

惑星大気模擬ガスの 高分散スペクトル取得装置の開発

細川 晃（総研大 D2）

小谷隆行（ABC/国立天文台/総研大）、河原創（宇宙研）、川島由依（理研）、吉岡和夫（東大）、
増田賢人（阪大）、石川裕之（ABC/国立天文台）、檜山和己（東北大）、田近英一（東大）

目次

背景

実験装置の概要

目標のパラメーター範囲

プロトタイプによるスペクトル取得実験

実験装置の課題

実験系の改良(案)

Future Works & Summary



背景：科学目的

直接撮像惑星・褐色矮星に対する
形成モデルに依らない物理パラメーターの推定

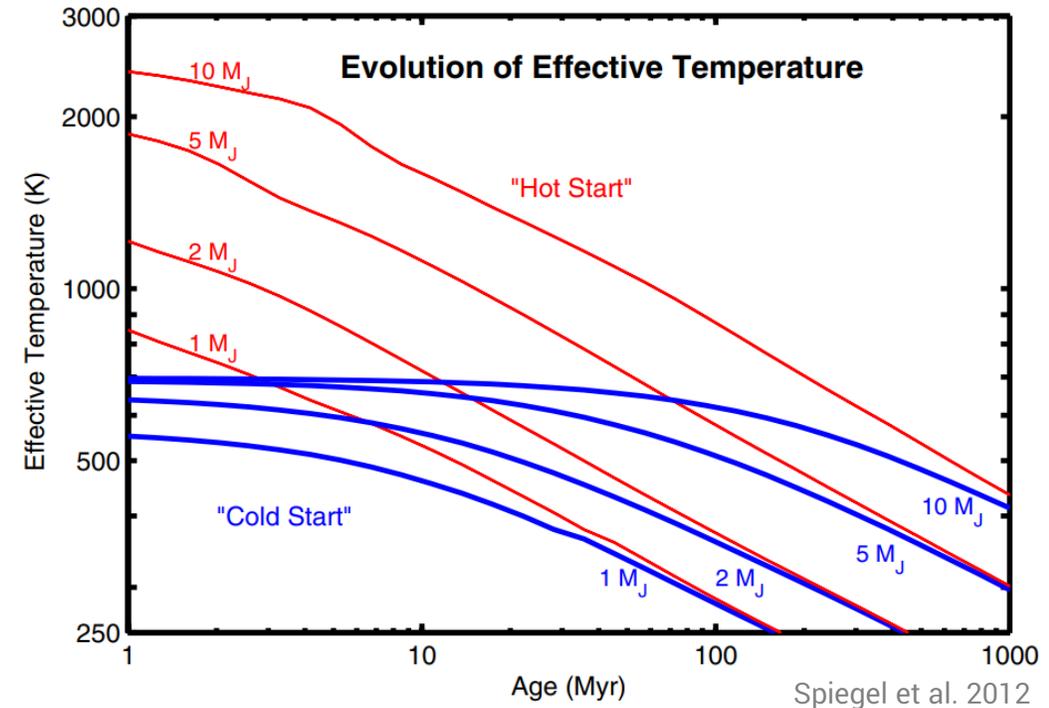
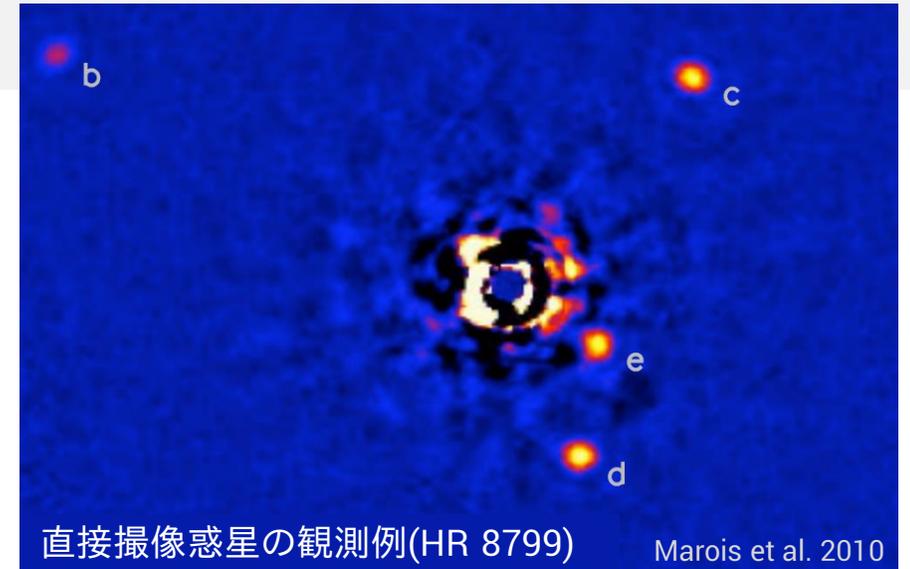
主な質量推定方法：光度からの間接的な質量推定

重力不安定モデル → Hot startモデル

コア降着モデル → Cold startモデル

→年齢が若いほどモデル間の乖離が大きい

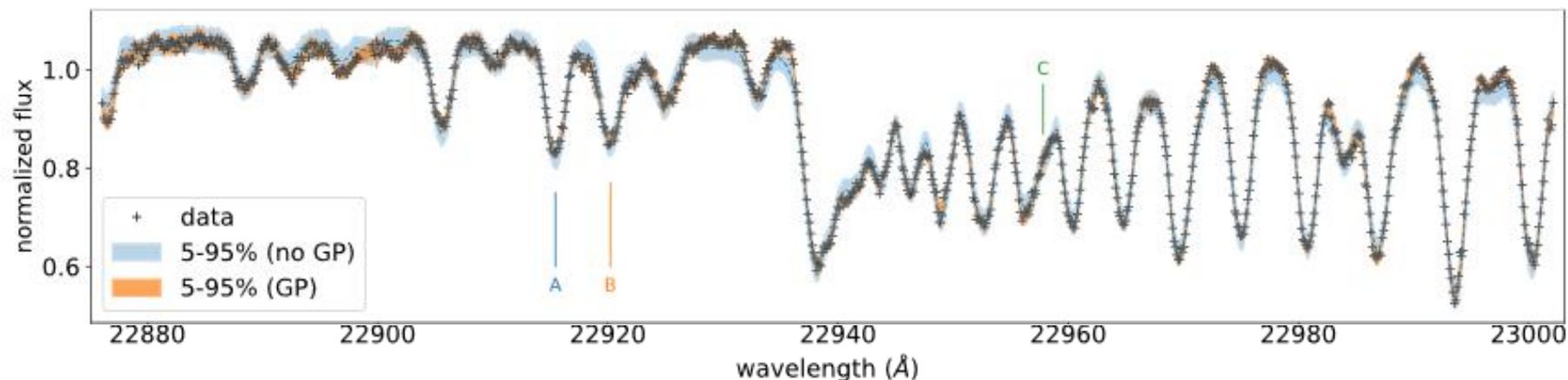
年齢の推定誤差が質量の不定性に



背景：形成モデルに依らない物理パラメーター推定方法

吸収線形状(プロファイル), 天体の絶対フラックスから質量推定が可能 (Kawahara et al. 2022)

1. 有効温度 T ・・・温度変化に敏感な吸収線ペアを選んで推定
 2. 惑星の半径 R ・・・天体の絶対フラックス & 温度から計算
 3. 表面重力 g ・・・吸収線の形状から圧力を求め、温度を加味し計算
- 線スペクトルの強度・プロファイルとフラックスから、半径, 重力を計算し質量を推定



