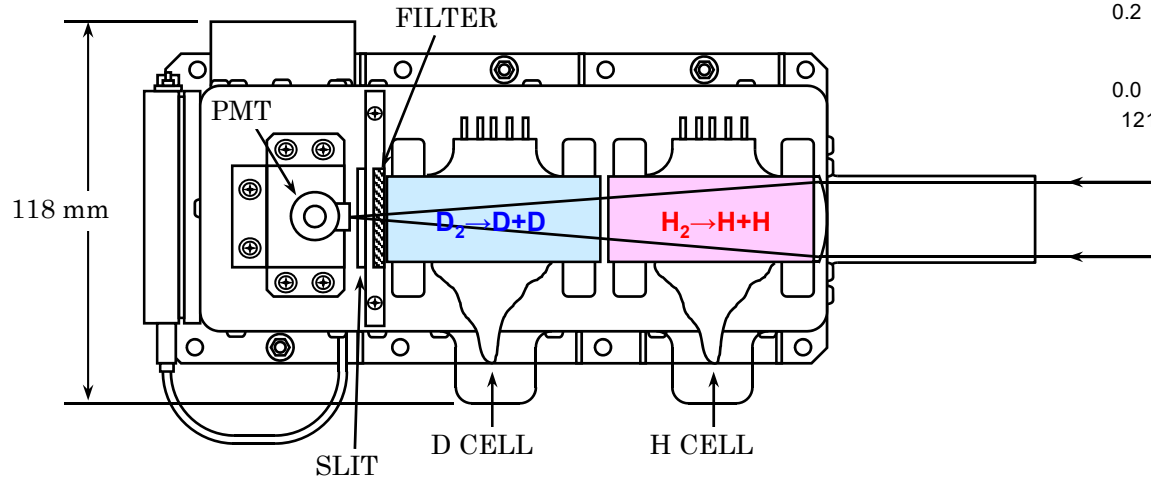


0.83 kg

Taguchi et al. [2000]

Schneider [2012]

NOZOMI/UVS-P



水素吸収セルの透過特性

吸収セルのヒーターをオンするとセル内部に封入された(重)水素分子ガスが(重)水素原子に解離し、(重)水素ライマン α 線を吸収する。

NOZOMI/UVS-P

性能諸元

有効口径: 22 mm (吸収セルサイズ: 25 mm × 60 mm)

視野: 3° × 0.5°

検出器: サイドオンタイプ光電子増倍管 CsI (フォトンカウンティング)

重量: 0.83 kg (CPU別)

消費電力: 約10 W (セルのヒーター電力2.7 W × 2を含む)

感度: 2.8 cps/kR → 10^5 sec の積分時間でD/H ~ 10^{-4}

UVS-Pは「のぞみ」の制約上ぎりぎりの設計、できれば、

より感度を高くし、測定精度を向上させたい

より吸収の光学的厚さを大きくし、経年変化があっても十分な吸収を確保したい

新型吸収セル

仕様

直径: 50 mm

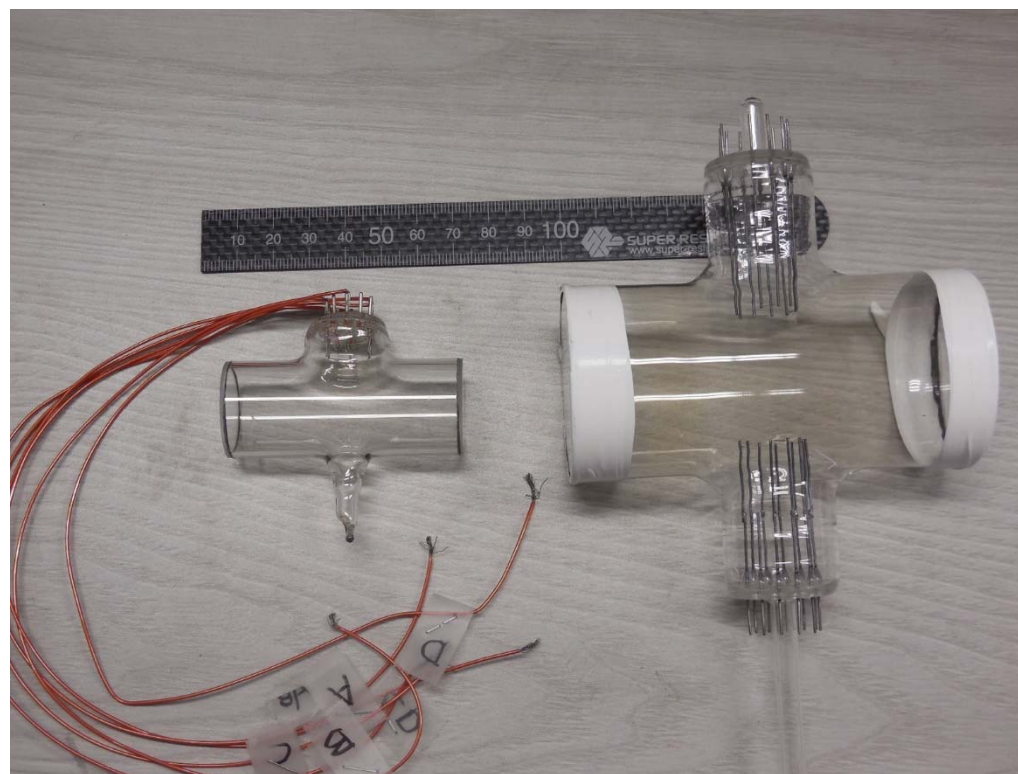
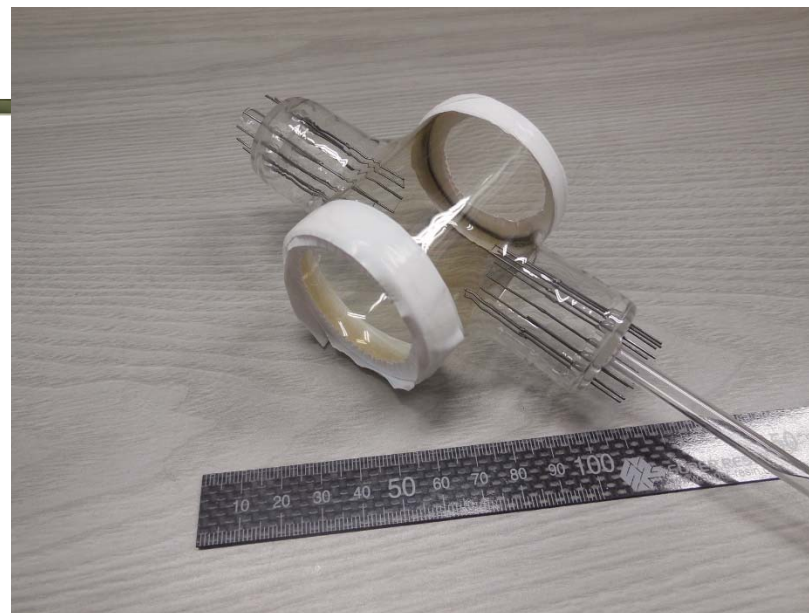
有効口径: 47 mm