褐色矮星(Luhman 16 A)の観測スペクトル

アプローチを試すには各温度・圧力ごとの分子の正確な高分解能スペクトルが必要

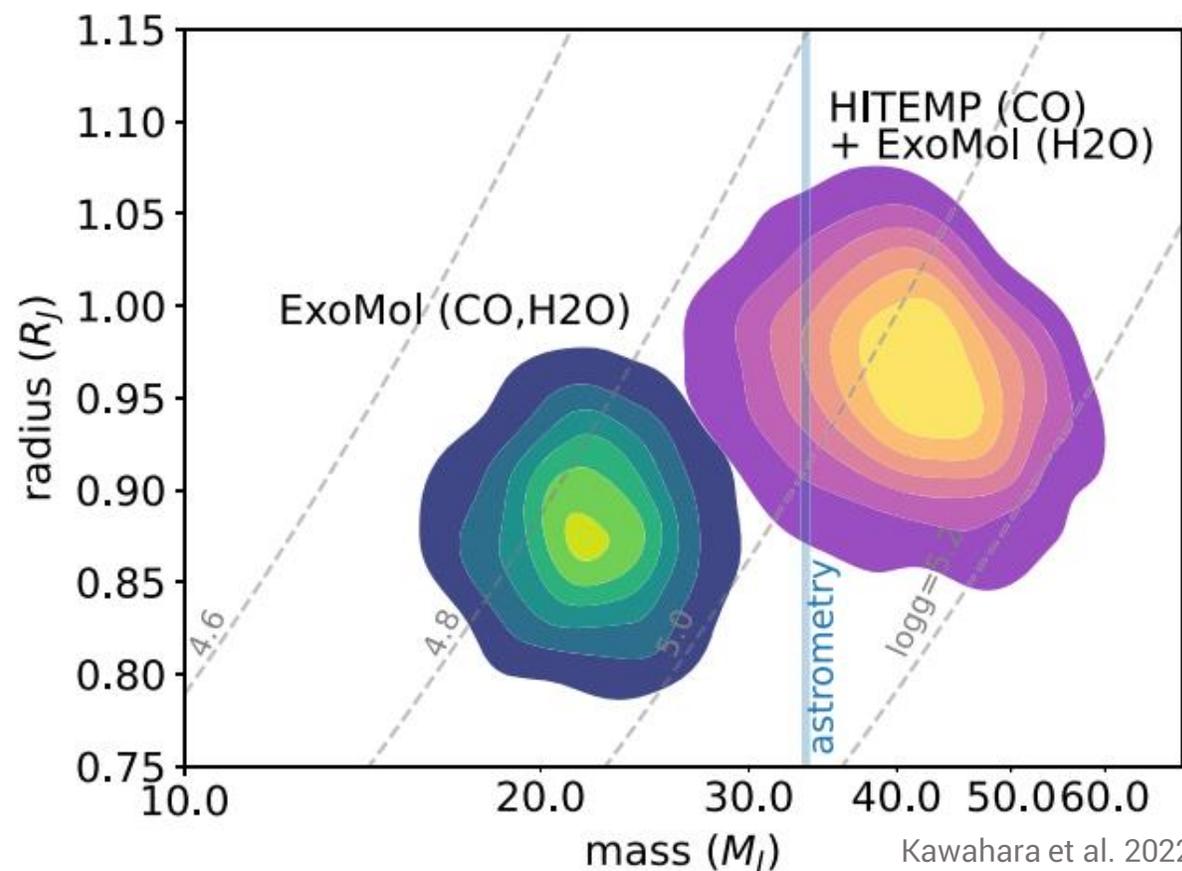
背景：既存の分子スペクトルデータベースについて

1. 実験データに直接基づくか 2. 水素の背景大気を模擬できるか で吸収線位置・形状が異なる

→ 質量推定結果にも誤差を生む

直接撮像惑星・褐色矮星の大気下(H₂, Heがメイン)での、正確な高分散分子スペクトルを知りたい

	ExoMol	HITEMP
スペクトル作成方法	モデル計算 (※パラメーターの一部は 実験値に基づく)	実験によるスペクトル + モデル計算
分子の種類	>50	8 (H ₂ O, CO ₂ , N ₂ O, CO, CH ₄ , NO, NO ₂ , OH)
メリット	水素+ヘリウム環境 (ガス惑星大気) でのスペクトルをモデル可能	実験スペクトルとの 整合性の高いモデル
デメリット	実験スペクトルに 直接基づいていない	窒素+酸素環境 (地球大気) でのモデルになる



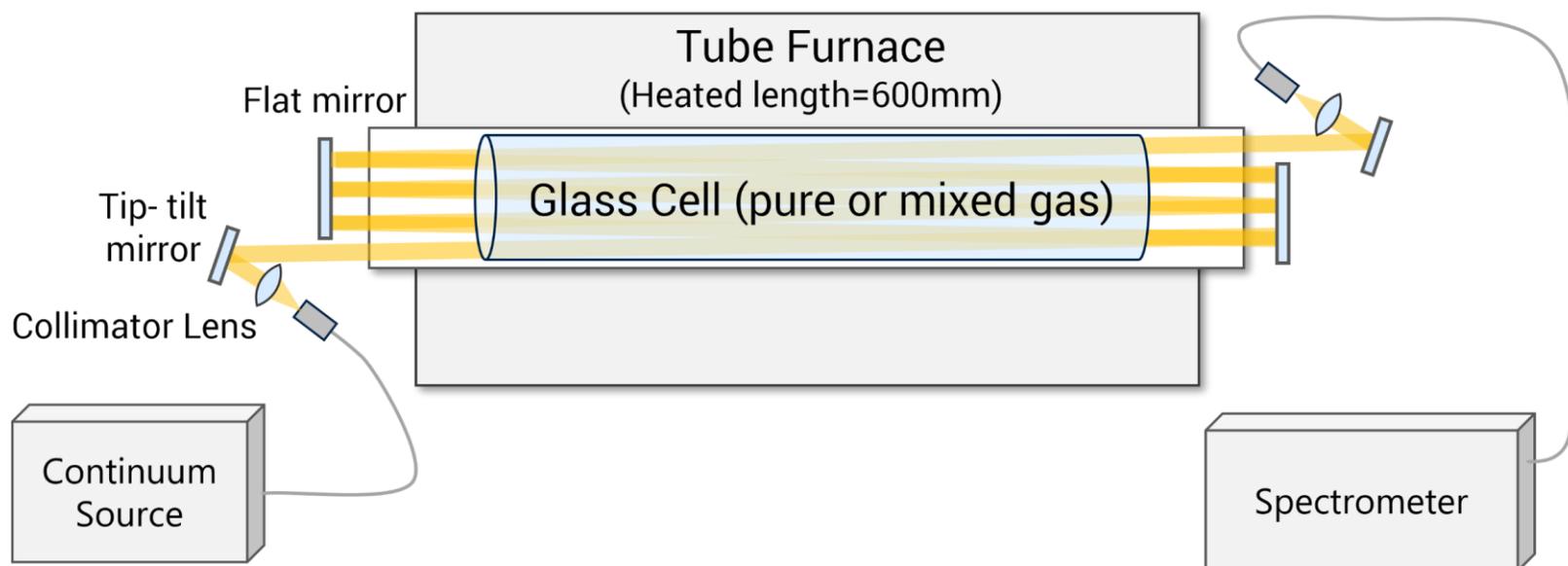
褐色矮星(Luhman 16A)の半径-質量推定結果

実験装置コンセプト

分子を特定の圧力でガラス製シリンダーに封入し加熱、連続光を透過させスペクトルを取得

- H₂, HeをベースにH₂O, CH₄, COなどのガスを一定の圧力・混合比で注入し密閉、高温チューブ炉で加熱
- 左右にミラーを配置しビームを多重反射させ、透過長を稼ぐ

測定温度範囲	300-1420 K
加熱長	600 mm
圧力	0.1-1 bar
測定波長	0.6-1.7 μm ※将来的により長波長側の取得を予定
波長分解能	R<170000
ターゲット気体	H ₂ O, CH ₄ , CO
背景気体	H ₂ , He



実験のステップ

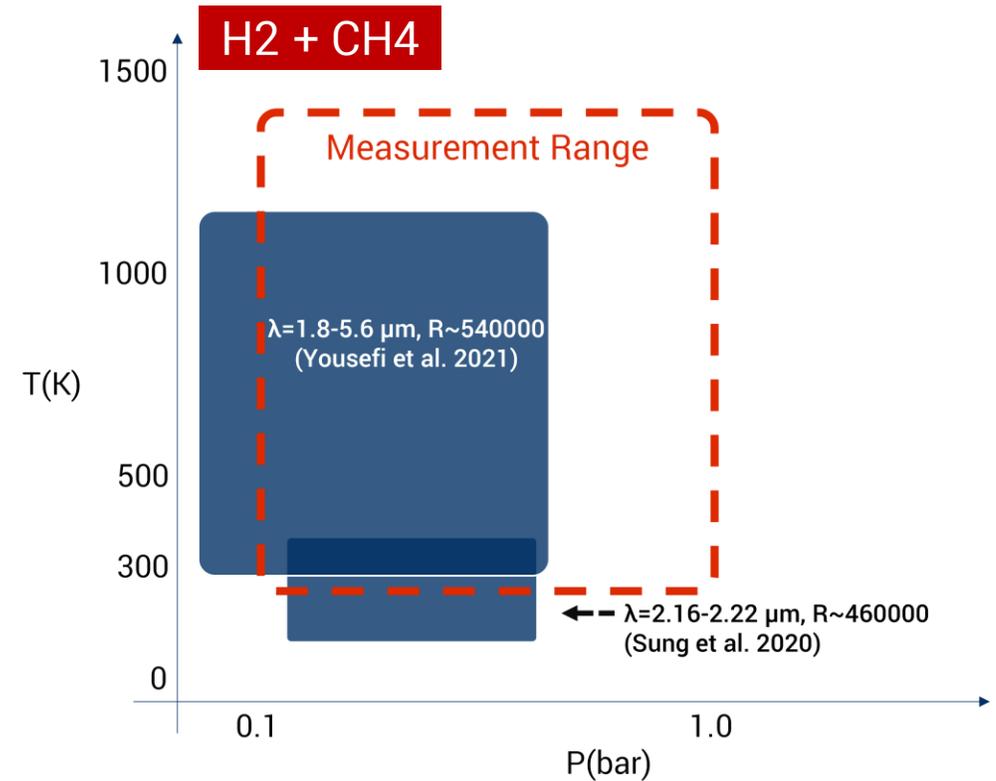
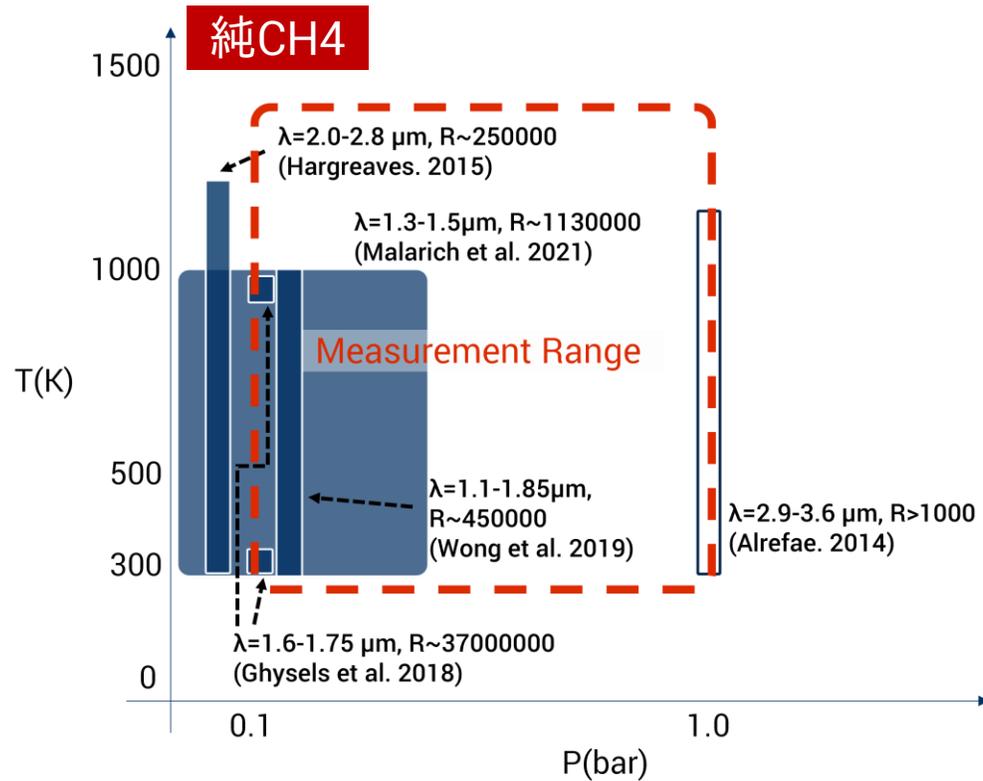
- 無害な分子 or 低温から実験し、装置の改良を重ねる
- 最終的に太陽組成(H₂:83%, He:16%)におけるCH₄, CO分子スペクトル取得を目指す

実験フェーズ	ターゲット分子	背景ガス	測定温度(K)	圧力(bar) ※1bar ≡ 大気圧
プロトタイプ試験	H ₂ O	Air or N ₂	300 -1400	0.1 -1
CH ₄ (低温、100%)	CH ₄ (100%)	-	300 - 700 ※自然発火温度以下	↑
CH ₄ (水素大気下)	CH ₄	H ₂ (80%) + He(20%) ※太陽組成	↑ ※H ₂ の自然発火温度以下	↑
CO(低温、水素大気下)	CO	None or H ₂ + He	↑	↑
高温&水素大気下	H ₂ O, CH ₄ , CO	↑	700 - 1400K	↑

目標のパラメータ範囲（圧力 - 温度図）

吸収線形状に強く寄与する温度・圧力域をグリッド状にデータ取得したい

※白棒線: $R < 50000$ の先行実験 青領域: $R > 50000$ の先行実験(吸収線形状を判別可能)



- 純CH4: 0.1-0.4bar付近にかけて $\lambda = 1 - 2 \mu\text{m}$ で測定されている
- 水素混合: $P = 0.1 - 0.5$ bar, $T = 300 - 1100$ Kの範囲を主にカバー