長さ: 100 mm, 60 mm

光路長: 98 mm, 58 mm

ボディ: 硬質ガラス

(上)長さ60 mmタイプ新型吸収セル。(下)長さ100 mmタイプ新型吸収セル(右)及び「のぞみ」予備吸収セル。



吸収セルの原理

吸収セル透過率 : $T(\lambda) = \exp[-\tau(\lambda)] \dots (1)$

光学的厚さ : $\tau(\lambda) = n_H \sigma(\lambda) L \dots (2)$

n_H : 水素原子数密度、 L : 吸収セル内光路長

吸収係数 : $\sigma(\lambda) = \sigma_0 \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2\right] \dots (3)$

$\Delta\lambda$: ドップラー幅、 λ_0 : ライマン α 線中心波長

吸収セルの原理

$$\text{ドップラー幅} : \Delta\lambda = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2kT_H}{m_H}} \dots (4)$$

T_H : 水素原子温度、 m_H : 水素原子質量

$$\text{波長}\lambda_0\text{での吸収係数} : \sigma_0 = \frac{\sqrt{\pi}e^2\lambda_0 f}{m_e c} \sqrt{\frac{m_H}{2kT_H}} \dots (5)$$

f : 振動子強度、 m_e : 電子質量

吸収セルの原理

$$\text{セル内の水素分子分圧} : P_{H_2} = (1 - \alpha)P_0 \cdots (6)$$

$$\text{セル内の水素原子分圧} : P_H = 2\alpha P_0 \cdots (7)$$

P_0 : 最初にセル内に封入された水素分子圧力

α : 解離率

$$\text{解離定数} : K \equiv \frac{P_H^2}{P_{H_2}} \cdots (8)$$

(6), (7), (8)より

$$K = \frac{4\alpha^2}{1 - \alpha} P_0 \cdots (9)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{K^2 + 16KP_0} - K}{8P_0} \cdots (10)$$

吸収セルの原理

解離定数 K はフィラメント温度 T_f を使って

$$\ln K = \frac{5}{2} \ln T_f - 2.2663 - \frac{\Delta E_{H_2}}{kT_f} \dots (11) \quad \text{Woolley et al. [1948]}$$

と表される。

ΔE_{H_2} : 水素分子の解離エネルギー

状態方程式に(7),(10)を使って

$$n_H = \frac{P_H}{kT_H} = \frac{2\alpha P_0}{kT_H} = \frac{\sqrt{K^2 + 16KP_0} - K}{4kT_H} \dots (12)$$

吸収セルの原理

ライマン α 放射線源プロファイル

$$S(\lambda) = S_0 \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_s}\right)^2\right] \dots (13)$$

$$\text{ドップラー幅} : \Delta\lambda_s = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2kT_s}{m_H}} \dots (14)$$

T_s : 線源の温度

全波長帯で積分した吸収セルの透過率

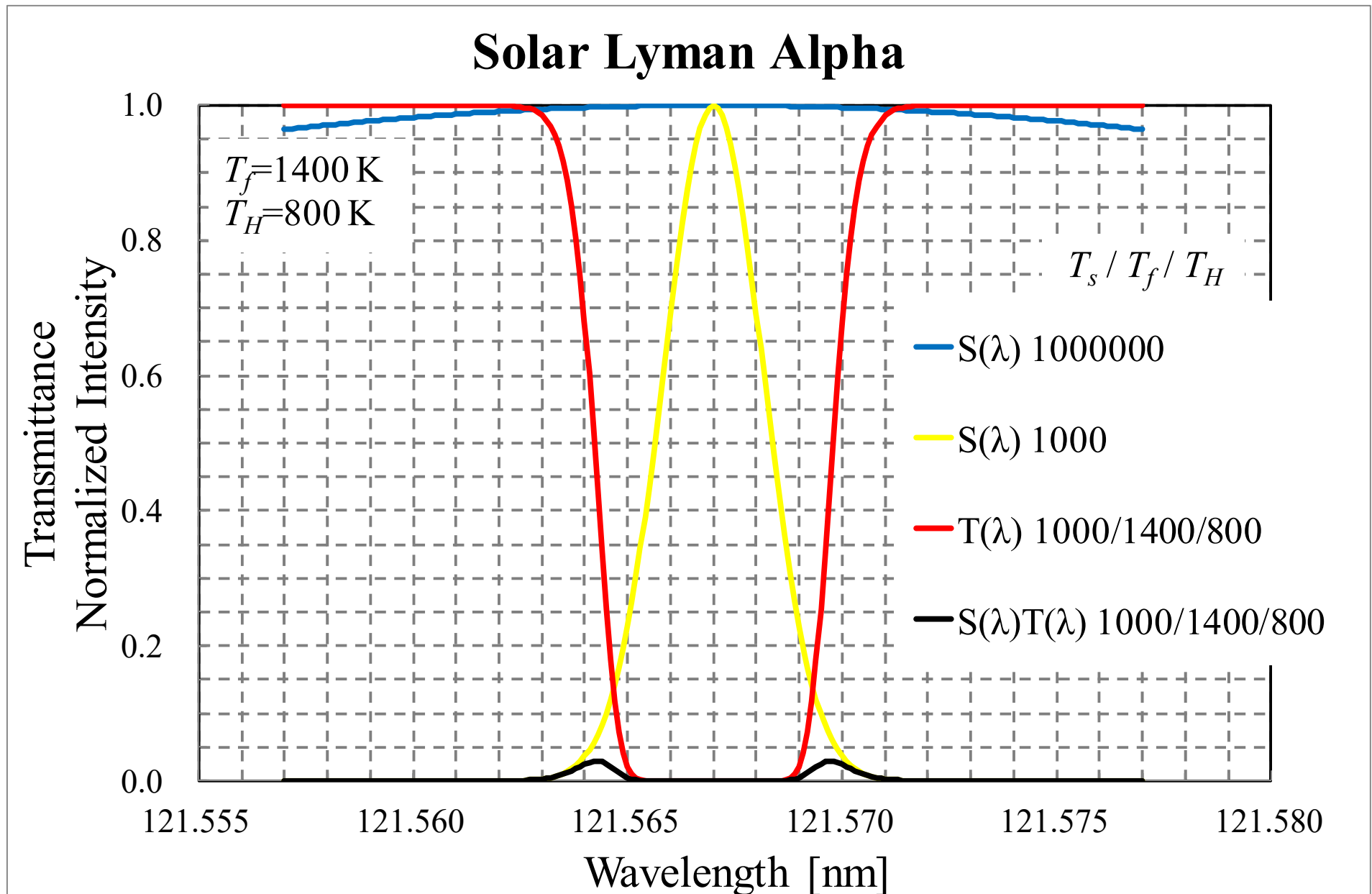
$$R = \frac{\int S(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda} \dots (15)$$