目標のパラメータ範囲（圧力 - 温度図）

$\lambda = 1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の高分散スペクトルに絞った場合

△: 波長域の一部に実験データが存在

×: 当該温度-圧力で実験データなし

CH4	0.1bar		1bar	
	100%	混合	100%	混合
300K	△	△	×	×
500K	△	△	×	×
700K	△	△	×	×
1000K	△	△	×	×
1200K	△	×	×	×
1400K	△	×	×	×

H2O	P = 0.1bar		1bar	
	100%	混合	100%	混合
T = 300K	△	△	△	△
500K	△	×	△	×
700K	△	×	△	×
1000K	△	×	△	×
1200K	×	×	×	×
1400K	×	×	×	×

→ 近赤外域でデータがあるのは一部に限られる
水素混合大気 or 1bar付近のデータが乏しい

目次

背景

実験装置の概要

目標のパラメーター範囲

プロトタイプによるスペクトル取得実験

実験装置の課題

実験系の改良(案)

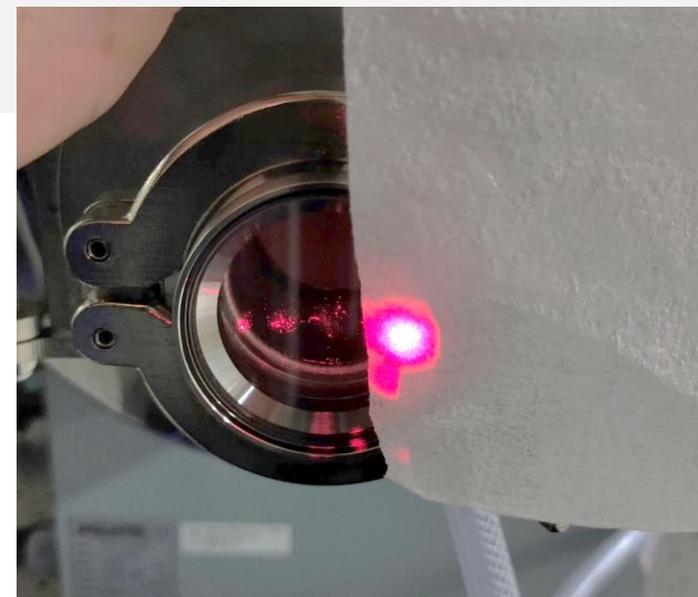
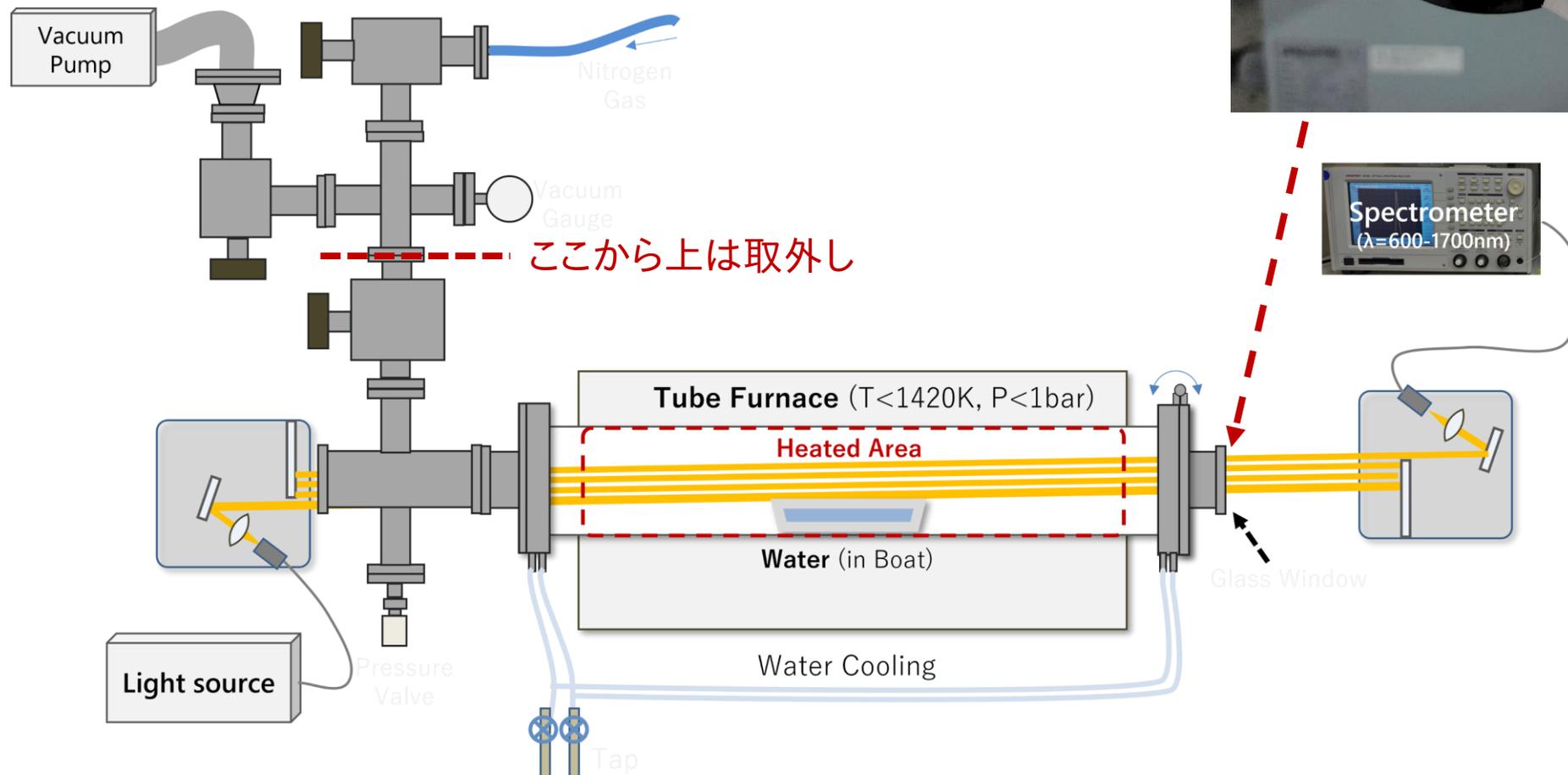
Future Works & Summary