吸収セルの原理

水素・重水素ライマンαのパラメータ

	λ_0 [nm]	f	Σ_0 [cm ²]	ΔE [erg]
水素	121.567	0.4164	$5.92 \times 10^{-12} \times T_H^{1/2}$	7.24×10^{-12}
重水素	121.534	0.4165	$8.43 \times 10^{-12} \times T_D^{1/2}$	7.37×10^{-12}

吸収率のシミュレーション (1)



Synchrotron SOLEIL/DESIRS

Beamtime: 2016年7月7日～11日（96時間）

目的: 放射光(Synchrotron SOLEIL, France) + 高分解能分光器(DESIRS)を用いて吸収セルの吸収特性を測定し、高効率の吸収セルの仕様を実験的に決定する

- 電力依存性
- 水素ガス圧力依存性
- フィラメント種類
- フィラメント本数
- 光路長
- 「のぞみ」吸収セル予備品の経年変化



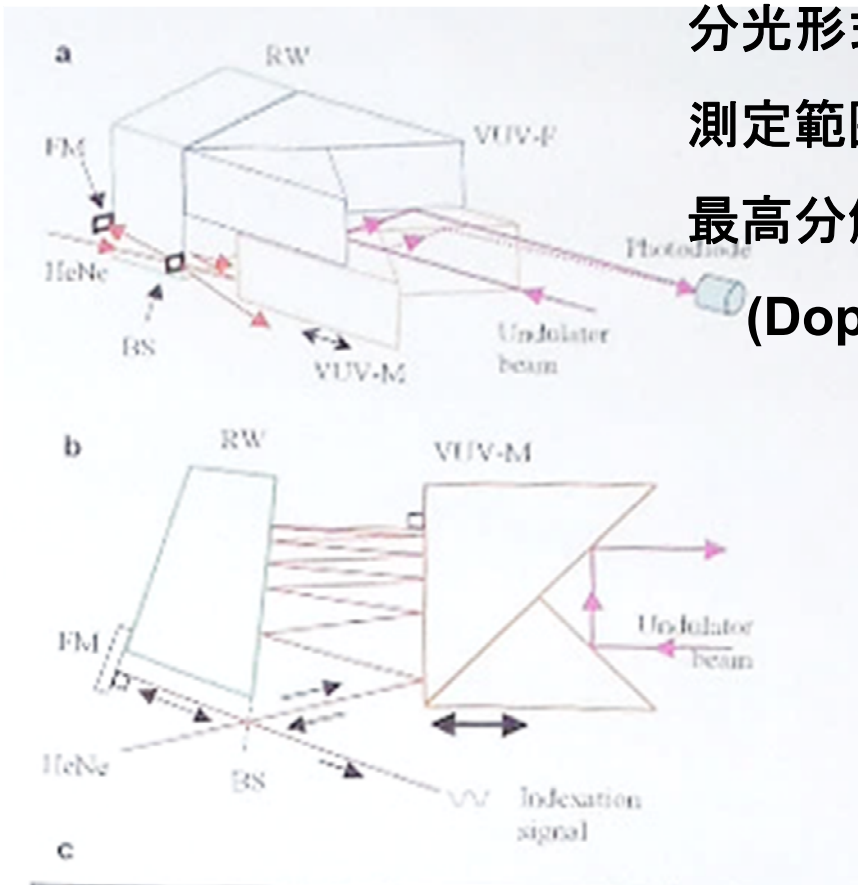
Synchrotron SOLEIL/DESIRS

分光形式: フーリエ変換分光計

測定範囲: 4~30 eV (41~311 nm)

最高分解能: 0.08 cm^{-1} ($1.2\text{E-}4 \text{ nm@}121.6 \text{ nm}$)

(Doppler Width (FWHM) @500 K: $\sim 2\text{E-}3 \text{ nm}$)