プロトタイプによるスペクトル取得実験

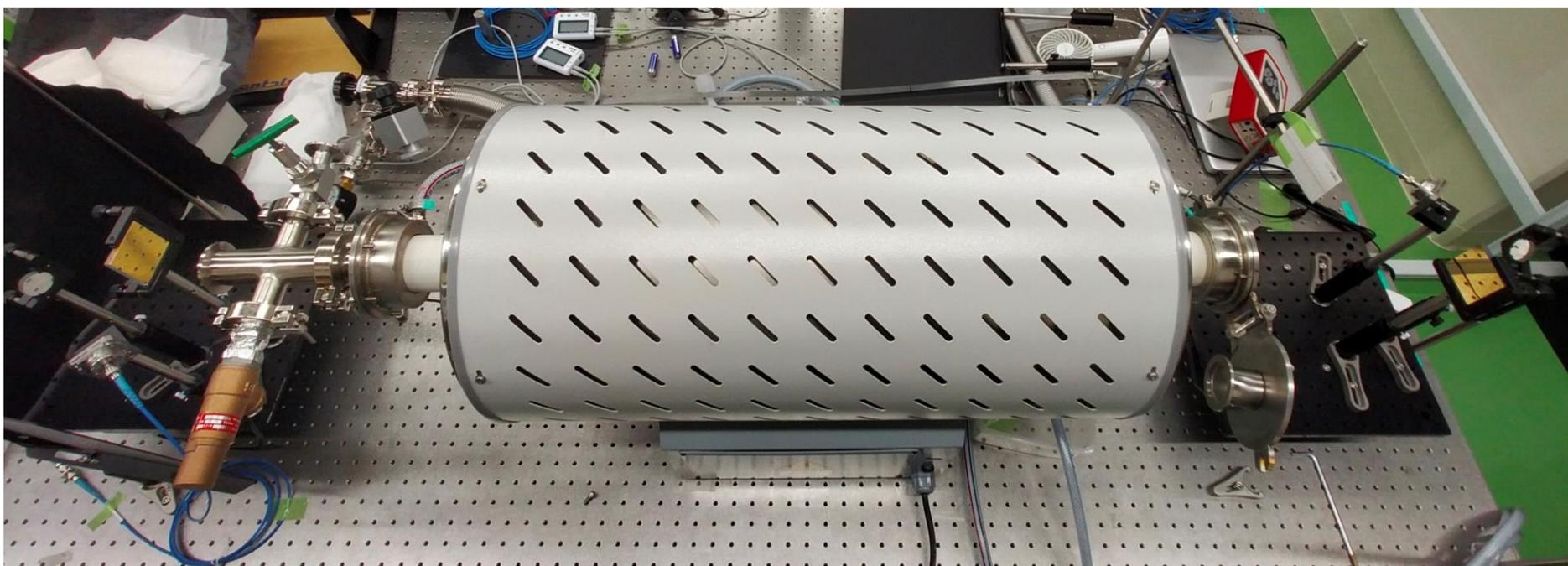
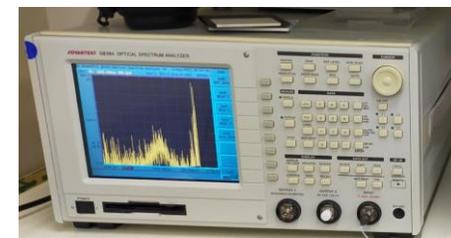
そもそもスペクトルを取得できるか検証するため、水蒸気のスペクトル取得実験を行った

- 真空+窒素充填が出来る実験系を構築したが、入射・出射ウィンドウの干渉が強くスペクトルに現れるため開放して実験



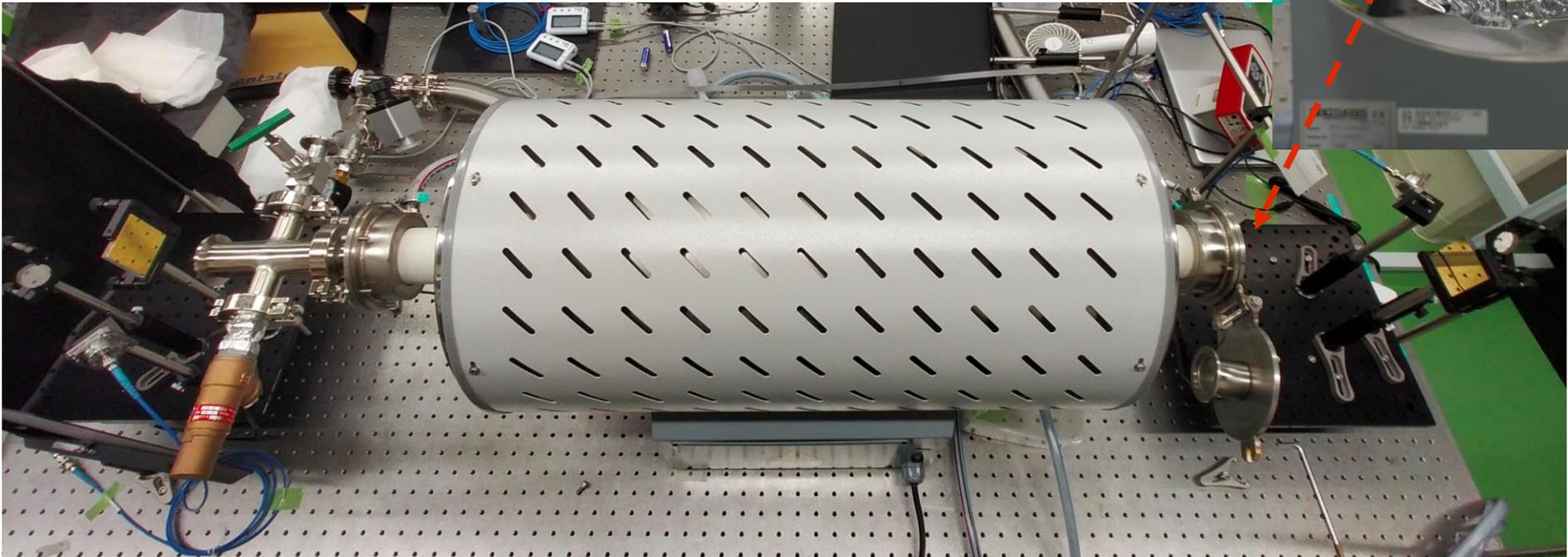
プロトタイプによるスペクトル取得実験

- チューブ状の加熱炉の中心を700Kまで昇温
- 純水を入れたボートを加熱炉に挿入し、気化したタイミングでスペクトル取得



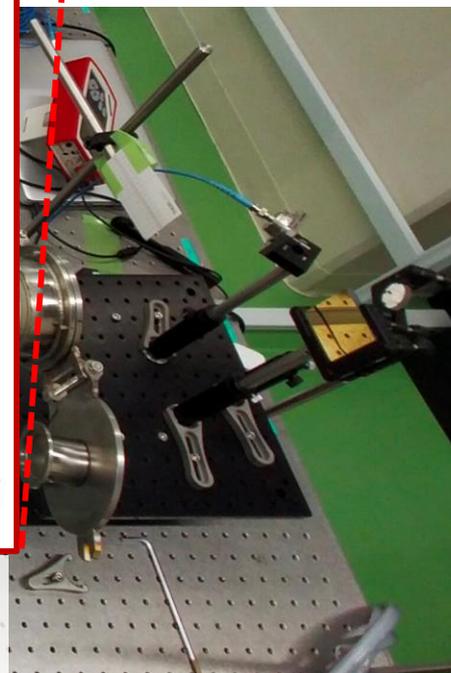
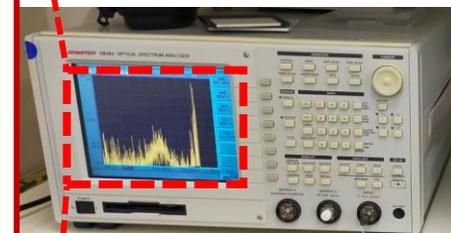
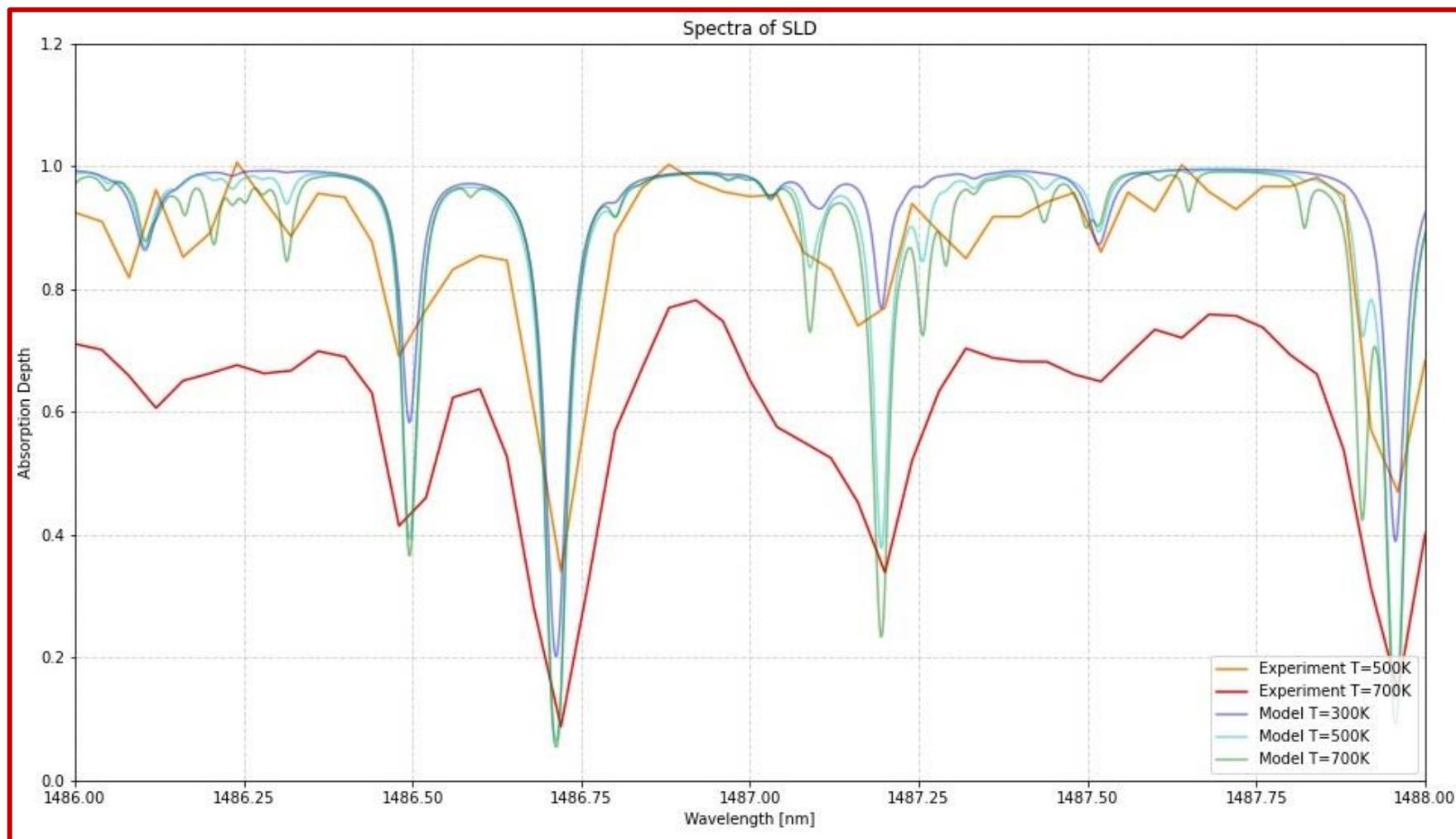
プロトタイプによるスペクトル取得実験

- チューブ状の加熱炉の中心を700Kまで昇温
- 純水を入れたボートを加熱炉に挿入し、気化したタイミングでスペクトル取得



プロトタイプによるスペクトル取得実験

取得した水蒸気スペクトル(R~37000, T= 400~600K? P~1bar)