HU640/OPHELIE II electro-magnetic undulator

M1/M2 mirrors
20.3 m

Switchable beam
positioning 4
quadrants photodiode
26.8 m

Gas filter
28.5 m

4 blades adjustable
aperture
33.4 m

MTF toroidal
switching mirror
42.7 m

Sample environment
chamber
44 m

FTS wavefront
division scanning
interferometer
46.4 m

FTS horizontal
entrance slit /
vertical focus plane
45.1 m

VUV photodiode
47.7 m

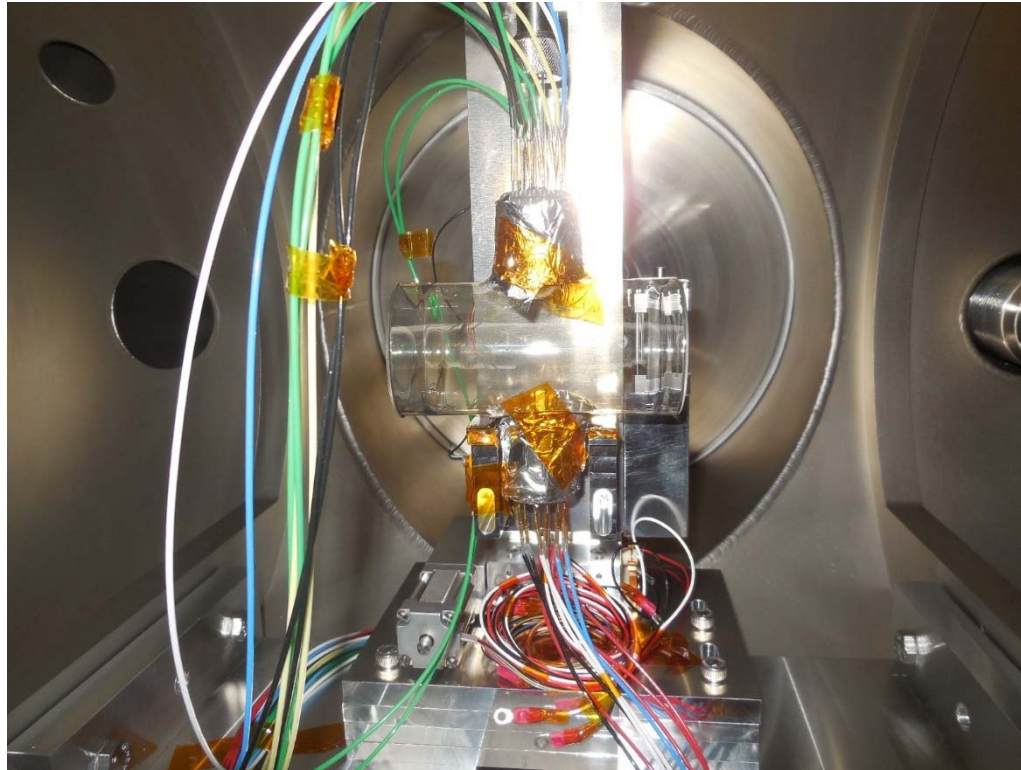
Horizontal focus plane
48.9 m

Towards the
monochromator

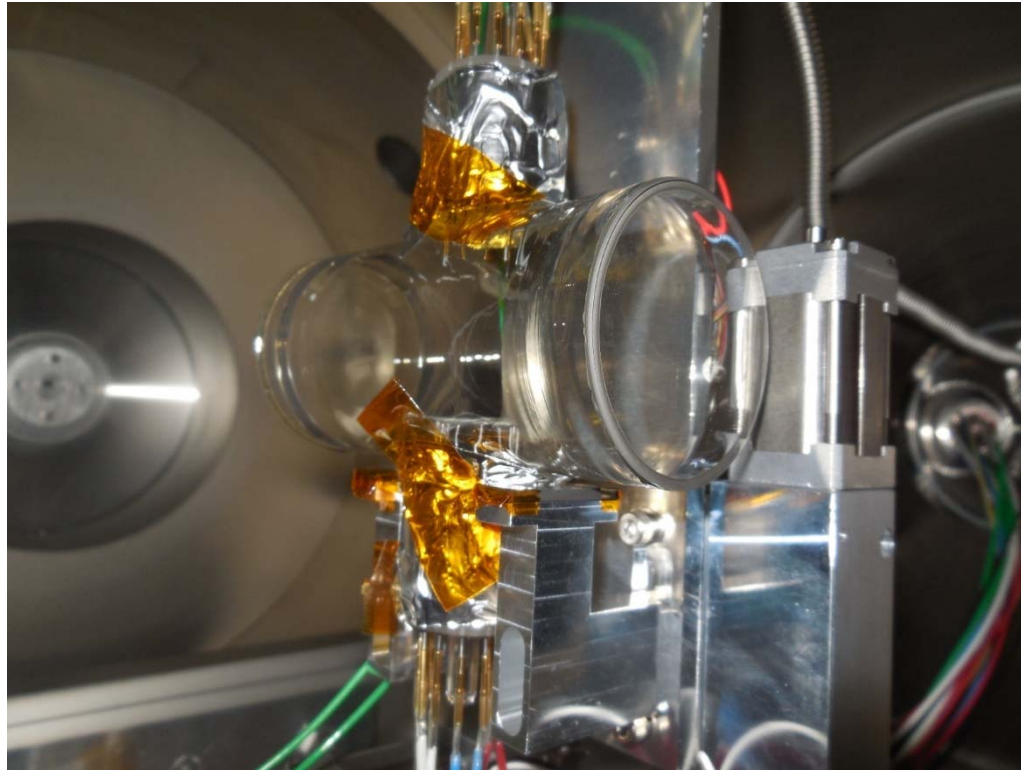
Synchrotron SOLEIL/DESIRS