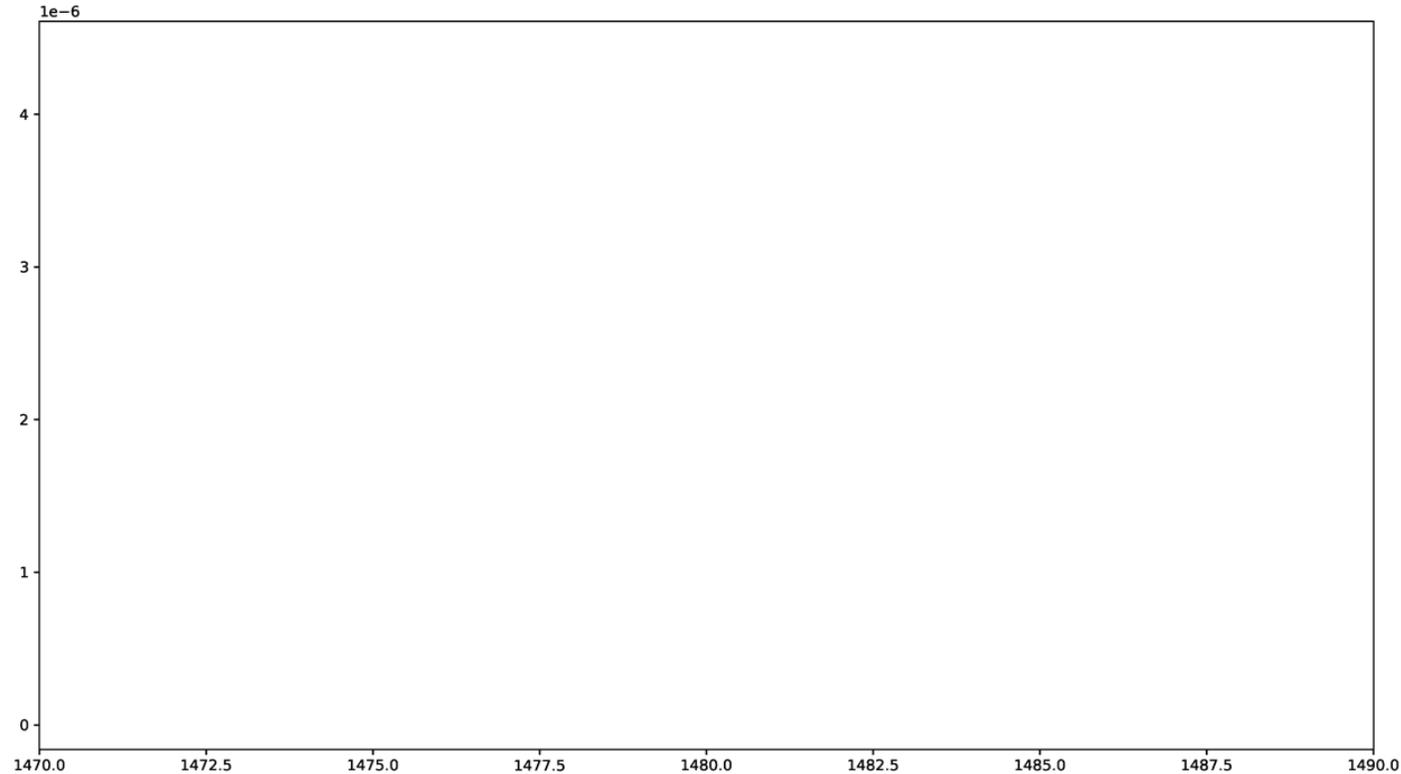
スペクトルモデル (Exomol) と吸収線位置は概ね一致

高温にするほどビーム入射効率が悪くなり、ベースラインが下がる結果に

実験装置の課題

スペクトル取得の時間安定性

青: T=300K, 水の挿入なし(安定状態), オレンジ: T=700K(チューブ炉設定温度), ポートによる水の供給



使用しているスペクトルアナライザは波長方向に順次データを取得

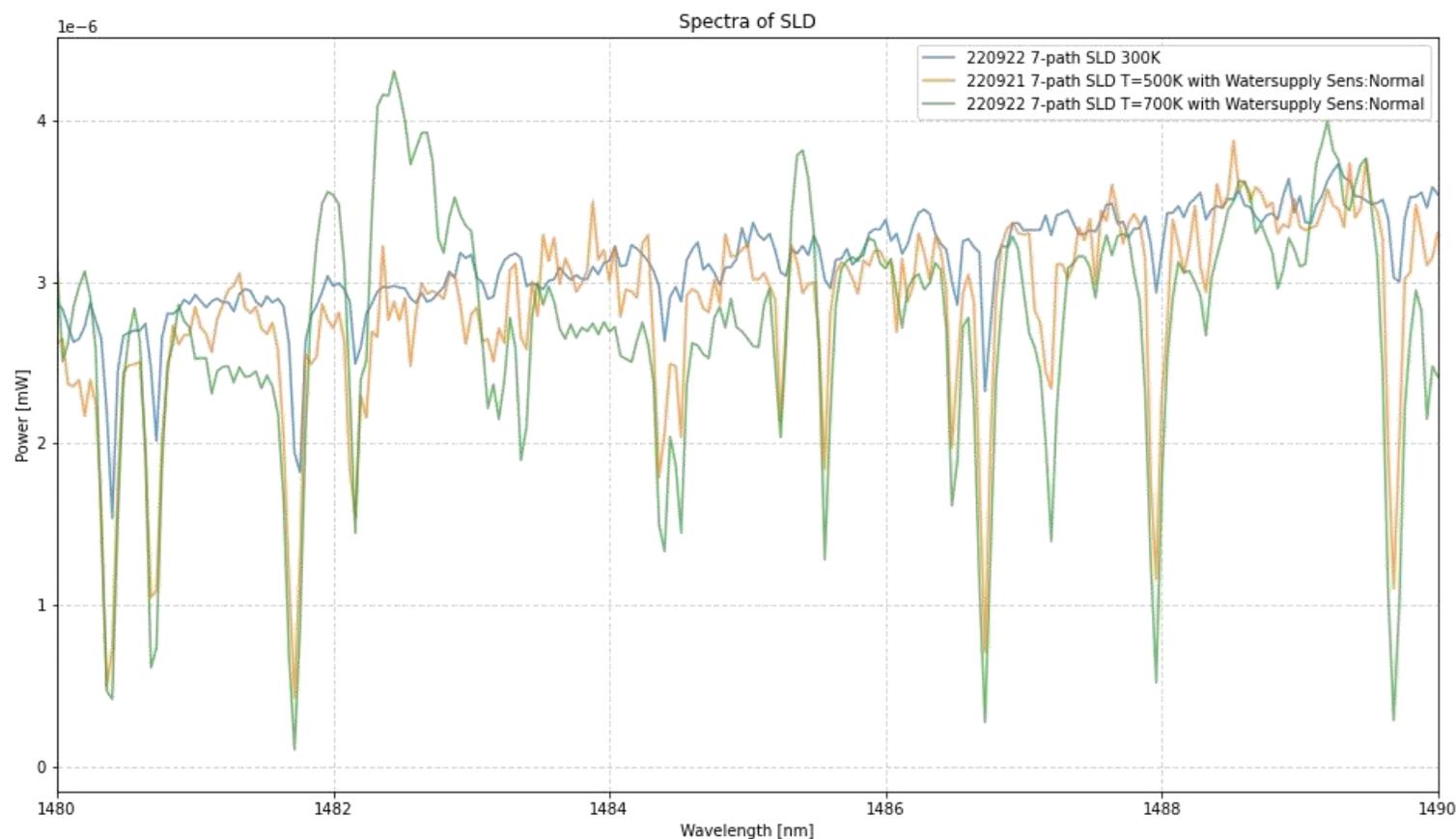
→測定中のビーム強度変化は波長方向の変動として記録されてしまう

実験装置の課題

加熱温度ごとのスペクトルの強度変動

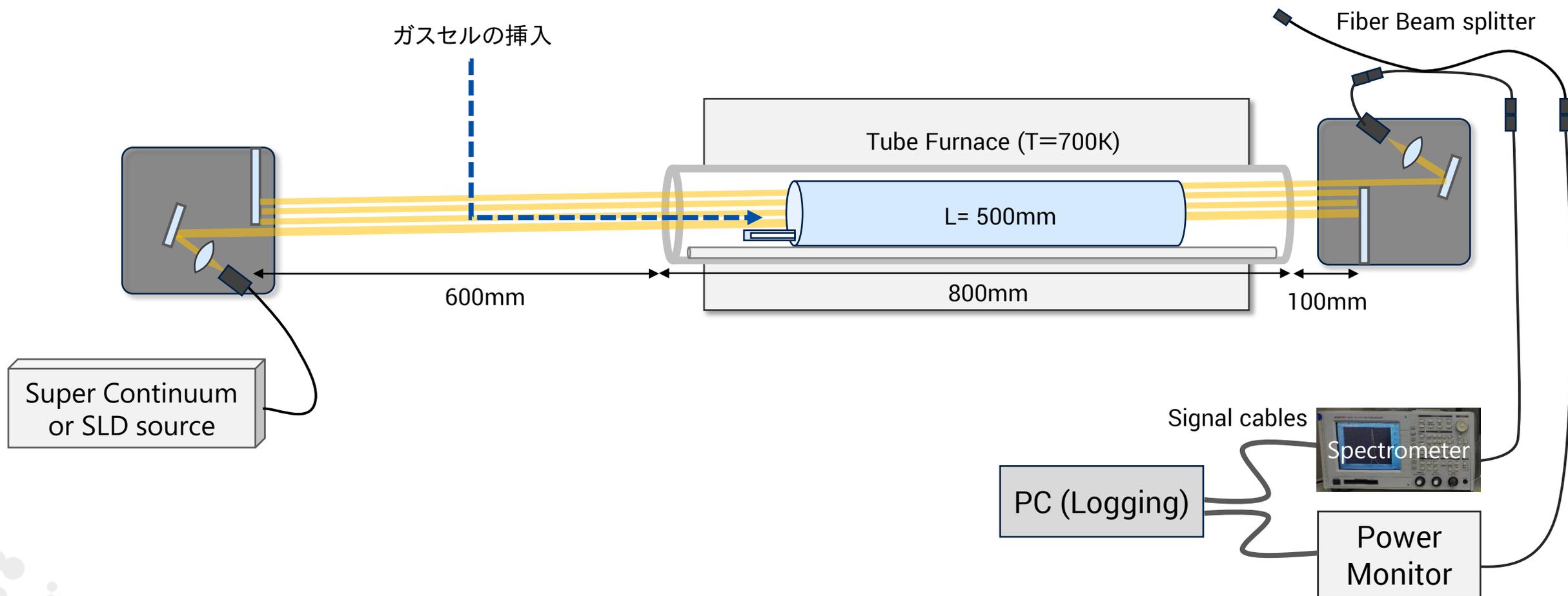
青: T=300K, 水の挿入なし(安定状態), オレンジ: T=500K(チューブ炉設定温度), ポートによる水の供給, 緑: T=700K