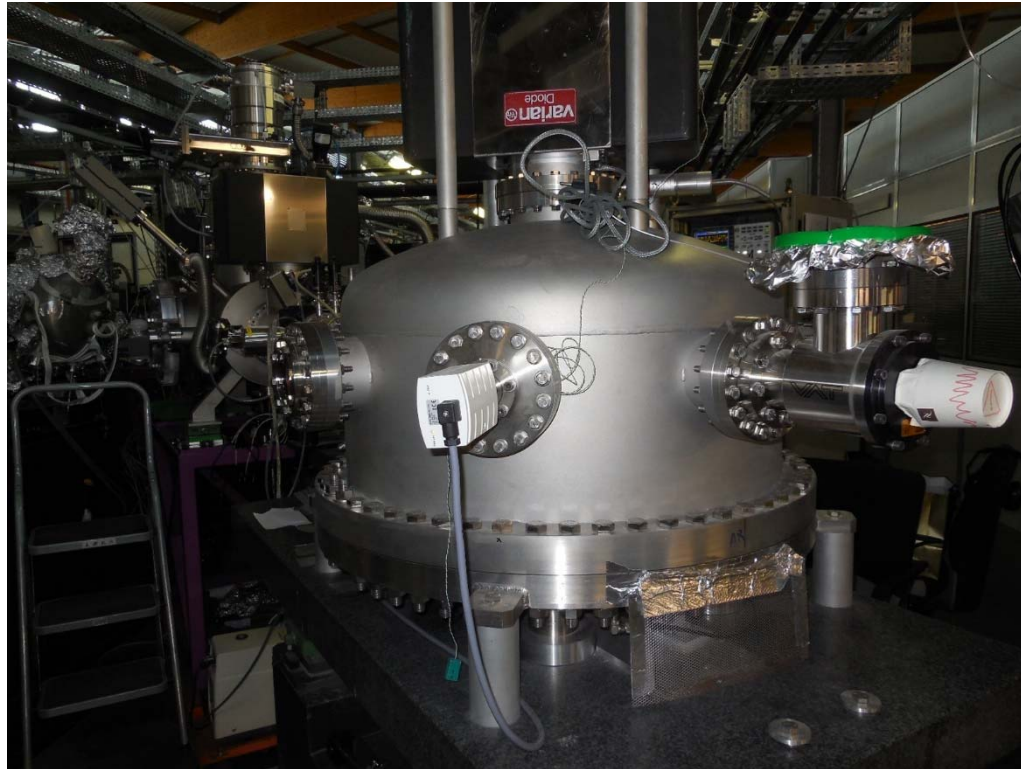
Synchrotron SOLEIL/DESIRS



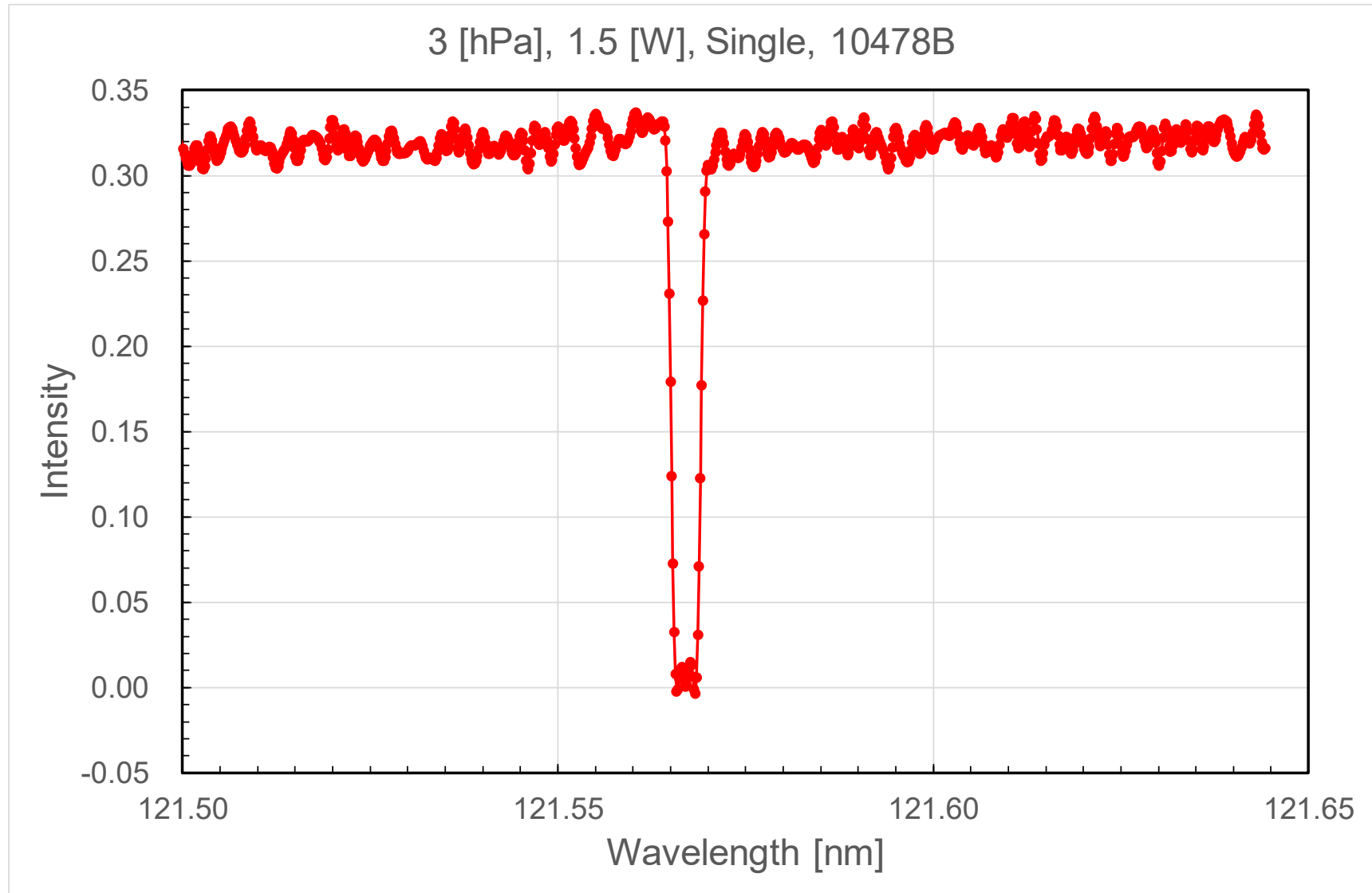
Synchrotron SOLEIL/DESIRS



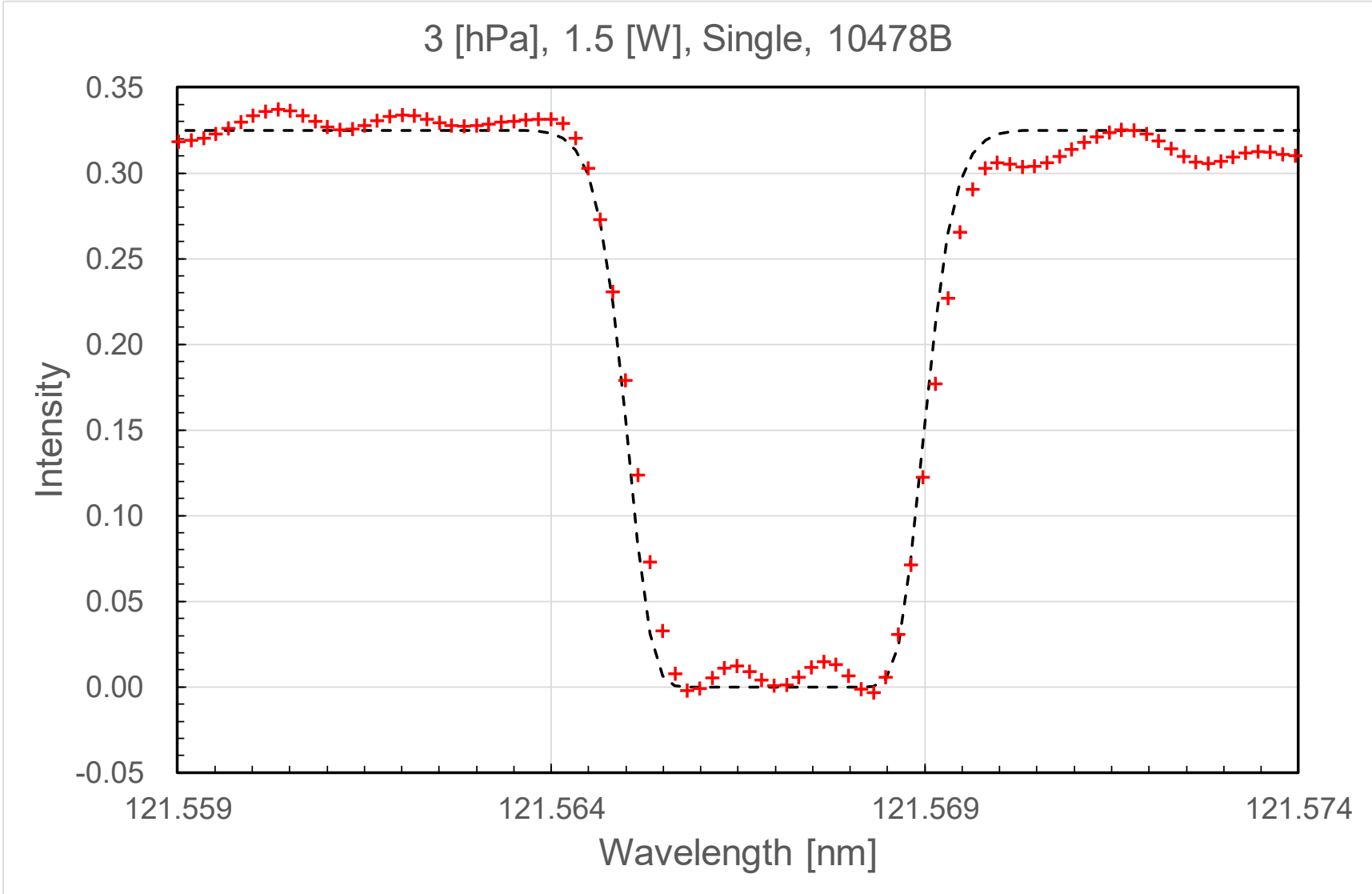
Synchrotron SOLEIL/DESIRS



Spectrum

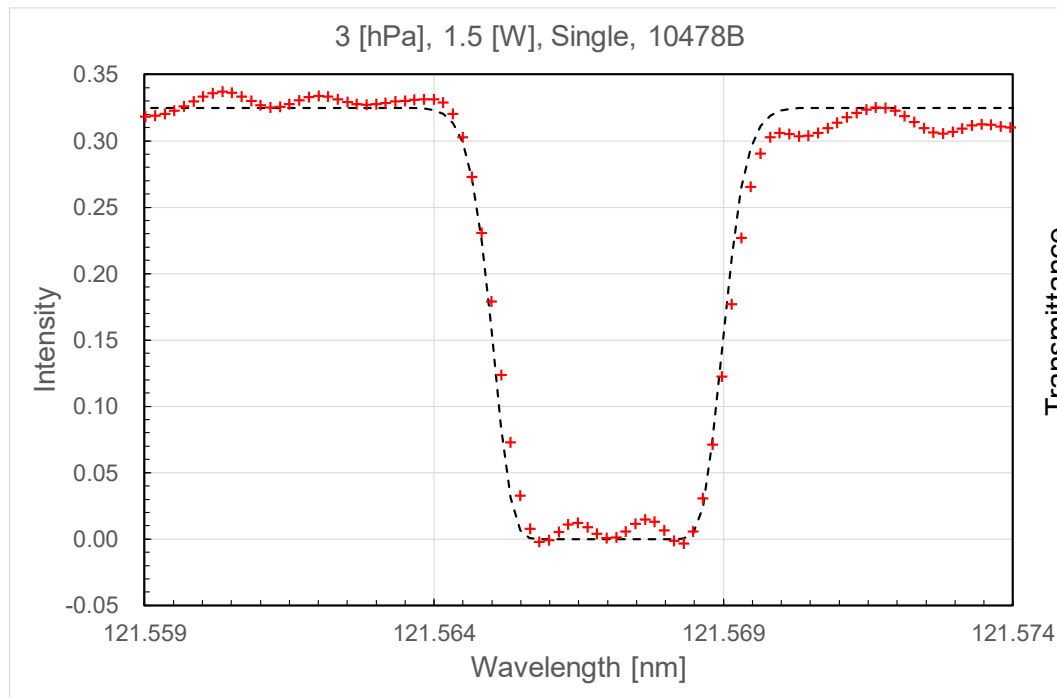


Spectrum

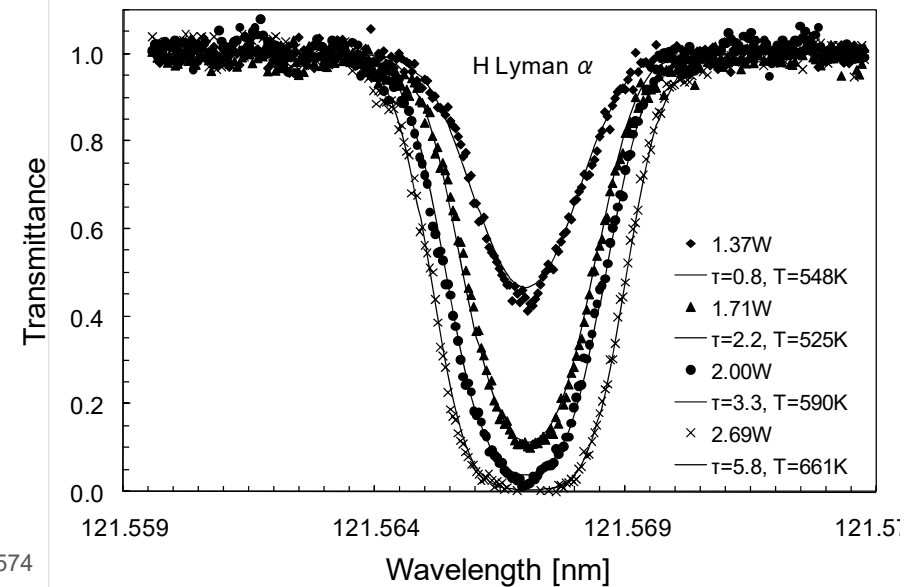