※縦軸はベースラインが概ね一致するように定数倍



実験系の改良（案）

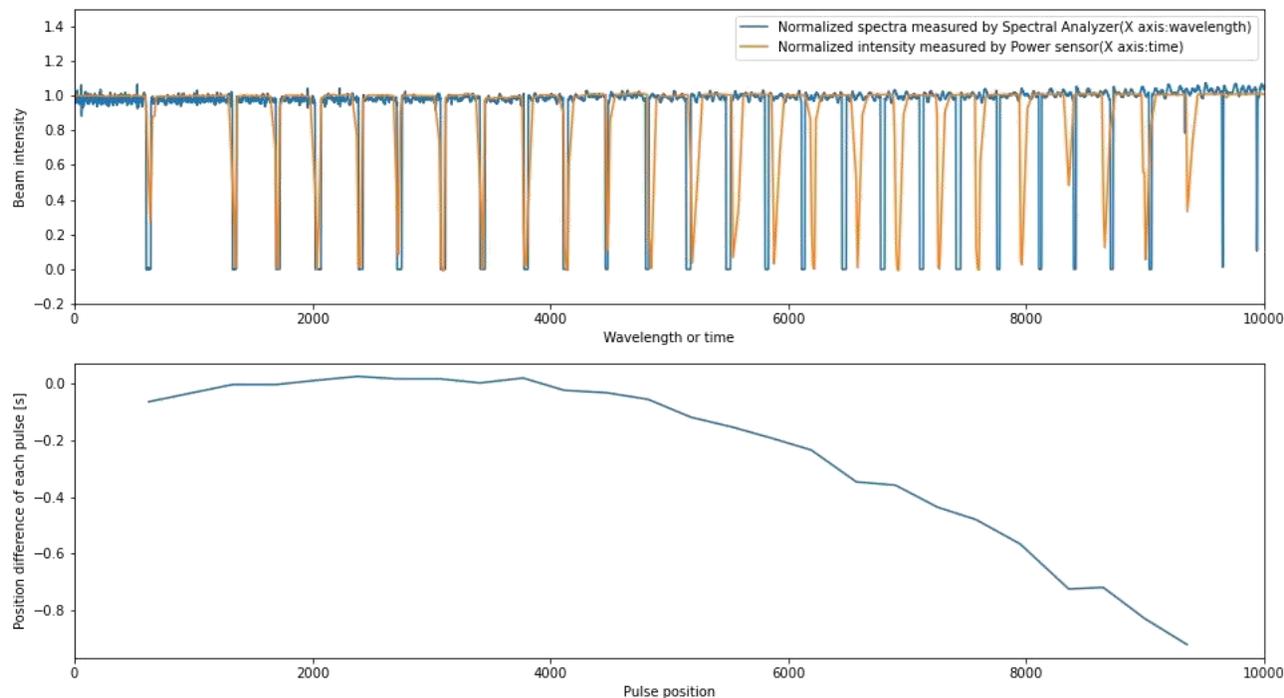
- パワーセンサーとスペクトルアナライザを並列に配置、スペクトル取得中の強度変動を記録
- 後で時間変動をスペクトルの波長方向の変動に紐づけ、強度を補正



実験系の改良 (案)

- 試験的にパワーセンサーを並列接続、測定中にチョッピングしてスペクトルとの対応を調べた

青線: 規格化したスペクトル(常温大気), オレンジ: ビームの測光強度



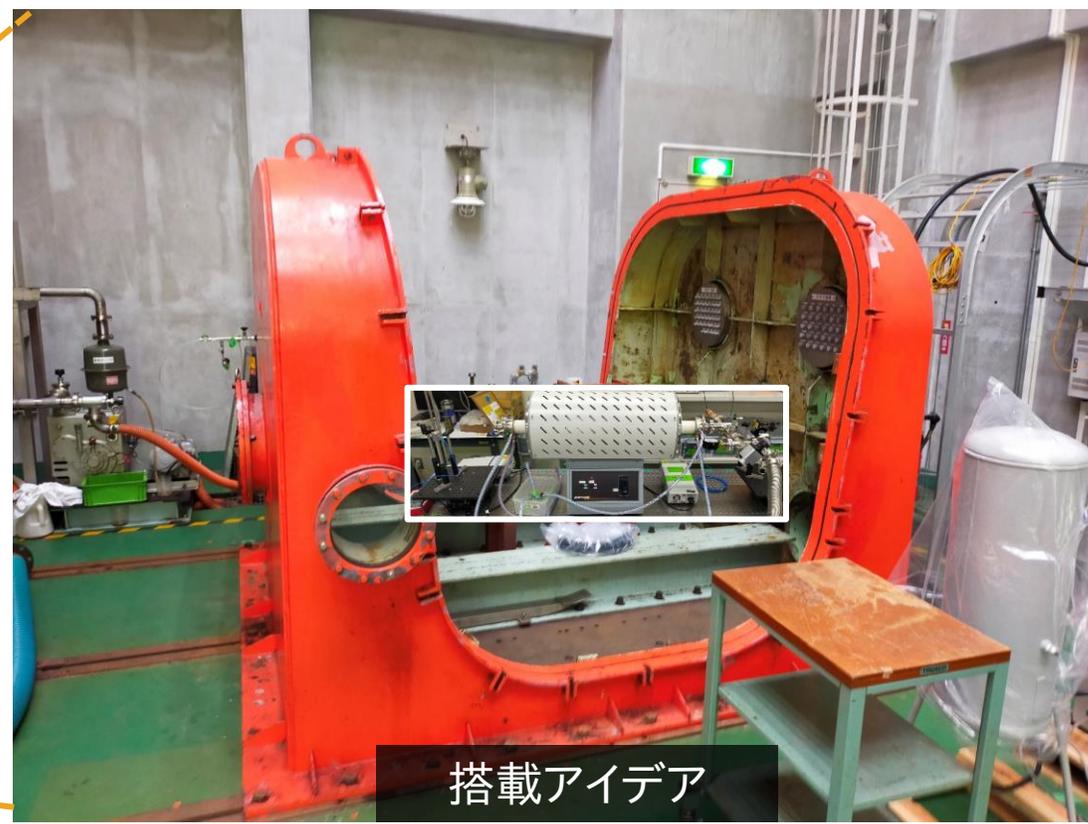
各チョッピングのデータ点数のずれ量(マイナスはスペアナのデータ取得速度が早い)

→分光器のデータ取得速度は途中から早くなっている

測定中の速度変化を関数フィッティングしてデータ点の対応を補正?(検証予定)

Future works

- 強度変動の較正方法を確立
- スペクトル、強度モニターの測定自動化・同期
- 防爆施設の設備への対応
- $\lambda > 2\mu\text{m}$ のスペクトル取得方法の検討



Summary

- 系外惑星の物理パラメーター（表面重力、質量）を詳細に探るために、正確な吸収線形状の分子スペクトルデータ（ $R > 50000$ ）が必要
 - 背景大気により吸収線形状が異なるため、系外惑星の大気組成に近い背景大気でのスペクトルデータが欲しい
- 直接撮像惑星の大気を模擬したガスセルを作成し、一定の温度・圧力における透過光スペクトルを取得する装置を開発中
 - プロトタイプの実験系で水蒸気（400~600K）のスペクトルを取得することに成功
ファイバーへの入射が安定しないなど課題が残った
- 今後：取得スペクトルの安定化に取り組み、安全を確保してH₂大気でのCH₄スペクトル取得を目指す