Spectrum

New Cell



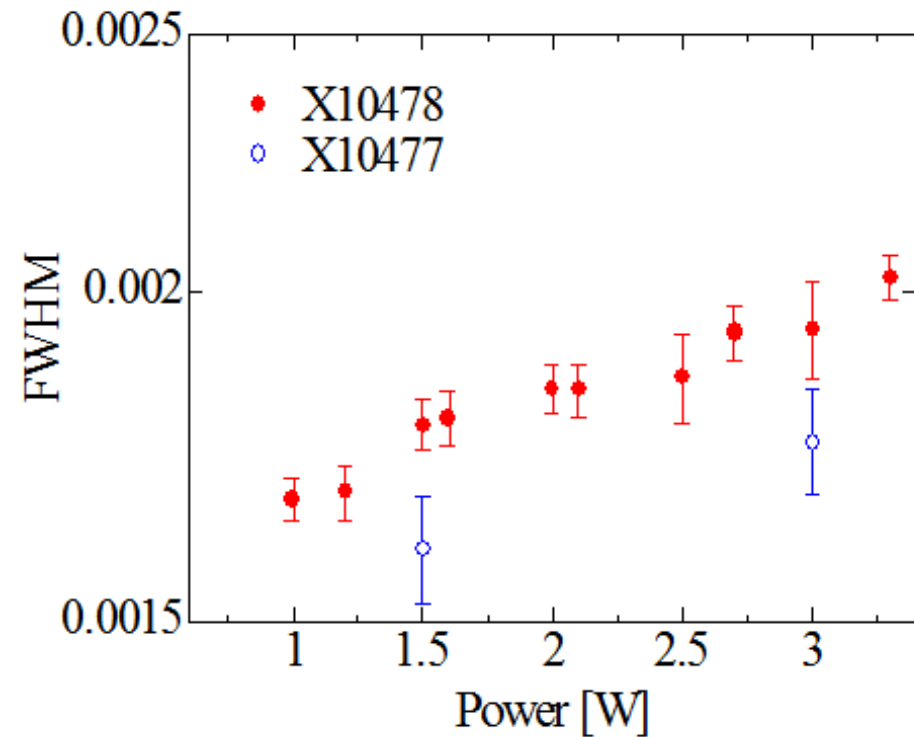
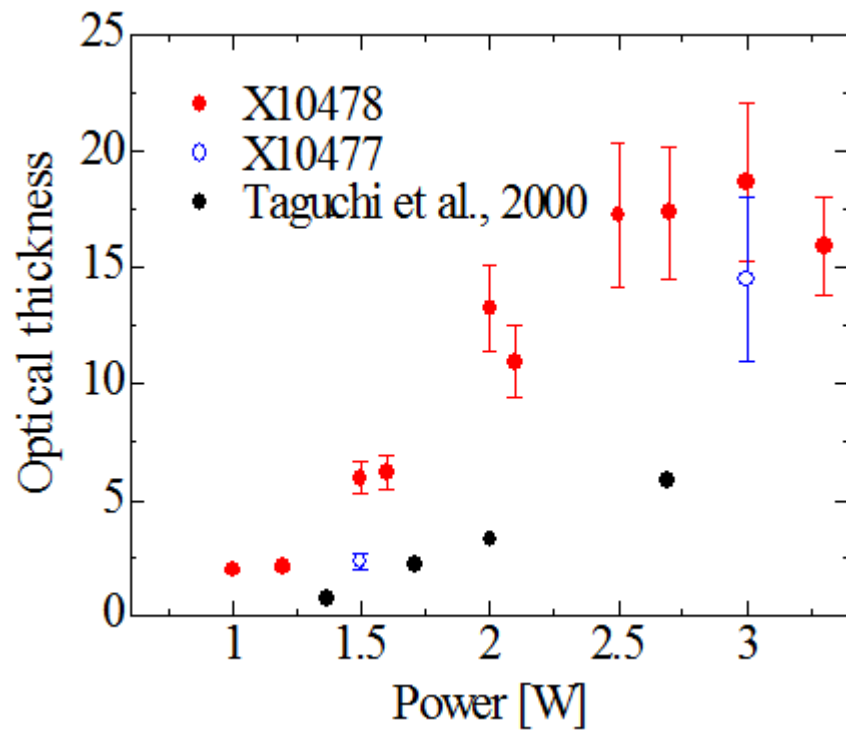
NOZOMI Cell



スペクトルプロファイル :
$$I(\lambda) = I_0 \exp \left\{ -\tau_0 \exp \left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right)^2 \right] \right\}$$

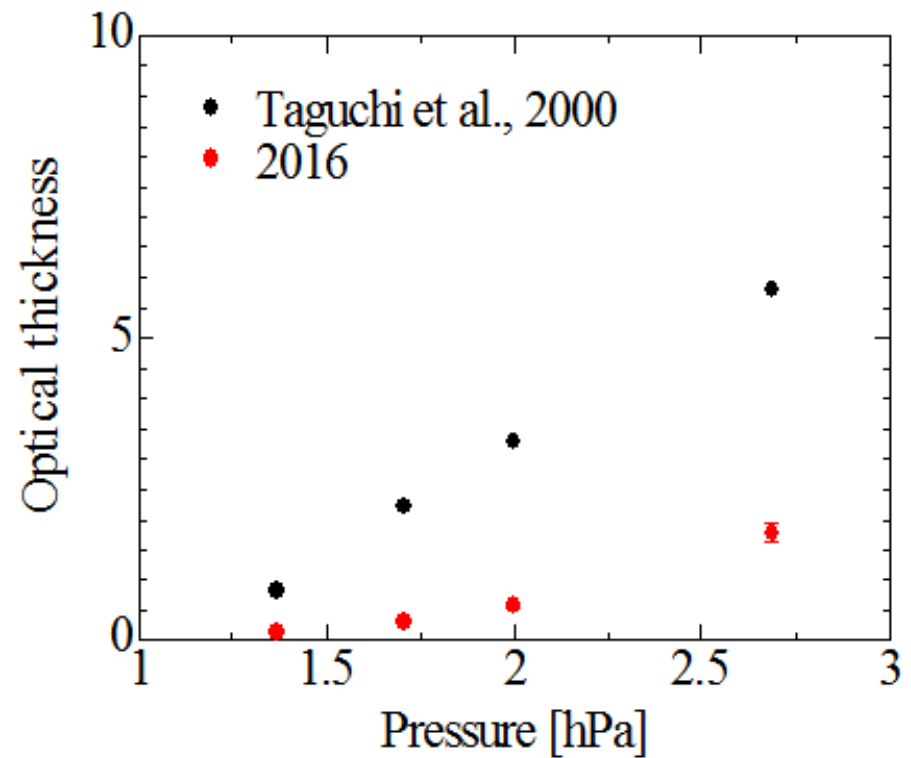
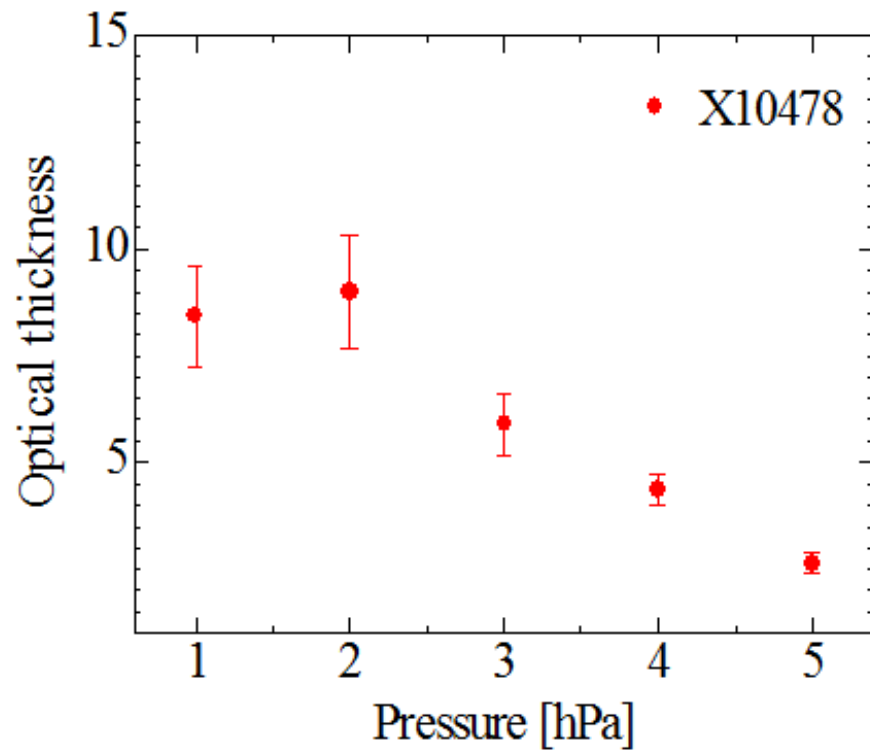
フィッティングによって I_0 , τ_0 , λ_0 , $\Delta\lambda$ を求める

実験結果



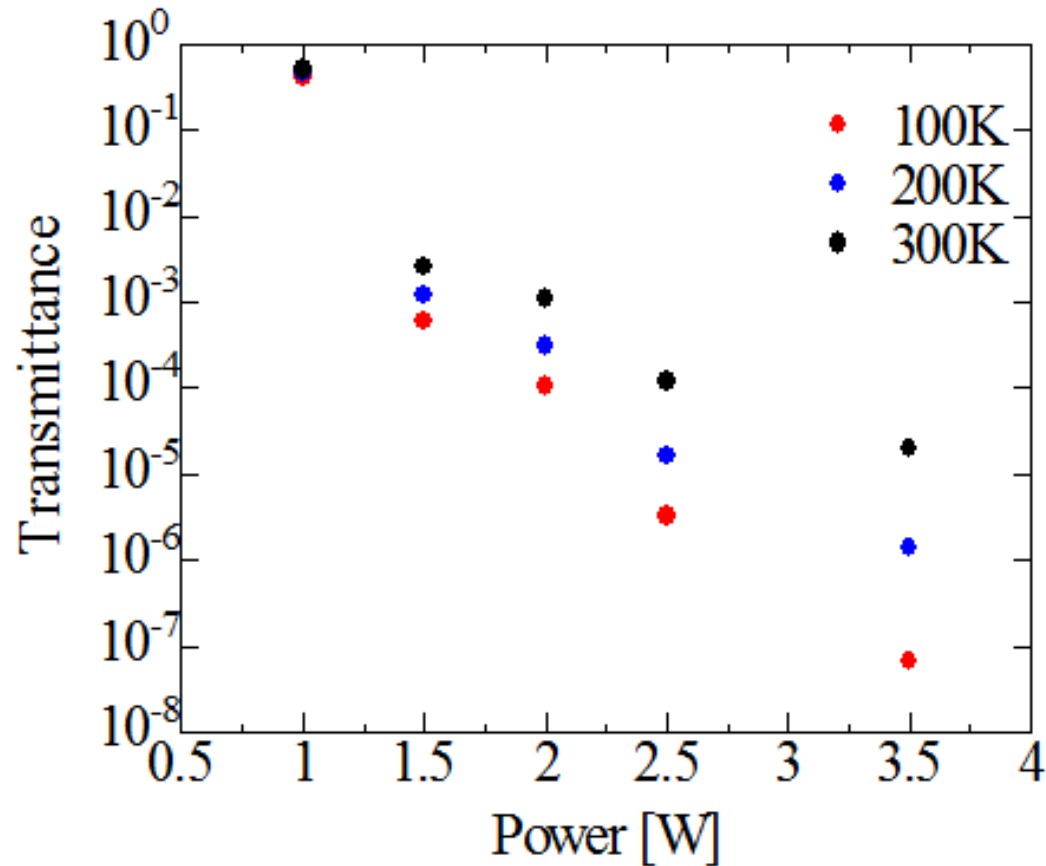
- NOZOMI/UVS-Pに比べ、光学的厚さを大きくできる
- 電力は3W程度で十分観測可能
- フィラメントは細い方がよい

実験結果



- 適正圧力は1-2Pa程度
- NOZOMI/UVS-Pは約20年の時を経て1/3程度に劣化
→ ミッションライフを3年と仮定しても十分に性能を維持できる

どんな観測ができるか



今回の実験で
得られたパラメタ
・フィラメント：X10478
・ガス圧：2 hPa

- ・今回得られてパラメタで観測を行う場合このようなデータがとれる
→校正結果と比較することによって元となるライマン α の強度、温度幅が導出可能

Summary

- 惑星コロナはリモートセンシングによって現在及び過去の惑星の水の存在量を知るための情報をもたらす。
- 吸収セル法は探査機搭載惑星コロナ観測機器に有効な技術である。
- 「のぞみ」以来20年ぶりに吸収セルを製作する技術を確立した。しかも、より高性能になった。
- 今後、寿命や性能の安定性評価が必要である。